comité français des barrages et réservoirs

Vantellerie, contrôle-commande, télécom et alimentations électriques pour des barrages plus sûrs

Chambéry, Centre de Congrès Le Manège
2 et 3 décembre 2015

- Vantelleries des barrages dans les études de dangers, revues de sûreté, visites techniques approfondies, examens techniques complets
- Rénovations et maintenance des organes de vantellerie des barrages
- Remplacements et évolution des organes de vantellerie des barrages
- Rénovation et remplacement des contrôle-commandes, systèmes de télécommunications et installations électriques des barrages
- REX des incidents et des dysfonctionnements des barrages vannés

Comité d'organisation

Hervé BARTHOMEUF , président

Alain BONY

Joël CHAUDIER

Jean-Sébastien FARGEOT

Daniel MOUGE

Jérôme PETH

Guirec PREVOT

Vincent QUEMERAIS

Régis SIWULA

Sébastien SOUDAIN

Laurent VIDAL

Eric VUILLERMET

CFBR
Savoie Technolac
73373 LE BOURGET DU LAC
Tél : 04 79 60 64 45
www.barrages-cfbr.eu

SOMMAIRE

Thème A
Vantelleries des barrages dans les études de dangers, revues de sûreté, visites techniques approfondies, examens techniques complets

A.1 **La vantellerie et le contrôle-commande dans les livrables règlementaires : la vision des services de l'état** *Guirec Prévot, Cécile Schriqui, Romain Cloix, Simon Dieudonné, Patrice Meriaux*	11
A.2 **Analyse des risques liés aux systèmes de contrôle-commande des barrages : retour d'expérience des EDD et RS réalisés sur les barrages d'EDF** *Benoit Delprat*	23
A.3 **Capitalisation du retour d'expérience sur les vannes de barrage** *Philippe Bryla, Mathieu Gévodant, Marielle Montérymard*	31
A.4 **De la performance des évacuateurs de crues dans les études de dangers à la probabilité d'occurrence d'une rupture de barrage en crue** *François Massé, Anabel Lahoz, Thibault Balouin*	45
A.5 **Apports de l'étude de dangers sur la conception d'un ouvrage** *Pascal Boronat, Richard Gabriel*	57
A.6 **Quand la règlementation en matière de sécurité des ouvrages hydrauliques conduit à mettre en œuvre des technologies innovantes** *Frédéric Guillot*	63

Thème B
Rénovations et maintenance des organes de vantellerie des barrages

B.1 **Barrage de VILLEREST : réhabilitation des vannes de demi-fond avec réalisation de batardage spécifique** *Jean-Pierre Dumont, Mamy Tombozafy*	77
B.2 **Barrage de JOUX : rénovation de la vanne de demi-fond et de son système de manœuvre** *Thomas Bourgoin, Clément Fugier*	89
B.3 **Rénovation des vannes des évacuateurs des crues du barrage de SARRANS** *Pierre Grenouilhat*	101
B.4 **Rénovation des équipements d'évacuation des crues du barrage de KARIBA sur le Zambèze** *Nathalie Rosin-Corre, Sylvain Lopez, Renaud Vogeleisen, Willy Bouchet-Virette*	119
B.5 **Rénovation de l'évacuateur de crues et des organes de manœuvre du barrage de PONT-ET-MASSENE** *Olivier Lapeyre, Benjamin Raymond, Antoine Chardonnal*	131
B.6 **Le barrage du LIEGEOT : un exemple de complète remise à neuf des équipements d'un barrage mobile soixantenaire** *Denis Carlier, Philippe Schalkwijk, Maxime Vesin, Eric Lecomte, Johannes Evin*	145
B.7 **Reconstruction des barrages de COUDRAY et de VIVES-EAUX : vantellerie et contrôle-commande** *Laurent Vidal, Pierrick Lacheré, Etienne Bouchez, Sébastien Soudain*	161
B.8 **Travaux de rehausse et de renforcement de la vanne NPN (Nouvelle Passe Navigable) du canal de DONZERE** *Jean-Louis Dupuy, Yvan Setti, Patrick Bouhaniche, Vincent Quémerais, Guillaume Bernard, Yann Lenaour*	177

Thème C
Remplacements et évolutions des organes de vantellerie des barrages

C.1 **Création du nouveau dispositif de vidange de fond du barrage de SARRANS** *Nicolas Duda*	193
C2 **Remplacement des clapets de MAUZAC** *Pierre Grenouilhat*	207
C3 **Remplacement des vannes de crue des barrages de la VANELLE et BEAUMONT-MONTEUX** *David Grégoire*	221
C4 **Remplacement des vannes évacuateur de crue du barrage de PIZANCON** *Laurent Giraudon*	229
C5 **Installation des vannes d'isolement à l'entrée du canal d'ORAISON** *Thomas Donias*	239
C6 **Remplacement des portes avals des deux sas de l'écluse de KEMBS** *Jean-Baptiste Dury, Gaël Gras*	257
C7 **Guide des barrages gonflables : un outil pour la rénovation des barrages de navigation** *Julien Aubonnet, Jean-Pierre Seguin*	269

Thème D
Rénovation et remplacement des contrôle-commandes, système de télécommunications et installations électriques des barrages

D.1 **Modernisation du contrôle commande du barrage de VILLEREST (Loire)** *Anthony Lysimaque, Mamy Tombozafy*	285
D.2 **Renouvellement des systèmes de conduite et de contrôle-commande des aménagements du HAUT-RHONE** *Anne Audibert*	301
D.3 **Architecture de contrôle-commande des vannes segment** *Gilles Marconnet, Denis Reilhac*	309
D.4 **Dispositif de « crantage » des commandes de vannes d'évacuateurs de crues** *David Fauriel, Emmanuel François*	323
D.5 **Les grands lacs de SEINE, la nécessité d'une supervision et télégestion pour gérer 800 000 000 m^3 en amont de Paris** *Pascal Dupras, Jérôme Brayer, Denis Le Moullec*	333
D.6 **La fiabilité des réseaux opérés et l'impact sur nos organisations** *Philippe Giguelay, Christian Lachambre, Sylvie Dévillette*	345

Thème E
REX des incidents et des dysfonctionnements des barrages vannés

E.1 **Enseignements tirés des événements importants pour la sureté hydraulique (EISH) et éléments de retour d'expérience sur les organes hydromécaniques et de contrôle-commande des barrages** *Clément Gastaud, Annelaure Gauthier*	353
E.2 **ESSH : « ouverture intempestive » du clapet central du barrage de SAILLANT** *Philippe Giguelay, Nicolas Jankowski*	369
E.3 **Exploitation des barrages vannés : retour d'expérience sur le calcul de la débitance des barrages : Etudes sur modèles physiques et modèles numériques** *Magali De Cachard, Pierre Roumieu, Sébastien Roux, Nicolas Boisson, Antoine Vollant, Yannick Baux*	**Erreur ! Signet non défini.**
E.4 **Diagnostics de tenue en fatigue des vannes de fond** *Philippe Bryla, Romain Beaufils, Jean-Louis Ballester, Laurent Sublet*	385
E.5 **Rénovation des vannes de l'évacuateur de crues du barrage de LABARRE : analyse réalisée sur les efforts de manœuvre** *Manuel Alves*	399

Thème A

Vantelleries des barrages dans les études de dangers, revues de sûreté, visites techniques approfondies, examens techniques complets



Barrage de Beaumont Monteux, détail de machinerie des vannes, roue dentée
© EDF – Franck ODDOUX

LA VANTELLERIE ET LE CONTROLE-COMMANDE DANS LES LIVRABLES REGLEMENTAIRES DES BARRAGES : LA VISION DES SERVICES DE L'ETAT

Hydromechanical Equipment and Control-Command Systems in the Legal Deliverables Required for French Dams

Guirec PREVOT
BETCGB, 44 Avenue Marcelin Berthelot, 38000 GRENOBLE
guirec.prevot@developpement-durable.gouv.fr

Cécile SCHRIQUI, Romain CLOIX
DREAL Rhône-Alpes, 44 Avenue Marcelin Berthelot, 38000 GRENOBLE
cecile.schriqui@developpement-durable.gouv.fr, romain.cloix@developpement-durable.gouv.fr

Simon DIEUDONNE, Patrice MERIAUX
Irstea, CS 40061, 13182 AIX-EN-PROVENCE Cedex 5
simon.dieudonne@irstea.fr, patrice.meriaux@irstea.fr

MOTS CLÉS

Barrages, Etude de Dangers (EDD), Examen Technique Complet (ETC), Revue de Sûreté (RS), Visite Technique Approfondie (VTA), Rapport de Surveillance, Consignes Ecrites, Organes Hydromécaniques et Contrôle-Commande.

RÉSUMÉ

Cette communication dresse un portrait de la façon – souvent variée – dont sont traitées les thématiques de la vantellerie, du contrôle-commande, des télécommunications et des alimentations en énergie par les auteurs des livrables réglementaires – Visites Techniques Approfondies, consignes écrites, Etudes de Dangers, Examens Techniques Complets et Revues de Sûreté – liés à la surveillance et au diagnostic de l'état de sûreté hydraulique des barrages équipés d'organes vannés d'évacuation et/ou de vidange. Sur la base de l'analyse de ces rapports, les Services de Contrôle (DREAL) et leur Appui-Technique (BETCGB et Irstea) recueillent, livrable par livrable, les bonnes pratiques, les défauts couramment rencontrés, les pistes d'améliorations et les progrès constatés ces dernières années. En l'état actuel, ces problématiques sont souvent moins bien formalisées que celles du génie civil, voire même parfois absentes pour ce qui concerne le contrôle-commande. Les analyses produites ne sont, généralement, pas suffisamment détaillées pour estimer, de manière solide, le niveau de sûreté de ces équipements. Néanmoins, la réglementation constituée par le décret de 2007[1], relative à la sécurité des ouvrages hydrauliques, a permis de noter des progrès dans la prise en compte et le développement de ces sujets. C'est dans cet objectif que des recommandations et des axes de réflexions sont formulés auprès de l'ensemble des acteurs concernés par ces livrables réglementaires (responsables d'ouvrages, gestionnaires et bureaux d'études) dans le but d'améliorer l'analyse, la maîtrise et la réduction des risques liées à ces dispositifs.

ABSTRACT

This article presents the way – often diversified – whose the themes of hydromechanical equipment, control and command systems, telecommunications and energy supplies are taken into consideration in French legal reports (risk assessment, detailed technical inspection, technical review and diagnosis, etc.) related to the inspection and the reliability level's diagnosis of hydraulic dams equipped with outlet works and/or gated spillway. On the basis of the report's analysis, the Regional Control Authority (DREAL) and their technical supports (BETCGB and Irstea) summarize the practices noticed these last years: good practices, imperfections frequently encountered, improvements. These topics are often less well developed than those of civil engineering – and even sometimes missing for the control and command system. Analyses produced are generally not enough detailed to estimate, in a solid way, the reliability level of these equipment. Nevertheless, the statutory legislation of 2007 – related to the safety of dams and dikes – allowed noticing an improvement in the consideration and the development of these subjects. It is with this aim that we expressed advices and lines of research. This will enable the profession's community (dam's owners, managers of dams, design offices) to improve the analysis, control and reduction of risks related to these equipment.

1. INTRODUCTION

Les Directions Régionales de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL) assurent, sous l'autorité du préfet de département, la mission de contrôle de la sécurité des ouvrages hydrauliques et, à ce titre, instruisent (i.e. réceptionnent, examinent et évaluent) les documents et rapports transmis périodiquement par les responsables de barrages pour répondre à leurs obligations réglementaires. Ces documents prennent la forme de rapports de surveillance, de comptes rendus de visite technique approfondie (VTA) et de consignes écrites de surveillance et d'exploitation. Parallèlement, l'appui technique (BETCGB et Irstea) aux services de contrôle de la DREAL a en charge de formuler un avis motivé sur les Etudes de Dangers (EDD) et Revues de Sûreté (RS) réglementaires de barrage [1] adressées à l'administration. DREAL et Appui Technique ont donc une vision globale du traitement par les auteurs[1] de ces études ou documents.
La sureté hydraulique des ouvrages ne reposent pas uniquement sur les problématiques de génie civil. Relativement peu approfondis auparavant, les problématiques de vantellerie, du contrôle-commande, des télécommunications et des alimentations en énergie sont aujourd'hui au cœur des questions de sûreté hydraulique, en particulier par l'intermédiaire des Etudes de Dangers et Revues de Sûreté qui prévoient explicitement leur prise en compte. Depuis 2008, les bureaux d'études et l'administration se sont investis progressivement sur ces sujets afin de pouvoir répondre aux exigences de la réglementation.

Dans ce contexte et à l'appui de plusieurs années d'instruction de documents, cet article donne tout d'abord l'occasion aux DREAL - par la plume de la DREAL Rhône-Alpes - d'expliquer leur constat quant au traitement des problématiques de vantellerie et de contrôle-commande dans les livrables réglementaires « courants » (i.e. à pas de temps rapproché) afin que la démonstration de la maîtrise des risques par le gestionnaire de barrage soit mieux argumentée. Ensuite, sur la base des quelques 450 Etudes de Dangers et Revues de Sûreté analysées à ce jour, l'appui technique expose un retour d'expériences sur la façon - souvent diverse - dont ces sujets y ont été traités. Les barrages dotés d'un évacuateur de crues vanné sont au cœur de cette problématique et représentent un tiers des ouvrages étudiés et pour lesquels l'analyse de risques et l'évaluation de la performance, relatives à la vantellerie et au contrôle-commande, sont par essence cruciales.
Livrable par livrable, nous récapitulons ainsi les « bonnes » pratiques, les défauts couramment rencontrés, les pistes d'amélioration engagées par les auteurs et/ou bureaux d'études et les progrès déjà constatés en quelques années. Nous formulons nos attentes quant aux déroulés des études et contenu des documents, puis quelques réflexions et recommandations susceptibles de faire améliorer, sur le sujet de la vantellerie et du contrôle-commande, la réalisation des Etudes de Dangers, des Revues de Sûreté et des autres livrables réglementaires.

2. PERIMETRE DU CONTROLE-COMMANDE ET DE LA VANTELLERIE

Le contrôle-commande comprend l'ensemble des systèmes qui effectuent automatiquement ou non, les mesures et assurent la régulation et la protection d'une installation. Au moins quatre types de fonctions sont effectués par ces dispositifs :

- la prise d'information : réalisation de mesures (mesures de cotes, de positions…) ;
- la transmission de l'information : réalisée par les systèmes de télécommunications, satellite, filaire propre… ;
- le traitement de l'information : entrée d'une donnée d'information, traitement, sortie d'une donnée correspondant à un ordre. Cette mission est réalisée par les automates, des outils numériques mais aussi par des interventions humaines ;
- l'alimentation en énergie qui permet à ces systèmes de fonctionner.

Nous définissons la vantellerie comme tous les organes hydromécaniques intervenant dans la gestion de l'aménagement en exploitation courante et en crue (vannes, clapets, vérins, centrale oléo-hydraulique, treuils, câbles, chaines, batardeaux, grilles et ouvrages de protection contre les embâcles, dispositifs fusibles, fonds pleins, etc.).

[1] Bureaux d'ingénierie, prestataires spécialisés ou encore équipe spécialisée du maître d'ouvrage, selon le cas, tous ces organismes étant agréés.

3. LA VANTELLERIE ET LE CONTROLE-COMMANDE DANS LES DOCUMENTS RELATIFS A LA SURVEILLANCE ET L'EXPLOITATION

3.1 La réglementation

Le décret n°2007-1735 du 17/12/2007 [1] a fixé plusieurs prescriptions, imposables aux exploitants d'ouvrages concédés ou autorisés, déclinées dans le cahier des charges des concessions (arts 20-I et 20-III) ou dans le code de l'environnement (arts R-214-122, 127, 128, 131, 134, 135) : rédaction d'un rapport de surveillance, réalisation d'une visite technique approfondie (VTA), préparation de consignes écrites pour approbation par le préfet, tenue à jour d'un registre. La périodicité est fonction de la classe de l'ouvrage.
Bien que très général, le contenu des visites ou documents réglementaires est imposé par le cahier des charges types des concessions (articles 20-I et 20-III) ou par l'arrêté du 29/02/2008 [3] pour les ouvrages autorisés (articles 5 et 6). Aucun texte réglementaire ne décrit précisément la liste des matériels importants pour la sûreté hydraulique à intégrer dans les documents ou inspections réglementaires.

3.2 Les rapports périodiques de surveillance et le registre

Pour les matériels hydromécaniques et de contrôle-commande, le rapport doit contenir des renseignements synthétiques sur : les incidents d'exploitation, les événements particuliers survenus et les dispositions prises pendant et après ces événements, les essais des organes hydrauliques et leurs conclusions, les travaux effectués sur les matériels. Consistant en une synthèse des actions de surveillance et d'exploitation réalisées et tracées dans le registre, le rapport est généralement élaboré par l'exploitant.
Par conséquent, pour les matériels et organes importants pour la sûreté hydraulique, le contenu du rapport dépendra fortement de l'exhaustivité des incidents, travaux ou essais tracés dans le registre.

3.2.1 La pratique actuelle

Les incidents détectés par l'exploitant et tracés dans le registre concernent très souvent le dispositif d'auscultation (lorsqu'il existe) et les écarts de mesures d'auscultation. Les travaux de maintenance et les incidents survenus sur les matériels hydromécaniques et de contrôle-commande étant peu mentionnés dans le registre, les rapports de surveillance présentent globalement des lacunes sur le bilan de ces matériels. Les rapports de surveillance des barrages concédés sont relativement bien fournis et respectent le contenu minimal imposé par la réglementation. Une dérive est toutefois constatée chez certains exploitants qui n'indiquent plus dans les rapports la liste des incidents survenus sur l'ouvrage pendant l'année écoulée. Une confusion est souvent faite entre le rapport de surveillance et le rapport d'auscultation, qui doit être réalisé par un bureau d'études agréé. Les faits notables d'exploitation sont très souvent décrits par le bureau d'études dans son rapport d'auscultation et l'exploitant ne voit donc pas la plus-value de produire un rapport de surveillance.

3.2.2 Les attentes et recommandations

De manière générale, le rapport de surveillance doit être détaillé pour ce qui concerne les travaux, incidents ou essais concernant le matériel hydromécanique et de contrôle-commande.
Dans le cas des barrages de classe A et B pour lesquels une étude de dangers a été réalisée, un schéma fonctionnel de l'aménagement devrait permettre de cibler précisément les matériels et organes importants pour la sûreté hydraulique (à priori intégrés au périmètre établi dans l'EDD). De fait, dès lors qu'un événement implique l'un des objets de ce périmètre (par exemple: câble de diffusion d'alarme, diffuseur d'alarmes, poire de niveau haut, groupe électrogène...), le rapport de surveillance devrait lister ces dysfonctionnements et dans la mesure du possible en analyser les causes et l'impact sur le fonctionnement global de l'ouvrage, et le cas échéant les suites adoptées (mesures compensatoires, travaux, …).

3.3 Les visites techniques approfondies (VTA)

Ces visites doivent être réalisées par un personnel compétent en hydraulique, en électromécanique, en géotechnique et en génie civil. Pour ce faire, la réglementation n'impose pas l'intervention d'un bureau d'études agréé ni même que l'ensemble de la VTA soit réalisée par une seule personne. Concernant les matériels hydromécaniques et de contrôle commande, le compte-rendu d'une VTA doit préciser : les constatations et éventuels désordres observés sur les matériels, leurs origines possibles et les suites à donner en matière de surveillance, d'exploitation, d'entretien, de diagnostic et de confortement.

3.3.1 La pratique actuelle

Avant 2007, les responsables d'ouvrages avaient souvent l'habitude de faire réaliser un examen visuel de leurs barrages par un expert en génie civil. Presqu'aucun examen visuel détaillé n'était réalisé pour les matériels hydromécaniques et de contrôle-commande en dehors de la maintenance courante de l'exploitant. Depuis 2007, les responsables d'ouvrages intègrent progressivement l'ensemble de ces matériels dans leurs VTA.
Le périmètre des VTA des ouvrages de classe A et B inclut généralement les matériels définis comme importants pour la sûreté hydraulique dans l'étude de dangers du barrage. On retrouve principalement : les vannes de vidange de fond (vannes de garde et de réglage), les vannes des évacuateurs de crues et leurs systèmes de manœuvre, les alimentations en énergie normale et de secours des organes de sécurité, les ateliers d'énergie continue, les mesures de niveau, les dispositifs de sauvegarde, les liaisons permettant la transmission des alarmes et le contrôle-commande des organes de sécurité.
Certains gestionnaires d'ouvrages se limitent à faire un état des lieux des essais et de la maintenance réalisée par l'exploitant sans qu'un réel avis d'expert (extérieur à l'exploitation courante) ne soit formulé sur la pertinence de ces essais, ni sur l'exhaustivité des contrôles réalisés. Par exemple, pour des matériels du type poire de sauvegarde ou alarmes, il arrive que des seuils ne soient jamais testés par l'exploitant (seuils d'alarme renvoyés à l'automate programmable barrage non contrôlés, calage altimétrique d'une poire d'alarme d'un bac de mesure de fuites non vérifié...) sans que la VTA ne le mette jamais en évidence.
Pour les propriétaires de petits barrages, la VTA est très souvent confiée à l'organisme agréé en charge de la rédaction du rapport d'auscultation. Bien que les essais des matériels (vannes et alarmes notamment) soient souvent réalisés pendant la VTA, leur pertinence n'est pas toujours évoquée.
De manière générale, la qualité des comptes rendus de VTA est variable. Ils ne contiennent pas toujours d'éléments ou de photos permettant de vérifier, d'une visite à l'autre, l'absence d'évolution ou de dégradation des matériels.

3.3.2 Les attentes et recommandations

La VTA doit inclure une (ou des) visite(s) de terrain, par des experts (extérieur à l'exploitation courante) qui doit porter sur le génie civil et sur l'ensemble des matériels importants pour la sûreté hydraulique, ce qui inclut les systèmes hydromécaniques et de contrôle-commande.
Dans les faits, la réglementation n'impose pas de réaliser une visite spécifique de terrain par type de matériels. Ainsi, pour les ouvrages non ou peu équipés de matériels de contrôle-commande et hydromécaniques (par exemple du fait de l'absence d'alimentation électrique), une seule visite de terrain peut suffire pour examiner le génie civil et les équipements du barrage. Le contenu de la VTA peut être modulable d'une visite à l'autre si cela est suffisamment argumenté et dans le respect des consignes. De même, il est possible d'adapter la périodicité et la liste des participants à la visite technique approfondie en fonction de la cinétique d'évolution des dégradations observables sur chaque matériel.

La sûreté des installations dépend fortement de l'âge et du bon état d'entretien et de fonctionnement des matériels. Les VTA doivent donc prendre en compte les pathologies propres à leur obsolescence (corrosion, grippage des mécanismes, usure des pièces fixes, contacteurs charbonnés, difficultés de dialogues entre appareils de technologies différentes, dérive de capteurs...) et éventuellement proposer des contrôles ou des essais particuliers afin de caractériser leur fiabilité vis-à-vis des critères actuels de sûreté.
Pour les ouvrages ayant connu une rénovation totale ou partielle de leur système de contrôle-commande et/ou de vantellerie, la VTA doit s'appliquer à vérifier le bon fonctionnement des nouveaux matériels dans leurs environnements plus anciens, au travers de diagnostics visuels et/ou auditifs (frottement, coincement des pièces métalliques entraînant des usures prématurées, qualité des nouveaux joints, dialogues entre matériels de technologies différentes, transmission des alarmes...).

Pour les barrages de classe A ou B, la VTA doit inclure, dans le périmètre des matériels à visiter, les barrières de sécurité identifiées[2] dans l'étude de dangers pour vérifier que le niveau de confiance attribué à une barrière est toujours garanti. En cas de remise en cause du niveau de confiance d'une barrière, la VTA devrait permettre de préconiser des mesures correctives pour ramener ce niveau à celui affiché dans l'EDD.
Elle doit donc indiquer que le fonctionnement des barrières a été vérifié par l'exploitant ou le rédacteur de la VTA et qu'il est satisfaisant (exemple d'essai de barrière devant systématiquement être testé et tracé par l'exploitant :

[2] Certaines barrières n'ont pas été correctement identifiées dans certaines EDD, il faut donc comprendre, dans ce cas, l'ensemble des dispositifs et équipements de sécurité

seuil d'activation d'une poire d'alarme de niveau haut installée en galerie de drainage pour avertir l'exploitant en cas de panne de la pompe d'exhaure. Cette barrière qui n'est pas testée systématiquement par certains exploitants permet pourtant de diminuer le risque de mise en charge de la fondation d'un barrage et donc la rupture potentielle du barrage en cas de perte de confinement d'une conduite d'eau en galerie).

Les VTA doivent également tenir compte des investigations réalisées, indépendamment de celles-ci, par des bureaux d'études spécialisés. En effet, sans prise en compte des résultats des études annexes, l'expert peut être amené à juger du matériel en bon état alors que des comptes rendus signalent des manquements et préconisent des travaux de maintenance à court terme (exemple : cas de vannes jugées en bon état pour lesquelles des pertes d'épaisseurs ont été mesurées et des calculs de tenue des vannes ont mis en évidence la nécessité de prévoir des travaux de maintenance à court terme compte tenu de l'absence de marges et de la cinétique d'évolution des phénomènes observés). De tels oublis pourraient en partie être évités si le chargé de VTA prenait systématiquement connaissance du registre et des rapports de surveillance, qui doivent mentionner toute intervention d'un expert ou d'une entreprise spécialisée in situ.
Dans le cas de matériels expertisés entre deux revues de sûreté pour lesquelles des évolutions auraient été identifiées (évolution de la corrosion par exemple), l'expert en charge de la VTA devrait estimer l'impact des dégradations observées sur la tenue des matériels pour vérifier que le niveau de sûreté affiché dans la revue de sûreté n'est pas remis en cause. En cas d'évolution, l'expert devrait pouvoir recommander des travaux de remise en état des matériels avant la prochaine revue de sûreté et en cas de doutes sérieux proposer la mise en place de mesures d'exploitation plus restrictives dans l'attente de travaux de maintenance.

Enfin, dans le cas de VTA, le compte-rendu est fréquemment transmis au responsable d'ouvrage qui le retransmet au service de contrôle sans en prendre connaissance. D'une manière générale, le propriétaire et l'exploitant doivent s'approprier les comptes rendus de VTA. Ces derniers doivent être suivis d'un plan d'action transmis aux Services de Contrôle et son état d'avancement devrait être présenté lors des inspections périodiques en justifiant les éventuelles recommandations non reprises.

3.4 Les Consignes Ecrites

Pour les matériels hydromécaniques et de contrôle-commande, les consignes doivent a minima comporter : les dispositions relatives aux visites de surveillance programmées, les modalités de réalisation des essais des organes mobiles, les fréquences et les modalités de vérification et de maintenance des instruments et des dispositifs de mesure, les dispositions relatives aux VTA.
Toutes les dispositions prescrites par les consignes écrites doivent être tracées dans le registre du barrage. Cette traçabilité permet notamment de vérifier que ces dernières ont bien été respectées.

3.4.1 La pratique actuelle

Beaucoup de gestionnaires de barrages n'ont pas encore intégré les matériels hydromécaniques et de contrôle-commande dans les consignes de surveillance et dans les registres. Dans la plupart des consignes écrites à ce jour, seuls les essais périodiques de vannes sont décrits. La plupart des autres prescriptions concernent les mesures d'auscultation et les examens visuels des ouvrages du génie civil.

3.4.2 Les attentes et recommandations

La consigne de surveillance doit préciser le périmètre des VTA, à la fois dans le domaine du génie civil, de l'hydromécanique et du contrôle-commande. Ce périmètre doit inclure les matériels importants pour la sûreté hydraulique, ceux contenus dans le périmètre de l'EDD pour les barrages de classe A et B.
La consigne doit définir pour chacun de ces matériels les essais à réaliser pour garantir leur bon fonctionnement (par exemple : essais des groupes électrogènes, essais des poires de sauvegarde, essais de cohérence des mesures de niveaux, essais des liaisons…) en précisant la périodicité associée et les paramètres importants à suivre pour vérifier l'absence de dérive du fonctionnement des organes (par exemple : suivi des temps d'ouverture et/ou de fermeture des vannes par paliers, contrôle de la pression de manœuvre des vérins hydrauliques...). Pour un ouvrage de classe A ou B, la consigne devrait également inclure les barrières de prévention identifiées dans l'EDD pour lesquelles des essais périodiques sont à réaliser pour maintenir leur niveau de confiance.
Enfin, les consignes devraient indiquer avec précision les modalités de comptes rendus des essais et mentionner leurs inscriptions dans le registre.

3.5 Cas des Travaux

Les documents réglementaires transmis par l'exploitant au service de contrôle et/ou approuvés par ce dernier permettent de décrire l'exploitation d'un barrage et sa surveillance en fonctionnement courant et en crue. Lorsque des travaux sur des organes hydromécaniques ou du contrôle-commande sont réalisés, les consignes et l'analyse effectuée dans l'EDD peuvent ne plus être d'actualité. Le dossier à soumettre à l'administration pour la réalisation desdits travaux doit traiter ces deux aspects.

3.5.1 Concernant l'analyse des risques

Le responsable d'ouvrage doit réaliser une analyse spécifique des risques pour vérifier que la configuration mise en place pour les travaux ne remet pas en cause l'analyse réalisée dans l'EDD du barrage. Cette analyse doit permettre d'identifier si des mesures de réduction des risques complémentaires sont à mettre en place dans l'attente du retour à un fonctionnement normal d'exploitation (par exemple : modification du calage de poires de sauvegarde en cas de mise en place d'une restriction d'exploitation par abaissement préventif de la cote d'exploitation normale au-dessous de la RN).
Au travers de cette analyse, l'exploitant doit également vérifier que le niveau de sûreté de l'ouvrage n'est pas remis en cause avec les moyens réels installés sur l'ouvrage (par exemple : vérification de la capacité d'évacuation des crues, de la fiabilité du matériel hydromécanique, du temps de réponse de manœuvre des vannes pour les différents modes d'exploitation de l'ouvrage). De même, il est primordial de s'assurer que la rénovation des matériels plus anciens n'a pas un impact négatif sur la sûreté globale de l'aménagement.

3.5.2 Concernant les consignes écrites

L'analyse de risques réalisée en amont des travaux doit aussi permettre d'identifier leur impact sur les consignes écrites (notamment en cas de condamnation d'organes d'évacuation des crues). Si les travaux conduisent à être en écart par rapport aux consignes approuvées, des consignes provisoires doivent être produites pour définir les actions de surveillance renforcée et les modalités d'exploitation en crue de l'aménagement pendant les travaux.
Par exemple, dans le cas de batardages de vannes pour travaux (notamment pour un ouvrage vanné en rivière), les consignes provisoires décriront les modalités de gestion du barrage en crue, afin de définir un passage éventuel en état de veille un peu plus tôt, ou des manœuvres des vannes non batardées plus fréquentes, etc.
Après les travaux, les consignes écrites devront éventuellement être modifiées pour tenir compte des nouveaux matériels mis en service et soumises au préfet pour approbation.

4. LA PROBLEMATIQUE VANTELLERIE ET CONTROLE COMMANDE DANS LES ETUDES DE DANGERS (EDD)

4.1 La réglementation

L'étude de dangers des barrages (EDD) a été introduite par le décret du 11/12/2007. Elle concerne les ouvrages de classe A ou B. Le contenu en est détaillé dans l'arrêté du 12 juin 2008 [4] définissant « le plan de l'étude de dangers des barrages et des digues et en précisant le contenu » et la circulaire du 31/10/2008 incluant le « guide de lecture des études de dangers des barrages » [12]. Par essence même, ce dernier guide présente en détail les attendus de l'administration en matière d'EDD.
Que ce soit vis-à-vis des fonctions d'évacuation des crues ou de vidange d'urgence du plan d'eau, les vannes et leur dispositif de contrôle-commande font partie des composants du barrage et sont donc concernés par tous les chapitres de l'étude de dangers, de l'analyse fonctionnelle jusqu'aux mesures de réduction des risques.
Il est rappelé que le contrôle-commande est explicitement cité par deux fois dans l'arrêté du 12/06/2008 à propos des tâches élémentaires à réaliser dans le cadre de l'EDD :

- « l'architecture générale du contrôle-commande et les schémas généraux de l'alimentation électrique et des télécommunications » doivent être décrits au titre de l'analyse fonctionnelle (Chapitre 3.1 de l'EDD) ;
- « les événements mettant notamment en cause […], le contrôle-commande, les télécommunications ou l'alimentation électrique » sont à décrire dans l'étude accidentologique (Chapitre 7 de l'EDD).

4.2 Evaluation critique chapitre par chapitre de l'EDD et suggestions

4.2.1 Analyse fonctionnelle de l'ouvrage et de son environnement

Le guide de lecture des EDD [12] précise que l'analyse fonctionnelle de l'ouvrage et de son environnement couvre l'ensemble du système étudié en englobant les ouvrages de sécurité (vannes, évacuateurs de crues, dispositif d'auscultation...). L'analyse fonctionnelle doit permettre de localiser les différents composants cités dans l'analyse des risques et de comprendre les choix technologiques effectués (notamment en ce qui concerne les organes mécaniques complexes ou encore les automates) ou les principes de redondance prévus (par exemple, concernant la mesure de la cote d'un plan d'eau, les chemins de câbles électriques, les systèmes d'étanchéité, l'éclairage du parement ou d'autres composants de l'ouvrage...).

D'une façon générale, la vantellerie est bien décrite et l'est de mieux en mieux dans les études récentes. Il arrive toutefois que la chaîne cinématique de la (des) vanne(s) soit ignorée ou que la description ne porte que sur le dispositif en fonctionnement nominal, ce qui n'est pas satisfaisant du point de vue de la sûreté. En effet, les barrages peuvent connaître pour une période transitoire plus ou moins longue (pendant des travaux), ou de façon périodique dans l'année, un fonctionnement dégradé des organes hydrauliques et de leur contrôle-commande.

Le constat est bien plus mitigé pour le contrôle-commande, qui est encore souvent décrit de façon non satisfaisante. Lorsqu'il n'est pas omis, il est souvent présenté comme une « boîte noire », partiellement décrit, avec peu de pédagogie et parfois peu de lisibilité.

Ce qui est souhaité dans ce chapitre de l'étude de dangers est une analyse claire et simplifiée des éléments ayant un rôle dans la gestion et la sûreté de l'aménagement. Il s'agit donc de retenir le bon niveau de détail permettant de mettre en évidence les différentes sources d'énergie possibles (réseaux électriques, groupe électrogène fixe ou mobile, batterie, actionnement manuel…), les principaux composants d'une chaîne cinématique mobilisée dans la manœuvre d'une vanne (centrale hydraulique, moteur, vérin, treuil et chaînes...) ou ceux impliqués dans une boucle de contrôle-commande (capteurs, unités de traitement, modes de transmissions d'informations et actionneurs…). Cela doit aussi permettre de mettre en évidence: les éventuelles redondances et modes communs de défaillance. Pour le contrôle-commande, cette échelle adaptée d'analyse doit permettre d'identifier l'événement initiateur des défaillances, plutôt qu'un bloc "défaillance du contrôle-commande", et une liste exhaustive des barrières de sécurité qui assurent une fonction de sécurité (mesures de prévention, mesures de limitation ou mesures de protection).

Il est donc demandé la production de schémas fonctionnels décrivant : les installations de contrôle-commande, leurs macro-éléments, leur(s) fonction(s) ainsi que leurs interactions les uns par rapport aux autres (architecture générale du contrôle-commande et schémas généraux de l'alimentation électrique et des télécommunications), leurs vulnérabilités ainsi que leurs robustesses.
Ces composants peuvent intervenir soit comme sources potentielles de défaillances, soit comme outils de maîtrise des risques (barrières de sécurité). Ils constituent le point de départ incontournable d'une analyse exhaustive des modes de défaillances des composants et de l'évaluation des barrières de sécurité identifiées (chapitre 8 de l'EDD).
Enfin, une description de la vantellerie et du contrôle-commande correctement réalisée dans une EDD doit pouvoir servir d'élément de référence pour accompagner les divers livrables réglementaires (consignes, rapports de VTA, rapports de surveillance, Examens Techniques Complets /Revues de Sûreté).

4.2.2 Aléas naturels

Les aléas naturels (gel, foudre, neige, séisme) ou agents extérieurs (embâcles générés par le vent ou les vagues, envasement) pouvant être à l'origine d'une défaillance d'un organe de vantellerie ou du contrôle-commande, ou de difficultés d'accès à l'aménagement sont généralement bien identifiés.
Les difficultés apparaissent au sein de l'analyse des risques de l'EDD dès lors qu'il s'agit de combiner les probabilités d'occurrence d'aléas dont l'indépendance par rapport à celle de la défaillance d'un composant n'est pas clairement établie, comme par exemple la combinaison d'une crue de forte intensité avec le risque d'obstruction d'une vanne par des embâcles.

4.2.3 Etude accidentologique et retour d'expérience

Dans la pratique actuelle, si le retour d'expérience est convenable d'un point de vue génie civil, il n'est pas suffisamment développé pour ce qui concerne les organes de vantellerie (d'évacuation et/ou de vidange), le contrôle-commande, les télécommunications ou l'alimentation électrique.
Les anomalies et désordres rencontrés sur ces dispositifs sont généralement relatés à un niveau trop macroscopique (par exemple : la panne du boîtier de contrôle-commande, le dysfonctionnement d'une vanne) sans systématiquement procéder à la caractérisation de la nature de la défaillance, à l'identification des composants impliqués ou à l'examen des modes de maintenance et de surveillance dans la cause de cette défaillance. Il est en est de même pour la présentation des mesures d'amélioration (voire de maintien) que leur analyse a conduit à mettre en œuvre.

Toutefois, bien que ce ne soit pas commun à l'ensemble des études de dangers, on retrouve fréquemment dans les rapports une liste des manœuvres d'exploitation, des essais des vannes, des désordres rencontrés sur les vannes liés aux facteurs d'agression naturels (par exemple : état de corrosion) ou à des aléas extérieurs (par exemple : blocage ou obstruction de la vanne par embâcles, gel…) et des opérations de maintenance.
La revue de l'accidentologie à l'échelle nationale et mondiale se limite très souvent en l'exposition de données statistiques générales (par exemple : le pourcentage de ruptures de barrages dues à la non-ouverture d'un évacuateur vanné) sans présenter des exemples de cas d'études concrets et pertinents avec le contexte de l'ouvrage.

Par conséquent, le retour d'expérience local et international gagnerait à être davantage fourni sur les volets du contrôle-commande et de la vantellerie. La connaissance des défauts génériques et accidents survenus sur l'ouvrage ou sur d'autres barrages[3] est un préalable à l'identification des scénarii d'accidents dans l'analyse de risques et peut constituer une aide à l'estimation du classement de leur occurrence. Cela permet également de caractériser les mesures d'améliorations et les barrières de sécurité qui peuvent être adoptées par le responsable de l'ouvrage pour réduire la probabilité que ces événements se produisent (ou se reproduisent). Il est attendu que la base de données nationale ARIA et la constitution prochaine d'un groupe de travail sur l'accidentologie du parc de barrages français viennent favoriser le recueil de ces données.

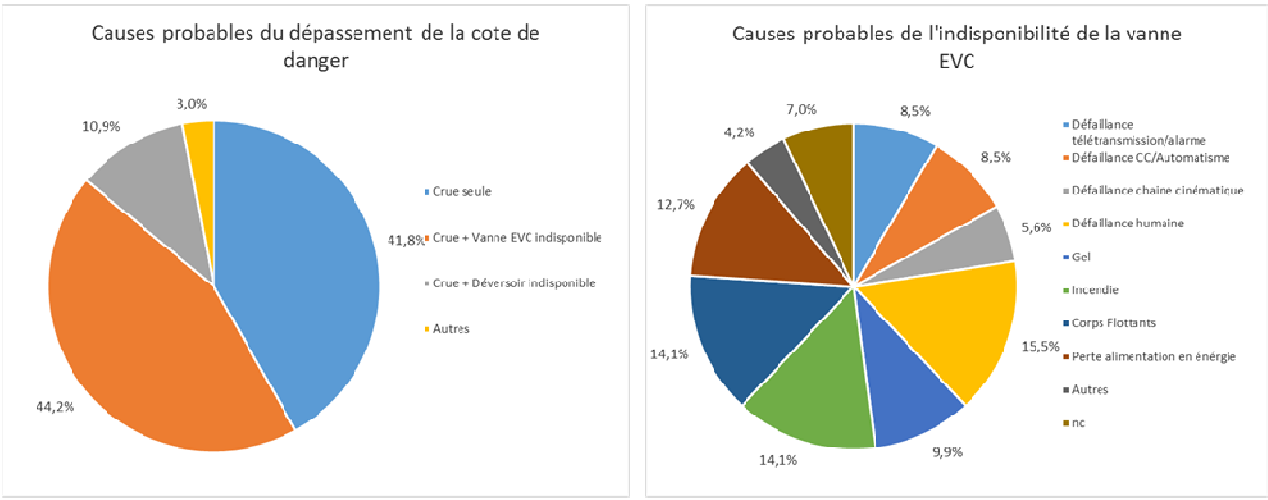
4.2.3 Analyse de risques

L'identification des scénarii de non-ouverture des organes hydrauliques vannés (par exemple : blocage total ou partiel d'une vanne induit par une panne du dispositif de contrôle-commande, par le blocage de la chaîne cinématique ou par le gel), d'ouverture intempestive ou impromptue (par exemple : causée par un défaut technique du contrôle-commande, une erreur de manipulation humaine…) ou de rupture (par exemple : par une mise en charge hydraulique trop importante, par chocs de corps flottants) est désormais plutôt exhaustive et en cohérence avec les risques de libération des potentiels de dangers, identifiés préalablement au chapitre 5 de l'EDD. Toutefois, les études de dangers omettent fréquemment de pointer : (i) la problématique de « gestion du risque en exploitation courante » faisant intervenir la vantellerie et le contrôle-commande, à l'exemple de la catastrophe du Drac ; (ii) l'événement de « mauvaise gestion de la crue »[4] comme événement initiateur d'une « capacité d'évacuation réduite », elle-même potentiellement initiatrice d'une « surverse du barrage au-delà de sa cote de danger », conduisant à la « rupture totale » ; (iii) la situation de « maintenance » ou d' « indisponibilité prolongée » à l'occasion de travaux.

Une base de données est en cours de constitution sur les résultats des Etudes de Dangers. Les diagrammes circulaires, présentés ci-dessous, viennent illustrer : la part que représentent les défaillances d'évacuateurs de crues vannés parmi les causes probables de rupture de barrage par dépassement de la cote de danger (à gauche) ; la part des différents événements (sur le chemin critique) qui viendraient initier l'indisponibilité des évacuateurs de crues vannés (à droite).

[3] Par exemple, référence aux communications de l'ICOLD/CIGB et de la base de données nationale ARIA qui intègre les EISH/PSH déclarés sur les ouvrages hydrauliques [6] [9].

[4] Par exemple : la non-ouverture ou non-ouverture à temps de la vanne de l'évacuateur de crues en cas de mauvaise compréhension ou application des consignes, voire d'ordres contradictoires ou inappropriés, etc.



Graphique 1 : Causes probables du dépassement de la cote de danger sur un ouvrage (à gauche) et causes probables de l'indisponibilité de(s) vanne(s) de l'évacuateur de crues (à droite). Statistiques faites sur 192 EDD d'ouvrages.

Conséquence directe d'une analyse fonctionnelle insuffisamment détaillée, le niveau de développement déployé dans la modélisation des scénarii est souvent trop macroscopique. Les organes de vantellerie et leurs dispositifs de contrôle-commande sont généralement considérés comme des « boîtes noires » dans le tableau d'analyse des modes de défaillances, sans détailler la structure ni le dysfonctionnement de leurs composants propres. Par conséquent, dans une logique d'amélioration de cet aspect méthodologique, il est important que le groupe de travail multidisciplinaire chargé de la réalisation de l'analyse de risques s'associe avec des spécialistes du contrôle-commande et de la vantellerie pour affiner le niveau de l'analyse de risques. La retranscription d'une analyse de risques simplifiée, sous le format de graphes de défaillances – distincts pour les dispositifs de vantellerie et de contrôle-commande – permettrait de visualiser les liaisons entre les macro-éléments (vannes, chaîne cinématique…) et d'identifier le ou les composants qui participent à la fois à la chaîne de défaillances mais également comme barrières de sécurité.

A dire d'expert, l'estimation de la probabilité de réalisation de ces scénarii de défaillances reste relativement prudente (supérieure ou égale à une occurrence de 1 pour 1 000), mais ne semble pas suffisamment argumentée dans de nombreux cas sur la base (i) du retour d'expérience local de l'exploitant et/ou international, (ii) de la connaissance industrielle pour ce qui concerne le niveau de fiabilité des pièces mécaniques et des composants électroniques et enfin (iii) des sources de défaillances humaines traduites dans les consignes écrites de surveillance et d'exploitation.
Si les conséquences de la rupture totale d'un barrage sont bien estimées sur la base d'une étude d'onde de rupture, ce n'est pas systématiquement le cas pour les scénarios de libération du potentiel de dangers sur les organes hydrauliques vannés. Or, la rupture ou l'ouverture d'un ou plusieurs organes vannés peut générer un débit dépassant celui de la crue naturelle la plus intense connue en aval du barrage. De manière générale, dans les rapports d'Etudes de Dangers, le niveau de gravité est estimé de manière arbitraire et des scénarii sont parfois éliminés sans argumentation valable et sans modélisation de la propagation du lâcher d'eau suite à une défaillance liée à un organe hydromécanique.

5. LA PROBLEMATIQUE VANTELLERIE ET CONTROLE COMMANDE DANS LES EXAMENS TECHNIQUES COMPLETS (ETC)

5.1 La réglementation

L'Examen Technique Complet, décrit dans l'Article 7-II de l'arrêté du 29/02/2008 [3], dans la circulaire interministérielle du 08/07/2008 et dans le cahier des charges des concessions Art 20-III, est à la charge du responsable d'ouvrage. Il concerne les barrages de classe A et consiste en une visite exhaustive de l'ouvrage, comprenant les parties habituellement noyées, difficilement accessibles ou observables sans moyens spéciaux. Le diagnostic concerne en particulier le parement amont et les organes hydromécaniques.
Ce document est requis pour la rédaction de la revue de sûreté car il constitue l'une des données d'entrée incontournable. Accompagné des VTA de l'année de réalisation de l'examen, il doit permettre d'aboutir à une vision complète, objective et factuelle de l'état de l'ouvrage et de ses organes de sécurité.

5.2 La pratique actuelle

Cet examen est réalisé soit à l'occasion d'une vidange (partielle ou complète) soit de plus en plus souvent par des inspections subaquatiques (fréquemment par des robots équipés de caméras) pour diverses considérations (environnementales ou économiques par exemple), donc sans vidange. Ayant pour premier objectif l'inspection du parement amont des ouvrages, il est trop souvent réduit à cet aspect. Encore trop de rapports fournis à l'administration ne traitent que cette problématique et laissent de côté le diagnostic de tous les dispositifs difficilement accessibles ou observables de façon courante. Les organes de vantellerie sont concernés par l'ETC. La vidange ou l'inspection subaquatique doivent donc être mises à profit pour faire le bilan des parties amont des vannes ou clapets de crues et des vannes de fond. En général, l'inspection de ces organes, quand elle a lieu, se fait sur la partie aval et seulement si aucun défaut d'étanchéité n'est identifié (une fuite pouvant gêner l'inspection).
L'inspection visuelle des vannes est une première étape dans la caractérisation de l'état mécanique des matériels. Toutefois, la seule évaluation visuelle de l'état de la vanne est limitée et ne suffit pas pour se prononcer sur son état mécanique réel. Il est donc important d'y effectuer des examens plus poussés, comme par exemple des mesures d'épaisseurs, un contrôle de l'étanchéité, des contrôles des protections anticorrosion… Cette pratique, de plus en plus répandue, est à encourager. De plus, leurs chaînes cinématiques doivent faire également partie du périmètre de l'examen[5]. Dans bon nombre de rapports d'Examen Technique Complet, cet aspect est tout simplement occulté. Pourtant, il faut profiter de ce moment dans la vie de l'ouvrage et des moyens spéciaux disponibles à cette occasion pour effectuer les vérifications nécessaires sur ces éléments. Ces vérifications concernent en particulier le contrôle des brimbales, des vérins, des flotteurs et des différentes chaînes et câbles. Très souvent occultés, ces contrôles méritent d'être effectués et retranscrits dans le rapport d'ETC.
La problématique du contrôle-commande n'est jamais évoquée dans ce livrable. De prime abord, cela peut s'expliquer par le fait que le sujet est plus logiquement développé à l'occasion des VTA. Or, le sujet n'y est pourtant pas toujours correctement traité (cf. § 3). Un contrôle exhaustif d'une armoire électrique, d'un automate, un capteur immergé, etc. peut nécessiter des moyens (ou des procédures) spéciaux d'observation ou de diagnostic, et donc doivent relever de l'ETC. Des examens thermographiques dans les armoires de puissance ou de commande peuvent être réalisés à l'occasion de certains ETC, voire de VTA. Cette pratique, particulièrement efficiente pour les armoires de puissance, est à encourager.

5.3 Les attentes et recommandations

L'Examen Technique Complet ne doit pas être uniquement GC-centré car le matériel hydromécanique fait clairement partie du périmètre de l'ETC. Cet examen doit effectuer une expertise de toutes les vannes (contrôle visuel, contrôle de sa structure par des mesures d'épaisseur, contrôle de son étanchéité, contrôle de la protection anticorrosion) sans oublier leurs chaînes cinématiques. L'ETC (notamment en cas de vidange) est l'occasion d'effectuer des manœuvres des vannes sur toute leurs courses (à blanc) est ainsi de vérifier non seulement la fonctionnalité de la chaine cinématique mais également des différents capteurs (fin de course…). Une analyse plus approfondie du contrôle-commande mérite également d'être effectuée au moment de l'ETC (thermographie, vérification du câblage, contrôle des capteurs). Bien qu'il puisse s'agir d'actions régulièrement effectuées par les gestionnaires, il convient de mieux les tracer et de les porter à connaissance de l'administration. Il est à noter que certains de ces examens peuvent être réalisés à l'occasion des VTA. Avec ces dernières, l'Examen Technique Complet permet de fournir à l'administration, mais aussi au responsable de l'ouvrage, une vision complète de l'état du barrage et de ses équipements. Cet ensemble constitue une des données d'entrée essentielles de la Revue de Sûreté, qui en fait l'analyse et la synthèse.

6. LA PROBLEMATIQUE VANTELLERIE ET CONTROLE COMMANDE DANS LES REVUES DE SURETE

6.1 La réglementation

La revue de sûreté est définie dans l'arrêté du 29/02/2008 à l'article 7-I [3] et dans le cahier des charges des concessions Art 20-III. Elle consiste, pour le propriétaire ou le concessionnaire, à dresser un constat du niveau de sûreté du barrage en intégrant l'ensemble des données de surveillance accumulées pendant la vie de l'ouvrage mais aussi la synthèse des études spécifiques qui ont pu être réalisées. Elle tient compte de l'état du barrage, de son comportement, de son dimensionnement et des organes de sécurité associés (évacuateurs, vidanges…), des

[5] Ou lors des Visites Techniques Approfondies si elles sont facilement accessibles ou observables

modalités de surveillance mises en place ainsi que des résultats de l'EDD. En comparaison à la réglementation sur les Etudes de Dangers, celle sur les revues de sûreté est peu détaillée.

6.2 La pratique actuelle

Du fait d'une réglementation moins explicite, l'administration constate une plus grande hétérogénéité des dossiers de revues de sûreté par rapport aux Etudes De Dangers reçues. Certaines études comportent de nombreuses lacunes. Dans ces dernières, le contrôle-commande et le matériel hydromécanique sont les thématiques qui en souffrent le plus.
La vantellerie et le contrôle-commande doivent faire l'objet d'un bilan d'état et de fonctionnement approfondi dans le cadre des rapports de revue de sûreté, ce qui n'est pas souvent le cas. Le fonctionnement/comportement de ces matériels en exploitation courante comme lors d'épisodes extrêmes, les tests de fonctionnement, les incidents rencontrés et les corrections apportées, les travaux importants comme la maintenance et l'entretien courant ne sont que trop peu évoqués dans ce livrable. Comme indiqué précédemment, les résultats des VTA et de l'ETC sont les données d'entrée pour la revue de sûreté, qui est donc fortement dépendante de la qualité de ces documents. Sans surprise, un travail exhaustif réalisé lors de l'ETC permet en général aux revues de sûreté d'exposer clairement le bilan d'état de ces matériels. Une autre donnée d'entrée est l'historique des équipements depuis leur conception et construction. Il est très régulièrement constaté l'absence de notes de calculs, en particulier pour les organes hydromécaniques. Si des mesures d'épaisseurs ont été réalisées, ces mesures permettent de faire une estimation rapide de la reprise des contraintes de pression par la vanne et/ou par la conduite. Répercutant les lacunes des examens techniques complets, la chaîne cinématique est souvent éludée de l'exercice, tout comme le contrôle-commande. L'analyse de ce dernier est même totalement inexistante dans certains dossiers.

Le but final de la revue de sûreté est de démontrer et de se prononcer sur le niveau de sûreté de l'ouvrage et de ses équipements. La faiblesse des développements sur les sujets des matériels hydromécaniques et, de manière encore plus marquée, sur les matériels de contrôle-commande ne permet pas à certains maîtres d'ouvrage d'en faire la démonstration.
Il a également été constaté des appréciations différentes sur le niveau de sûreté et les mesures de maîtrise des risques à mettre en œuvre issues des études de dangers et des revues de sûreté réalisées sur un même ouvrage, qu'elles aient été rédigées ou non par le même bureau d'études.

6.3 Les attentes et recommandations

D'une manière générale, l'administration regrette l'absence fréquente d'éléments sur le niveau de sécurité des matériels hydromécaniques et de contrôle-commande dans les rapports de revue de sûreté. Cet exercice est intégrateur des autres livrables réglementaires, ainsi, une lacune dans une donnée d'entrée pénalise l'analyse qui en est faite par la suite. L'administration attend donc que ces sujets soient mieux développés dans ces livrables.
Pour les organes hydromécaniques, les pistes d'améliorations sont à trouver dans une meilleure analyse de la conception, de la réalisation de l'organe, de sa maintenance (opérations qui ont permis de maintenir l'organe en état) et de son fonctionnement (actions de surveillance, essais, incidents). Cela permettra une estimation plus objective et exhaustive du niveau de sûreté des organes hydromécaniques.
L'analyse du contrôle-commande pourrait être développée, comme cela a pu être effectué dans certains dossiers selon cinq axes : (i) matériels de prise de l'information ; (ii) matériels de transmission de l'information ; (iii) matériels d'analyse de l'information ; (iv) alimentations ; (v) l'action en réponse. Pour chaque item, il conviendrait de définir leur fonction, l'information en entrée et en sortie de chaque matériel (Input/Output), les modes communs, leurs emplacements, le contrôle de ces dispositifs, la maintenance et les incidents. Une analyse des modes d'organisation de l'exploitant est également être nécessaire : le niveau de sûreté final est également le résultat de la capacité de l'exploitant à maitriser les défaillances survenant sur ses équipements.
La revue de sûreté reprend les analyses de l'Etude de Dangers, en particulier l'identification des barrières de sécurité qui font intervenir dans la majorité des cas des matériels de contrôle-commande et de vantellerie. Sur la base du bilan d'état et de fonctionnement réalisé lors de la revue de sûreté, il est attendu un avis explicite sur le niveau de confiance de ces barrières identifiées dans l'EDD. De même, comme pour les études de dangers, il est attendu que les responsables d'ouvrages se prononcent sur les plans d'actions recommandés par leurs bureaux d'études.

7. CONCLUSIONS

Les thématiques de contrôle-commande et de vantellerie sont désormais au cœur des réflexions sur la sûreté hydraulique. Les différents accidents et incidents ont fait prendre conscience à la communauté professionnelle et aux pouvoirs publics de l'intérêt d'améliorer la maîtrise des risques dans ces domaines. La réglementation de 2007 a permis de donner un cadre à ces sujets au travers des différents livrables réglementaires décrits dans cet article. Cette communication permet de faire un premier point d'étape sur la prise en compte de ces problématiques par la réglementation.

Moins bien formalisés que dans le domaine du génie civil, des efforts sont encore nécessaires pour la prise en compte des matériels hydromécaniques et de contrôle-commande dans l'estimation du niveau de sureté de chaque aménagement. Néanmoins, l'administration a pu constater une progression dans la prise en compte de ces sujets depuis fin 2007 et encourage au travers de cet article les responsables d'ouvrages, les gestionnaires et les bureaux d'études à persévérer dans le cadre d'une démarche d'amélioration continue de la maîtrise et de la réduction des risques sur ces matériels.

Cet article met aussi en avant la complémentarité des livrables réglementaires aux échéances et aux objectifs différents. Au final, la bonne réalisation de chacun d'entre eux permet aux responsables d'ouvrages de démontrer à l'administration (et donc à la société) que les risques générés par l'exploitation de leurs ouvrages sont correctement maîtrisés. Le tout récent décret du 12 mai 2015 [13] modifie le contenu du livrable « Etudes de Dangers » qui regroupera un bilan d'état de l'ouvrage (i.e. revue de sûreté au sens de cet article) et une analyse de risques (équivalent de l'Étude de Dangers au sens de cet article). Cette modification ne remet pas en cause la logique de la réglementation de 2007 mais demandera de fait un travail plus approfondi sur les ouvrages de classe B.

RÉFÉRENCES ET CITATIONS

[1] Décret 2007-1735 du 11/12/2007 relatif à la sécurité des ouvrages hydrauliques et au comité technique permanent des barrages et des ouvrages hydrauliques et modifiant le code de l'environnement

[2] Décret 2008-1009 du 26/09/2008 modifiant le décret 94-894 du 13 octobre 1994 modifié relatif à la concession et à la déclaration d'utilité publique des ouvrages utilisant l'énergie hydraulique et le décret no99-872 du 11 octobre 1999 approuvant le cahier des charges type des entreprises hydrauliques concédées

[3] Arrêté du 29/02/2008 fixant des prescriptions relatives à la sécurité et à la sûreté des ouvrages hydrauliques

[4] Arrêté du 12/06/ 2008 définissant le plan de l'étude de dangers des barrages et des digues en précisant le contenu

[5] Arrêté du 16/06/2009 modifiant l'arrêté du 29 février 2008 fixant des prescriptions relatives à la sécurité et à la sûreté des ouvrages hydrauliques

[6] Arrêté du 21/05/2010 définissant l'échelle de gravité des événements ou évolutions concernant un barrage ou une digue ou leur exploitation et mettant en cause ou étant susceptibles de mettre en cause la sécurité des personnes ou des biens et précisant les modalités de leur déclaration

[7] BETCGB (2002). *Contrôle des barrages en exploitation - Guide BETCGB*

[8] Brandon. E (2009). *Retour d'expérience tiré de la lecture critique des premières études de dangers (EDD) de barrages en France*. Colloque CFBR-AFEID: «Sécurité des barrages et nouvelle réglementation française : Partage des méthodes et expériences», 9 Novembre 2010, Lyon

[9] Gastaud. G & Gauthier. AL (2015). *Enseignements tirés des événements importants pour la sûreté hydraulique (EISH) et éléments de retour d'expérience sur les organes hydromécaniques et de contrôle-commande des barrages*. Colloque CFBR "Vantellerie, contrôle-commande, télécom et alimentations électriques pour des barrages plus sûrs", 2-3 Décembre 2015, Chambéry

[10] Perez. M & Degoutte. G (2009). *Retour d'expérience des premières revues de sûreté*. Colloque CFBR-AFEID «Sécurité des barrages et nouvelle réglementation française : Partage des méthodes et expériences», 9 novembre 2010, Lyon

[11] BETCGB (2011). *Fiches « Référentiels Techniques »*

[12] Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie (2012). *Guide de lecture des Etudes de Dangers de Barrages*

[13] Décret 2015-526 du 12 mai 2015 relatif aux règles applicables aux ouvrages construits ou aménagés en vue de prévenir les inondations et aux règles de sûreté des ouvrages hydrauliques

ANALYSE DES RISQUES LIES AUX SYSTEMES DE CONTROLE COMMANDE - RETOUR D'EXPERIENCE DES EDD ET RS REALISEES SUR LES BARRAGES D'EDF

Benoît DELPRAT, Pascal BORONAT
EDF-DPIH-CIH Savoie Technolac 73373 Le Bourget du Lac
Téléphone : +00 (04) 79 60 60 60
benoit.delprat@edf.fr, pascal.boronat@edf.fr

MOTS CLÉS

EDD, RS, REX

RÉSUMÉ

L'article présente l'approche méthodologique d'EDF pour les Etudes De Dangers (EDD) et Revues de Sûreté (RS) dans le domaine du contrôle-commande. Les principaux apports de ces exercices réglementaires pour la sûreté des ouvrages sont évoqués, au travers notamment d'une analyse des mesures de maîtrises des risques liés aux systèmes de contrôle-commande issues des EDD et RS. Un bilan statistique (occurrence/gravité) des risques d'ouverture intempestive de vannes est également présenté. Ce bilan a été réalisé à l'échelle des 240 barrages d'EDF ayant fait l'objet d'une EDD entre 2008 et 2014.

CONTEXTE

La réglementation sur la sécurité des ouvrages hydrauliques (barrages et digues) a connu une évolution significative entre 2006 et 2008, au travers de :

- la loi du 30 décembre 2006 sur l'eau et les milieux aquatiques
- le décret du 11 décembre 2007 relatif à la sécurité des ouvrages hydrauliques
- l'arrêté du 12 juin 2008, définissant le plan et le contenu des Etudes De Dangers (EDD) des barrages et des digues.

Dans ce cadre réglementaire, le propriétaire, l'exploitant ou, pour un ouvrage concédé, le concessionnaire d'un barrage réalise une Etude De Dangers (ouvrages de classe A et B) et une Revue de Sûreté (ouvrages de classe A uniquement).

L'EDD est une analyse des risques auxquels les barrages peuvent exposer les biens et les personnes. Elle explicite les niveaux des risques pris en compte, détaille les mesures aptes à les réduire et en précise les niveaux résiduels une fois mises en œuvre les mesures précitées. Elle prend notamment en considération les risques intrinsèques (liés à la conception, au dimensionnement, à l'état et au comportement des ouvrages), et l'effet des aléas naturels (crue, séisme, glissement de terrain, chutes de blocs, avalanche,…), ainsi que les conséquences d'une rupture des ouvrages.

Cette réglementation marque une évolution significative, en inscrivant dans la loi l'obligation de réaliser une analyses des risques majeurs pour les barrages, avec comme corollaire une approche plus fonctionnelle et multi-métiers de la sécurité d'un barrage.

INTRODUCTION

Après quelques rappels sur la méthodologie développée par EDF pour la réalisation de ses Etudes De Dangers, et sur la complémentarité entre EDD et RS, l'article dresse un bilan/retour d'expérience à l'échelle du parc de barrages exploités par EDF en France[1] pour le Métier CC. En premier lieu, figure un focus sur les risques d'ouverture intempestive étudiés dans les EDD (pour lesquels les fonctions de CC sont souvent concernées), puis un bilan des mesures de maîtrises des risques issues des EDD et RS.

[1] Y compris les DOM (2 ouvrages)

1 METHODOLOGIE EDF

EDF a réalisé entre 2008 et 2014 les Etudes De Dangers de ses 240 ouvrages de classe A et B. Pour ce faire, la réglementation n'étant pas prescriptive sur ce point, l'ingénierie agréée d'EDF a mis au point une méthodologie de réalisation des EDD. Celle-ci a été construite avec des bureaux d'études possédant une compétence en analyses de risques dans le monde des ICPE[2]. Cette construction s'est faite progressivement, en tirant parti du REX des études produites au fil des 7 années correspondant à la première génération des EDD (février 2008 => décembre 2014).

1.1 Complémentarité EDD-RS

L'arsenal réglementaire visant à mieux garantir la sécurité des barrages a été complété dans les textes précités essentiellement au travers des Visites Techniques Approfondies (VTA), et du tryptique « EDD-ETC-RS ». Les VTA complètent les anciennes pratiques (« visites C2 », très orientées Génie-Civil) par un regard de spécialistes des métiers du contrôle-commande et de l'hydromécanique. L'Examen Technique Complet, lui, correspond aux anciennes visites décennales : il est destiné à examiner (en conservant une périodicité de 10 ans) les parties de l'ouvrage habituellement noyées ou difficilement accessibles. Il est suivi chronologiquement par une Revue de Sûreté : diagnostic complet de l'état de l'ouvrage, de sa conception et de son comportement dans 4 domaines métier : auscultation, hydro-mécanique, génie-civil et contrôle-commande. La Revue de Sûreté apporte un regard complémentaire à celui de l'analyse de risques. Elle sera désormais réalisée avant l'EDD, pour les barrages de classe A et B[3]. **L'ensemble EDD-RS (incluant l'ETC) constitue un levier d'amélioration de la sûreté des ouvrages avec une vision de long terme (réalisation périodique tous les 10 ou 15 ans).**

1.2 Principes Méthodologiques EDD

Des choix fondateurs ont été faits par la Division Hydraulique d'EDF pour la réalisation de ses Etudes De Dangers :

Une approche qualitative
L'évaluation de la probabilité d'occurrence d'un risque peut se pratiquer de 3 façons : qualitative, semi-quantitative, et quantitative (cf. arrêté ICPE du 29/09/2005). La diversité technique des ouvrages et installations (absence de véritables paliers techniques) a conduit EDF à un choix d'humilité, en privilégiant une approche qualitative des risques, qui revient à classer chaque risque dans une classe d'occurrence définie qualitativement : chaque risque (ou « Evénement Redouté Central » (ERC) en langage EDD) est caractérisé par un des qualificatifs suivants, correspondant aux 5 classes d'occurrence définies par cet arrêté ICPE: risque « courant », « probable », « improbable », « très improbable » ou « extrêmement peu probable ». Des points de repère quantitatifs existent, certes, pour délimiter les classes, mais **ce que l'on recherche est une appréciation fonctionnelle globale des risques plus qu'une probabilité de défaillance des composants de l'ouvrage.**

Une approche fonctionnelle macroscopique
Le paragraphe 3 de l'arrêté de 2008 (« Analyse fonctionnelle de l'ouvrage et de son environnement ») se décline par un sous-paragraphe qui précise l'objectif et donne une idée du grain de la description fonctionnelle (§ 3.1 : « Description de l'ouvrage ») : « Le niveau de description apporté aux descriptions […] doit permettre d'identifier l'ensemble des composants de l'ouvrage qui sont pris en compte dans l'analyse de risques.»

EDF a fait le choix d'une approche fonctionnelle macroscopique :

- Les fonctions de sécurité retenues sont les 3 fonctions régaliennes d'un barrage : « Retenir l'eau », « Maîtriser les débits relâchés à l'aval », « Maîtriser la cote de la retenue »
- Le grain de la description fonctionnelle est celui des unités maintenables (ex : la chaîne cinématique, le dispositif de mesure de niveau,…). Pour autant, un des objectifs de l'EDD reste, au travers du regard porté par les spécialistes Métier, d'**identifier les points faibles** de ces unités fonctionnelles.

[2] Installation Classée Pour l'Environnement : installation dont l'exploitation présente des risques pour l'environnement (usines, carrières…)
[3] Nouveauté introduite par le décret relatif à la sûreté des ouvrages hydrauliques du 12 mai 2015. L'ensemble RS-ETC est désormais repris avec l'appellation « diagnostic exhaustif ».

Un partage approfondi entre le Responsable de l'Ouvrage et l'Ingénierie Agréée

L'arrêté de 2008 stipule que le Responsable d'Ouvrage (RO) doit s'approprier l'Etude De Dangers, et s'engager sur une démarche de réduction des risques, en précisant les échéances associées. Ce plan de maîtrise des risques n'est donc pas décidé par l'ingénierie agréée en charge de la réalisation de l'étude : le CIH, bien que signataire de l'étude, n'est donc « que » force de proposition dans ce domaine.

Des dispositions organisationnelles ont été mises en place afin d'assurer un niveau de partage approfondi entre l'Organisme Agréé et le Responsable de l'Ouvrage (et son Exploitant) :

- participation du RO et de l'Exploitant à toutes les réunions du groupe de Travail constitué pour chaque EDD
- tenue systématique d'une réunion de présentation de l'EDD au RO en fin de processus, afin de valider le plan de réduction des risques, en présence de l'échelon managérial et décisionnaire du RO[4]

1.3 Méthodologie EDD Pour Le Métier Contrôle-Commande[5]

1.3.1 Rappel des phases d'une EDD

Un groupe de travail est constitué pour chaque EDD avec 3 spécialistes des métiers de l'ingénierie (Génie Civil, Mécanique et CC), des représentants du métier « Exploitation » (cadre et/ou technicien d'exploitation) et du Responsable d'Ouvrage… sans oublier le pilote de l'étude, qui rédige le document et anime le groupe de travail. Les principales phases d'une EDD sont les suivantes :

1) Etat des lieux de l'existant :

Cet état des lieux est réalisé sur la base de la visite de site et de la collecte des données d'entrée réalisée en amont, et se traduit par la rédaction des chapitres descriptifs de l'EDD (chapitre 1 à 7).

2) Analyse Préliminaire des Risques (APR) :

L'ensemble des risques de l'ouvrage est examiné, à partir d'une liste type la plus exhaustive possible, par le groupe de travail afin de déterminer ceux qui feront l'objet d'un ERC et seront ainsi étudiés en détails dans la phase ADR.

3) Analyse Détaillée des Risques (ADR) :

Cette étape consiste à préciser, lors de réunions plénières du groupe de travail, les scénarii de défaillance pour chaque ERC, et à les représenter sous forme de « nœuds papillons ». Les cotations des EI (Evénements Initiateurs) et des ERC (Evénements Redoutés Centraux) ainsi que des barrières sont définies, puis validées au travers d'une réunion dite de convergence. L'ADR constitue le chapitre 8 de l'EDD.

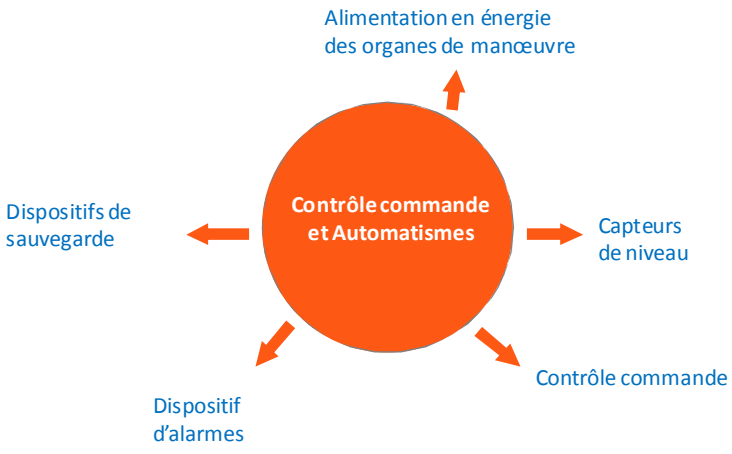
4) Finalisation de l'EDD

L'EDD rédigée est vérifiée par chacun des participants. Le cas échéant, des recommandations sont émises par le Groupe de Travail, en fonction de l'occurrence et de la gravité des risques. In fine, c'est le Responsable de l'Ouvrage qui s'engage sur la réalisation de tout ou partie de ces recommandations, en validant le chapitre 9 de l'EDD.

L'EDD reste approuvée par l'ingénierie agréée (EDF-CIH), après avis d'un Comité de Validation des EDD.

1.3.2 Périmètre fonctionnel du contrôle-commande et risques associés

Les éléments étudiés dans le cadre d'une EDD de barrage en matière de CC sont schématisés ci-après :



[4] L'Unité de Production (UP) chez EDF.
[5] Le Contrôle-Commande inclut les fonctions télécom et alimentation en énergie.

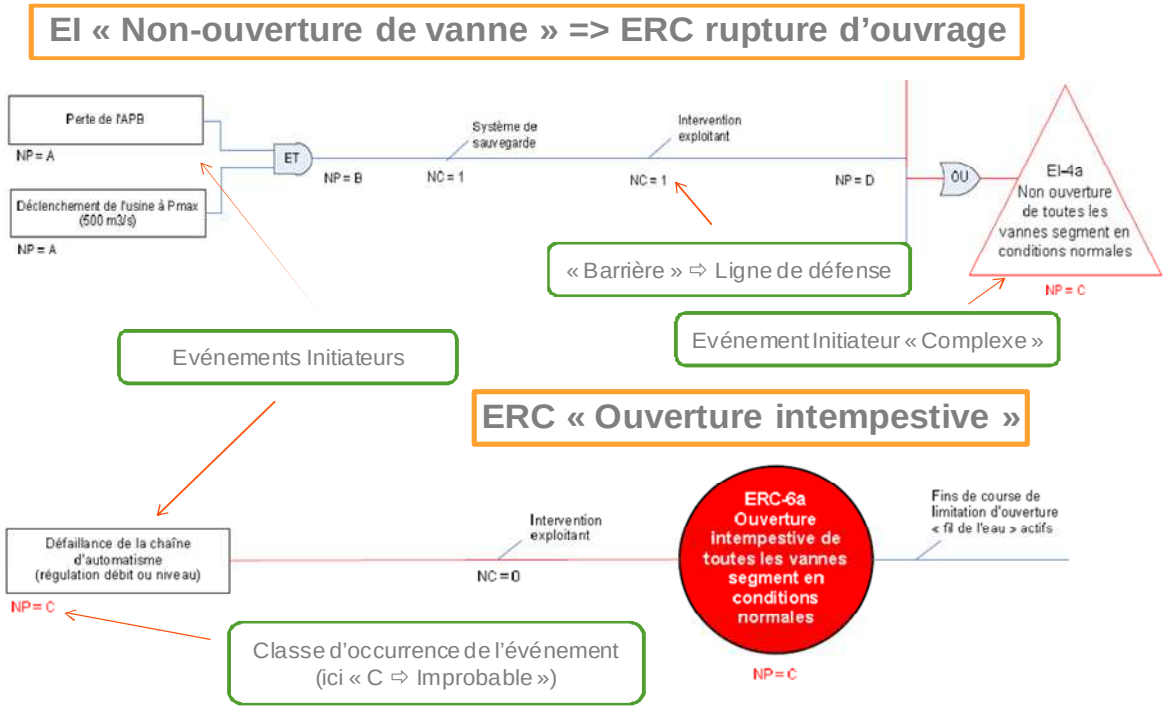
L'analyse est réalisée au travers d'une approche fonctionnelle.
Les risques concernant le contrôle-commande se retrouvent au niveau des Evénements Initiateurs (EI) dits « complexes » (EI comportant plusieurs initiateurs) suivants :

- Non ouverture d'une vanne (défauts spécifiques) :
  - Défaillance contrôle commande
- Non ouverture de toutes les vannes (défauts généraux, modes communs) :
  - Défaut d'information sur l'état de crue,
  - Perte de l'énergie électrique,
  - …
- Fermeture intempestive d'une vanne de l'évacuateur de crue,
  - Défaillance contrôle commande de la vanne,
  - Défaut automate barrage

Ces EI interviennent dans l'ERC « Rupture barrage ».
D'autres EI agissent directement au niveau d'ERC tels que l'ERC « ouverture intempestive d'une vanne EVC », induisant un risque lié à une variation de débit dans le tronçon court-circuité :

  - Défaut contrôle commande de la vanne,
  - Défaillance automate…
  - …

Des exemples d'EI et d'ERC « contrôle commande » sont donnés dans la figure suivante :



1.3.3 Cotation des risques et des barrières

La classe d'occurrence des EI et le niveau de confiance des barrières sont évalués par le spécialiste métier (ici CC).
Le contributeur métier s'appuie sur un guide de cotation et sur son expertise pour faire son évaluation d'occurrence des risques.

Le niveau de confiance accordé à une barrière dépend de sa fiabilité ; il permet de « décoter » l'occurrence d'un risque d'une ou de 2 classes :

- NC = 0 si la barrière est jugée insuffisamment fiable,
- NC = 1 si la barrière est jugée fiable (au moins 9 fois sur 10),
- NC = 2 si la barrière est jugée très fiable (de l'ordre de 99 fois sur 100).

1.4 Diagnostic Contrôle Commande Dans Les RS

Le diagnostic CC vient alimenter, au même titre que les 3 autres pièces métier (Auscultation, GC, Hydromécanique), la note de synthèse de la RS. L'ensemble de ces 5 documents constitue la Revue de Sûreté.

Ce diagnostic s'effectue sur le même périmètre que celui de l'EDD, avec toutefois un regard plus précis. Il concerne pour le métier CC les équipements suivants :

- les alimentations (en alternatif et continu),
- le contrôle commande des vannes d'évacuation des crues et de la vanne de fond,
- le contrôle commande du barrage et dispositifs de sauvegarde,
- les dispositifs de mesure de niveau du barrage,
- les équipements de télétransmission et d'alarme.

Les dispositions relatives à la maintenance sont également analysées plus en détail.

La RS apporte donc des éléments complémentaires par rapport à l'EDD ; elle formule un avis qualitatif, une tendance (favorable, défavorable ou neutre) sur la cotation de l'occurrence des événements initiateurs et le niveau de confiance attribué aux barrières. Cette analyse sera utilisée lors de l'actualisation de l'EDD pour réviser ces cotations.

2 FOCUS STATISTIQUE SUR LES ERC D'OUVERTURE INTEMPESTIVE DE VANNE

Les scénarii d'ouverture intempestive de vanne sont bien souvent gouvernés par des événements initiateurs liés aux systèmes de contrôle-commande. Le tableau ci-dessous présente ainsi une vision synthétique des risques d'ouverture intempestive de vanne à l'échelle du parc EDF. L'échelle des gravités est en « équivalent crue » : le débit relâché en cas de survenance d'un ERC est comparé aux crues classées. Les classes d'occurrence (A à E) sont celles définies au § 1.2. La coloration, même si elle représente la criticité d'un risque, reste indicative :

Gravité (équivalent crue)						
	> $Q_{10\,000}$					
	$Q_{1\,000}$ à $Q_{10\,000}$	2	1	3		
	Q_{100} à $Q_{1\,000}$		5	4		
	Q_{10} à Q_{100}	3	22	32	13	
	< Q_{10}	2	27	111	70	7
	Nb d'ERC	E	D	C	B	A
		Extrêmement peu probable	*Très improbable*	*Improbable*	*Probable*	*Courant*
		Classe d'occurrence				

Néanmoins, le croisement occurrence/gravité permet de définir des mesures de réduction des risques appropriées : ainsi, en vision « post mise en œuvre des mesures de réduction des risques », il ne subsistera quasiment plus d'ERC cotés « A » et « B-II ».
Parmi les risques d'occurrence A, le facteur humain intervient à 4 reprises en chemin critique, et 2 cas correspondent à des systèmes de CC obsolescents, qui depuis ont été rénovés ou sont en cours de rénovation complète.
Une caractérisation complémentaire de la gravité associée aux ERC, en fonction du nombre de personnes potentiellement impactées, sera réalisée lors des actualisations des EDD.

3. APPORTS ET REX

3.1 Apports Des Etudes De Dangers

L'EDD est porteuse d'une culture nouvelle dans notre approche de la sécurité des barrages. La démarche d'analyse de risques nous a poussés vers une approche plus globale, fonctionnelle et multi-métiers des risques sur nos ouvrages.
Le fonctionnement en Groupes de Travail pluridisciplinaires pour chaque étude nous a conduit à nous re-questionner en profondeur sur le fonctionnement et l'état de nos ouvrages. En ce sens, **les EDD, au même titre que les RS, ont agit comme de véritables catalyseurs d'émergence (ou de réémergence) des points faibles de nos ouvrages**.
Les EDD se traduisent in fine par l'engagement du Responsable d'Ouvrage sur un plan de réduction des risques avec une vision à 10 ans ; elles constituent ainsi un maillon important du processus d'amélioration continue de la sûreté.

3.2 Robustesse Des Systèmes De Contrôle Commande

L'élaboration d'un avis équilibré sur les scénarii de défaillance potentiels est un exercice difficile. La difficulté pour le métier CC a été d'établir un cadre de cohérence permettant d'apprécier de façon homogène la robustesse d'un système, en fonction des données disponibles (dossier de conception, REX,…). Ceci en particulier pour les barrages en rivière (majoritairement de classe B), pour lesquels la défaillance d'un automatisme de sûreté constitue souvent un chemin critique des ERC.Le référentiel (interne) d'évaluation des occurrences a ainsi été complété à l'aune des difficultés rencontrées pour la réalisation des EDD dites de première génération : standardisation du découpage fonctionnel des chaînes d'alarme, distinction des différents modes de défaillance d'un automate barrage, compléments à la liste des EI/ERC, valorisation des dispositifs de sauvegarde comme barrière…

3.3 Fiabilisation Des Fonctions De Sûreté Liées Au Contrôle Commande

La robustesse des systèmes de contrôle commande peut être mesurée au travers des engagements qui ont été prononcés au niveau des EDD de première génération.
Ces engagements, au nombre de 102 pour le contrôle commande, peuvent être catégorisés de la façon suivante :



Nota : Si les différents thèmes sont explicites, l' « amélioration du fonctionnement » intègre diverses rubriques, qui peuvent être séparées en trois points :

- Modes communs (foudre, gel, inondation des installations, homme seul) : 7 recommandations recensées.
- Réfection ou fiabilisation d'automatismes existants : 6 recommandations recensées.
- Alarmes ou actions niveau haut : 7 recommandations recensées.

Ce bilan fait apparaître une majorité de mesures relatives à la partie fonctionnement/automatismes (partie gauche du schéma) par rapport aux fonctions «alimentation en énergie » et « alerte de l'exploitant » (partie droite).

Le nombre de mesures de maîtrise des risques reste mesuré au regard du nombre d'EDD concernées. Ceci s'explique notamment par :

- le processus de validation des EDD, qui conduit à ne retenir que les mesures relevant du domaine de la sûreté hydraulique/sécurité publique[6],
- le caractère fonctionnel de ces mesures qui leur donne souvent un caractère « globalisant » (ex : « fiabilisation de la chaîne de commande de la vanne »).

3.4 Bilan Des Préconisations Issues Des RS

Pour les RS, l'exercice a porté sur l'analyse des préconisations (propositions d'améliorations) des bilans contrôle-commande : 232 recommandations en CC pour 105 RS. On notera que le nombre de mesures issues des RS est proportionnellement beaucoup plus élevé que celui des EDD. Ceci s'explique par un grain plus fin pour la RS (diagnostic détaillé des ouvrages et matériels), et à des préconisations pouvant relever du domaine de la maintenance (plus de 40% des préconisations).

Les thèmes retenus suivent le même découpage que pour les EDD avec toutefois une orientation plus marquée sur les matériels. Les familles suivantes ont été identifiées :

- Automatismes (intégrant les protections, normal/secours, sauvegarde, inondation…)
- Alimentations (intégrant batteries, groupes électrogènes…)
- Mesures de niveaux
- Diffusion d'alarmes (intégrant les télétransmissions)
- Contrôle commande des vannes
- Une rubrique « divers » pour les matériels non identifiés comme importants pour la sûreté hydraulique (MISH) [7].

La figure suivante donne la répartition des mesures préconisées par rubrique :



4. CONCLUSION

La démarche EDD-RS est perçue dans le métier CC comme un moteur important de diffusion de la compétence sur le fonctionnement des aménagements. Le regard nouveau apporté par cette démarche (approche fonctionnelle, en lien avec l'occurrence et la gravité des risques) est véritablement un moteur de progrès :

- L'analyse des modes communs a été revisitée pour chaque ouvrage ; elle a conduit à identifier de nombreuses mesures d'amélioration de la sûreté des ouvrages (cf § 3.3 et 3.4).
- La pratique des EDD-RS et le retour d'expérience associé contribuent à l'amélioration continue en matière de sûreté : évolution du référentiel de conception, et consolidation des axes d'organisation et de formation déjà engagés.

[6] La réglementation concerne « la sécurité des biens et des personnes », ce qui correspond à la définition de la Sûreté Hydraulique chez EDF.
[7] Matériel Important pour la Sûreté Hydraulique (appellation interne EDF)

CAPITALISATION DU RETOUR D'EXPERIENCE SUR LES VANNES DE BARRAGE

Experience capitalisation on dam gates

Philippe BRYLA, Mathieu GEVODANT, Marielle MONTERYMARD
EDF-DTG 21, Avenue de l'Europe, 38040 Grenoble cedex 9, France
philippe.bryla@edf.fr, mathieu.gevodant@edf.fr , marielle.monterymard@edf.fr,

MOTS CLÉS

Base de données, vanne, évacuateur de crue, vidange de fond, fiabilité, revue de sûreté, diagnostic, mode de défaillance, taux de défaillance, dysfonctionnement, retour d'expérience, chaîne cinématique.

RÉSUMÉ

Depuis 2007, plus de 500 vannes du parc EDF ont fait l'objet d'un diagnostic complet dans le cadre d'un programme pluriannuel ou d'une analyse détaillée dans le cadre d'une Revue de Sureté. Le bilan d'état des vannes de barrage réalisé dans le cadre de chaque Revue de Sûreté comprend une ré-analyse de conception/réalisation, un bilan de la maintenance et un bilan du fonctionnement. À cette occasion, on collecte notamment l'ensemble des dysfonctionnements de chaque vanne depuis sa mise en service, ainsi que la statistique sur le nombre annuel de manœuvres.

L'homogénéité d'approche dans les diagnostics mécaniques et les contributions hydromécaniques aux Revues de Sûreté, reposant sur un référentiel interne, a rendu possible l'élaboration d'une base de données de capitalisation des données techniques et de dysfonctionnement sur les vannes.
Cette base de données – baptisée HyMéDiag pour HYdro MEcanique DIAGnostic – a été initiée en 2010. Son principal objectif était de pouvoir comptabiliser et ré-analyser des dysfonctionnements déjà rencontrés sur les vannes du parc EDF, et de pouvoir rechercher rapidement des matériels de technologies identiques.
Après une présentation de la structuration de cette base de données, la communication donne un aperçu de son contenu. Au moyen de quelques extractions, elle illustre comment la base permet de dégager des tendances sur les composants en cause dans des dysfonctionnements. On montre comment l'exploitation de la base HyMéDiag permet aussi de dégager quelques tendances quantitatives sur les principaux modes de défaillance par technologie de vanne et par type de chaîne cinématique. À terme, l'exploitation de cette base de données sera utilisable pour encadrer les taux de défaillance des catégories de vannes les plus largement représentées sur le parc.

ABSTRACT

Since 2007, more than 500 gates of the EDF fleet were concerned by an in-depth diagnosis or were studied within a Safety Review. The balance sheet of state of the gates of dam realized within the framework of every Safety Review includes an analysis of design and construction, a balance sheet of the maintenance and the balance sheet of the operating. On this occasion, we collect in particular the set of the dysfunctions of every gate since its commissioning, as well as the statistics on the annual number of actuations.
The homogeneity of approach in the mechanical diagnoses and the Safety Reviews made possible the elaboration of a database of the technical data and the dysfunction on gates.
This database - named HyMéDiag - was initiated in 2010. Its main objective was to be able to recoerd and to analyze dysfunctions already met on the gates.
After a presentation of the database structure, the communication gives an overview of its contents. By means of some extractions, illustrations are given to highlight how the HyMéDiag database allows to estimate some quantitative trends on the main failure modes depending on the gate technology and on its command. In the coming years, the exploitation of this database will permit to estimate the failure rates of the most widely represented gates categories.

1. INTRODUCTION

Le parc hydraulique d'EDF compte actuellement plus de 6000 vannes, toutes fonctions (évacuation des crues, vidange de fond, isolement…) et toutes technologies (vannes en conduite, vannes charpentées) confondues. Ces vannes ayant été conçues, approvisionnées et montées au fur et à mesure de la construction barrages, on constate une importante diversité de technologies liée à l'évolution des techniques et des référentiels dans les domaines suivants :

- Conception de la structure et des étanchéités,
- Conception des éléments de la chaine cinématique, sources de mouvement,
- Matériaux, procédés de fabrication et de contrôle,
- Complexité du contrôle commande.

Ces vannes participant au fonctionnement d'ouvrages très variés dans des environnements divers, les conditions d'exploitation et les chargements qui en résultent présentent également une grande diversité. Elles sont notamment liées au climat, aux dimensions de la vanne, à son environnement (présence d'embâcles potentiels sur le bassin versant, sédiments), à la nature du barrage ou de l'usine (manœuvres régulières, difficultés d'accès, automatisation…). On peut cependant dégager des catégories de vannes basées sur les similitudes suivantes :

- Famille technologique (type de vanne),
- Caractéristiques techniques (dispositions de conception, chargements),
- Éléments constitutifs de la chaîne cinématique, sources du mouvement,
- Dysfonctionnements rencontrés.

Depuis 2006, une cotation de criticité de l'ensemble de ces vannes est tenue à jour par les Unités de Production d'EDF. La cotation d'une vanne dépend de l'enjeu associé et de la connaissance de son état à partir de la surveillance en exploitation. Au pas annuel, des diagnostics approfondis sont engagés sur les vannes dont la criticité est la plus élevée. Ainsi, entre 2007 et 2012, environ 230 vannes ont fait l'objet d'un diagnostic.
D'autre part, depuis 2007, la réglementation française exige pour les barrages à plus forts enjeux de sécurité publique (barrages de classe A) de réaliser tous les 10 ans une étude de dangers puis un examen technique complet et une revue de sûreté visant à dresser le constat du niveau de sûreté du barrage et à proposer des mesures en regard des insuffisances constatées. Depuis la mise en place de cette réglementation, plus de 300 vannes ont été étudiées dans le cadre d'une Revue de Sûreté. Chaque Revue de Sûreté comporte systématiquement un bilan d'état des vannes du barrage étudié. Ce bilan comprend une ré-analyse de conception/réalisation, un bilan de la maintenance et un bilan du fonctionnement de la vanne. On collecte pour cela tous les dysfonctionnements survenus sur chaque vanne, ainsi que le nombre annuel de manœuvres.

D'une manière générale, l'objectif des diagnostics réalisés est de vérifier le niveau de sûreté des matériels (tenue mécanique, fonctionnement) en étudiant les modes de défaillance potentiels les plus probables. Ils permettent notamment de prioriser les actions de maintenance lourde, et peuvent donner lieu à la mise en place d'actions d'amélioration du niveau de sûreté.
Pour répondre à la volonté de capitaliser les informations ainsi collectées au fil des diagnostics et des Revues de Sûreté en vue d'enrichir les études ultérieures, la mise en place d'une base de données s'est rapidement imposée. Son objectif a été, dès le départ, de réunir à la fois les données techniques et les données de dysfonctionnement sur toutes les vannes analysées afin de comptabiliser et ré-analyser des dysfonctionnements déjà rencontrés, mais aussi de pouvoir dégager des tendances quantitatives sur les principaux modes de défaillance propres à chaque technologie.

La base de données HyMéDiag a été initiée en 2010. Les objectifs visés ont conduit à la structurer au moyen d'un logiciel capable d'effectuer facilement des requêtes multicritères en croisant les technologies de matériel, les constructeurs, les données de conception et de fonctionnement. Par ailleurs, l'homogénéité d'approche adoptée dans les diagnostics et les Revues de Sûreté a grandement facilité cette structuration.
Depuis sa création, la taille de la base HyMéDiag évolue rapidement. Ainsi entre mai 2014 et avril 2015, la base est passée de 572 vannes à 650 vannes. L'histogramme ci-dessous indique la répartition des années de mise en service des vannes recensées dans la base en avril 2015 (toutes technologies et fonctions confondues).

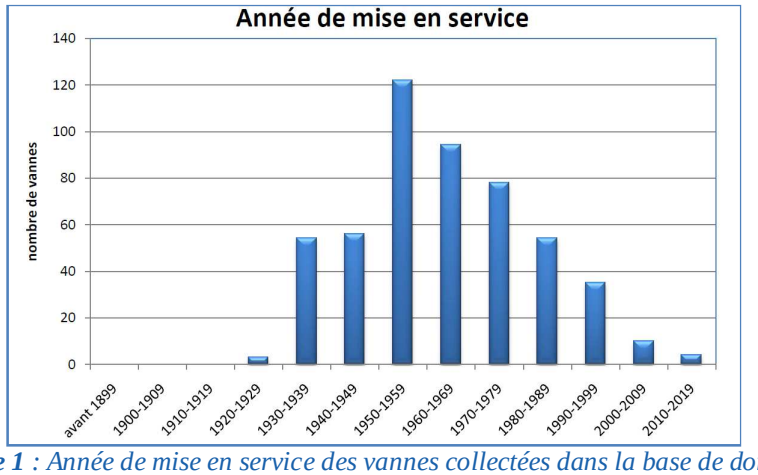


***Figure 1** : Année de mise en service des vannes collectées dans la base de données*

2. PRESENTATION GENERALE DE LA BASE HYMEDIAG

2.1. Structuration des données

Pour chaque vanne figurant dans la base HyMéDiag, on renseigne à minima les informations suivantes :

- Principales données de conception : constructeur, technologie de la vanne (wagon, segment, clapet, chenilles…), système de manœuvre (à treuil ou à vérin oléo-hydraulique), dimensions principales, éléments de la chaine cinématique, types d'étanchéités …
- Principales données de fonctionnement : fonction(s) assurée(s) par l'organe (évacuer les crues, vidanger le barrage, restituer un débit …), année de mise en service, nombre de manœuvres par an,
- Liste des dysfonctionnements recensés dans l'historique depuis la mise en service. Pour chaque dysfonctionnement, on indique également sa (ou ses) cause(s), la nature de la cause principale (conception, exploitation, maintenance, exogène) ainsi que la liste des composants incriminés. On précise également la durée de l'indisponibilité de l'organe ayant résulté du dysfonctionnement et ses conséquences en termes de sûreté et de production et les actions correctives qui ont été mises en œuvre.

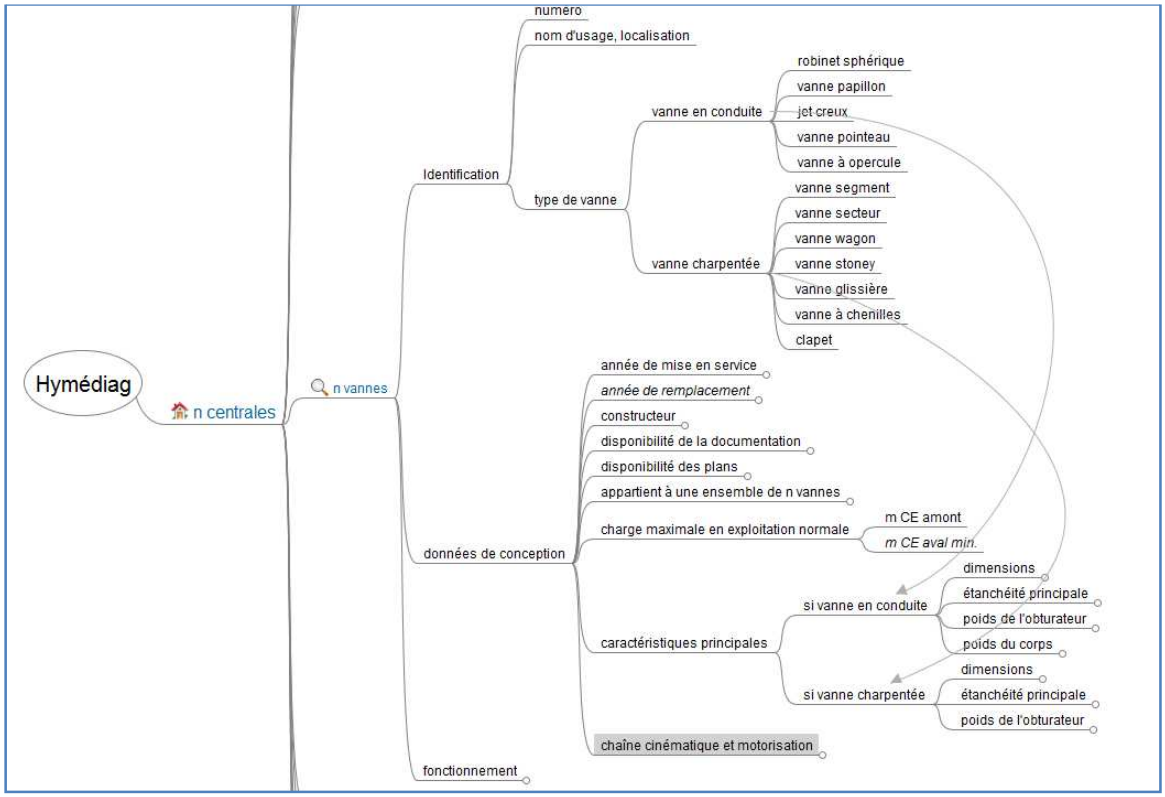


***Figure 2** : Principales données descriptives collectées sur les vannes*
Identification et données de conception de l'obturateur

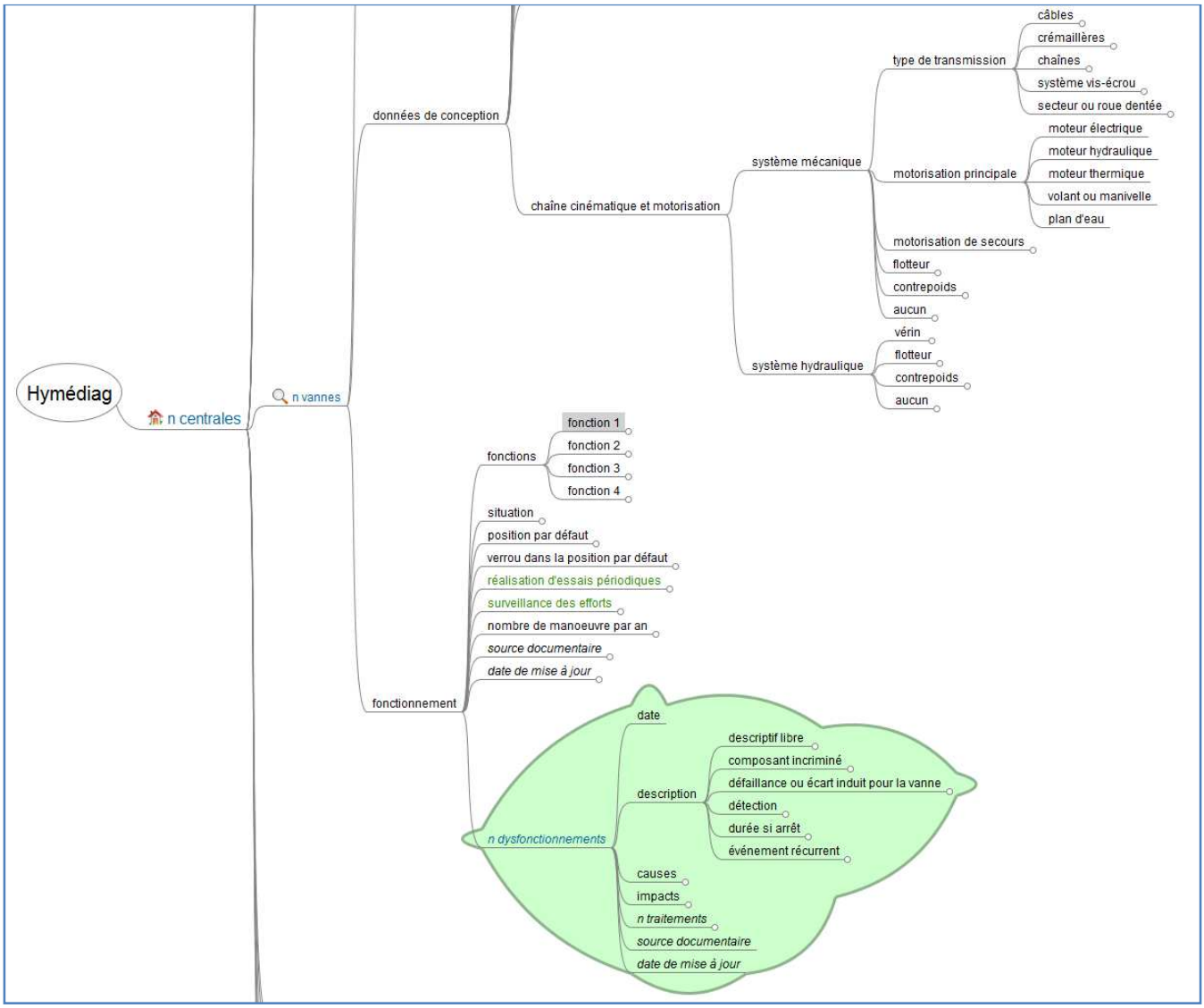


***Figure 3** : Principales données descriptives collectées sur les vannes*
Chaîne cinématique et dysfonctionnements

Les figures 2 et 3 décrivent l'architecture générale des principales données collectées dans la base. Chaque fois que cela est possible, ces informations sont collectées sous forme de liste pré définie, afin de faciliter par la suite les recherches multi critères et les analyses de données (traitement statistique, tris).
Un exemple de description technique d'une vanne (conception, chargements, fonctionnement, dysfonctionnements, actions correctives) est présenté en Annexe.

2.2. Caractérisation des dysfonctionnements

On distingue deux types de dysfonctionnements : les **défaillances** et les **écarts**. Une défaillance correspond à un événement ayant effectivement conduit à une non manœuvre de la vanne en exploitation normale ou au cours d'un essai de fonctionnement de la vanne. Un écart correspond à un risque jugé trop élevé d'apparition d'une défaillance mis en évidence à l'occasion d'un diagnostic, lors d'une visite de maintenance ou lors d'un essai de manœuvre, ou correspond au dysfonctionnement en exploitation d'un composant de la vanne n'ayant pas conduit à la défaillance de la vanne du fait par exemple d'une redondance. Généralement l'écart correspond au non respect d'un critère du référentiel, comme par exemple : impossibilité de manœuvre avec la source principale, effort de manœuvre trop élevé, temps de manœuvre non conforme, sous-épaisseur non acceptable.

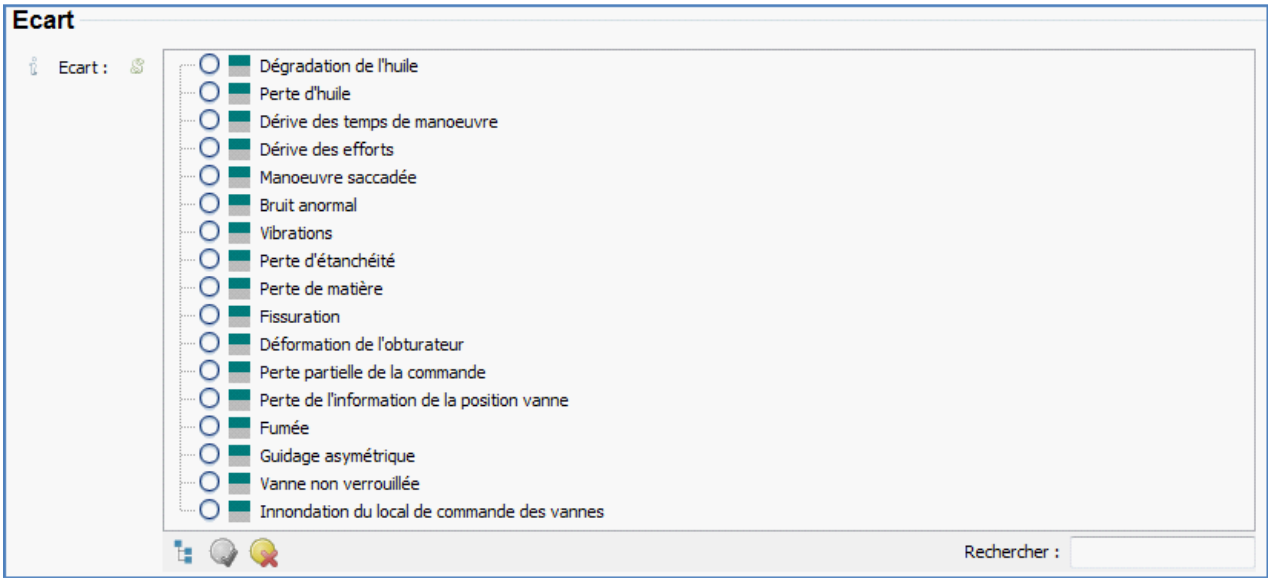


***Figure 4** : Ecarts possibles identifiés*

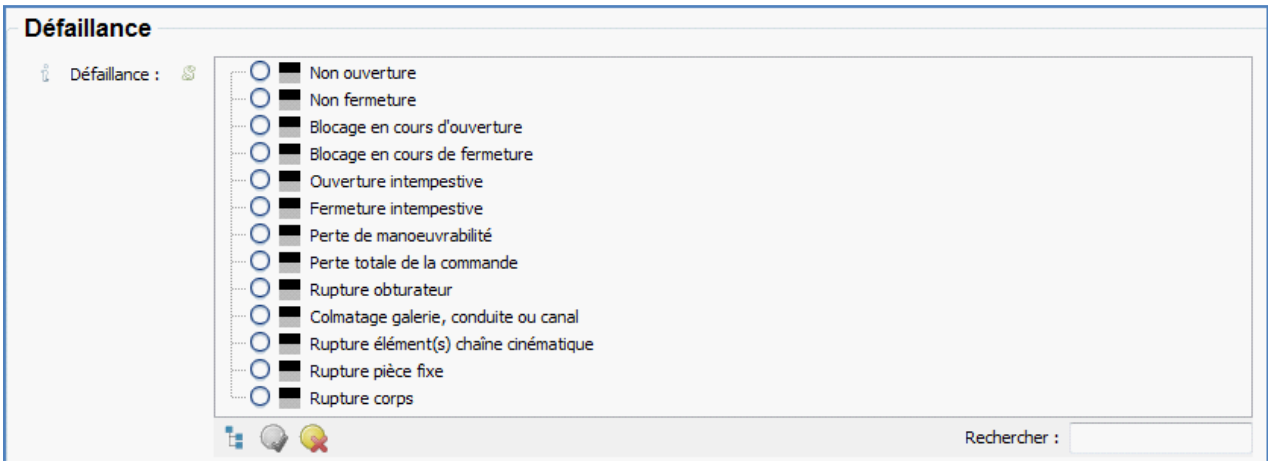


***Figure 5** : Défaillances possibles identifiées*

2.3. Contenu de la base HYMEDIAG

Le périmètre de la base HyMéDiag couvre l'ensemble des vannes charpentées et en conduite qui participent à la sécurité des barrages (évacuateurs de crues, vannes de fond), mais aussi des vannes assurant d'autres fonctions tels que la restitution d'un débit, l'isolation d'une conduite ou d'un canal.

En mai 2014, on comptabilisait un total de 572 vannes dans la base, toutes technologies incluses. Au total, la base comprenait alors 180 vannes en conduite et 392 vannes charpentées. Parmi les vannes charpentées, on distingue d'une part les vannes charpentées à mouvement de translation vertical telles que les vannes à glissières, les vannes wagons, les vannes Stoney et les vannes à chenilles et d'autre part les vannes dont l'obturateur a un mouvement de rotation, telles que les vannes segment et les clapets.

Les statistiques qui sont présentées dans la suite de l'article concernent uniquement les technologies de vannes charpentées dont la majorité concerne des évacuateurs de crues, les technologies de vannes charpentées les plus représentées dans la base étant les vannes wagons et les vannes segments.

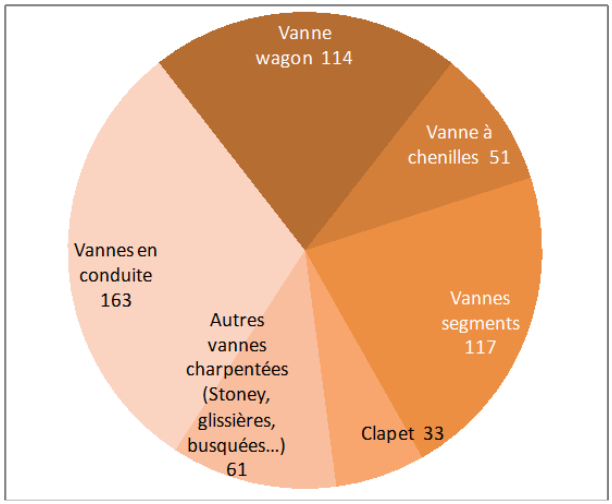


***Figure 6.a** : Répartition des technologies de vannes dans la base HyMéDiag*

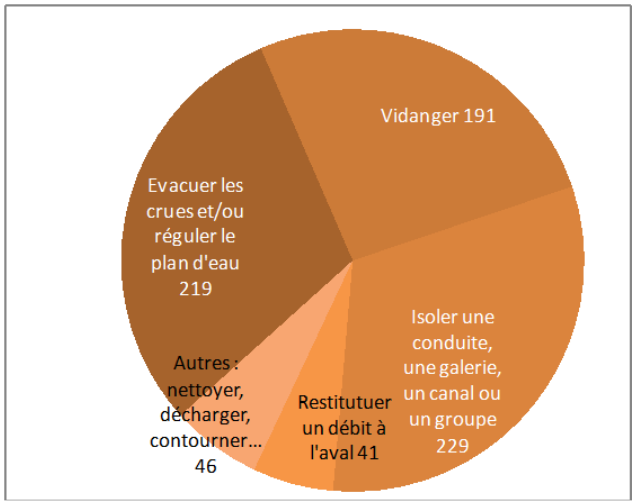


***Figure 6.b** : Répartition des vannes en fonction de leur fonction principale*

La figure 6.b montre la répartition de la population des vannes renseignées dans la base HyMéDiag sur les différentes fonctions. Sur la totalité des vannes renseignées dans la base, 219 vannes participent à la fonction d'évacuation des crues, soit plus d'un tiers de l'effectif.

En 2014, l'âge moyen des vannes charpentées renseignées dans la base HyMéDiag est d'environ 50 ans, toutes technologies confondues. Près de 60 % de ces vannes ont été mises en service entre 1950 et 1979. Les âges moyens des technologies de vannes les plus représentées dans la base sont, en 2014 :

- Les vannes wagon (121 vannes) : 49 ans,
- Les vannes segment (117 vannes) : 49 ans,
- Les vannes à chenilles (55 vannes) : 58 ans,
- Les clapets (33 vannes) : 44 ans.

3. PRINCIPAUX DYSFONCTIONNEMENTS RECENSES SUR LES VANNES

3.1 Composants en cause dans la perte de manœuvrabilité des vannes

La base HyMéDiag permet de produire des statistiques, pour chaque technologie de vannes, sur le (ou les) composant(s) à l'origine des dysfonctionnements. On a pour cela globalisé l'ensemble des dysfonctionnements du type « non ouverture », « non fermeture », « blocage en cours d'ouverture » et « blocage en cours de fermeture » dans un unique mode « perte de manœuvrabilité ».

À titre d'exemple, les quatre figures ci-après permettent de dégager quelques grandes tendances pour les vannes wagons et les vannes segments qui sont les deux technologies les plus représentées dans la base. Ces figures ont été obtenues en exploitant l'ensemble des dysfonctionnements en lien avec la perte de manœuvrabilité recensés dans la base (ces dysfonctionnements comprennent les défaillances et les écarts).

Pour les vannes segments (voir les figures 7.a et 7.b) :
Sur les vannes actionnées par une chaîne cinématique à treuil, une défaillance de la motorisation contribue à 37% des dysfonctionnements liés à une perte de manœuvrabilité, la défaillance d'un élément mobile de la chaîne cinématique à 29% des dysfonctionnements, tandis que le contrôle-commande ne contribue qu'à 17% des dysfonctionnements. Sur les vannes actionnées par un système à vérin, c'est la défaillance du circuit oléo-hydraulique qui arrive en tête des causes avec une contribution à hauteur de 58% et le contrôle-commande contribue à 28% des dysfonctionnements observés, donc à un niveau sensiblement plus élevé que sur les vannes à treuil. Dans les 2 cas, la défaillance des étanchéités (joints) n'entre en jeu que dans 5% à 7% des pertes de manœuvrabilité observées.

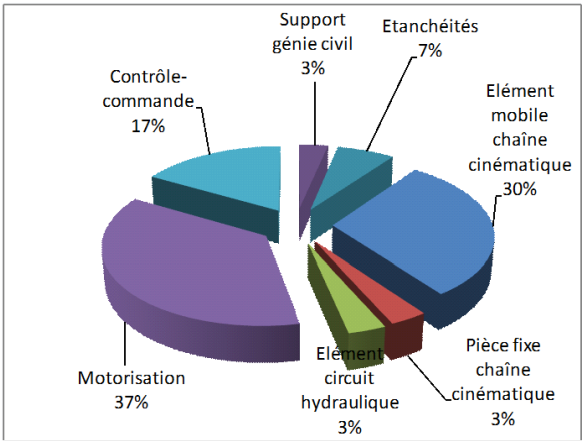


***Figure 7.a** : Composants à l'origine des pertes de manœuvrabilité des vannes segments actionnées par treuil*

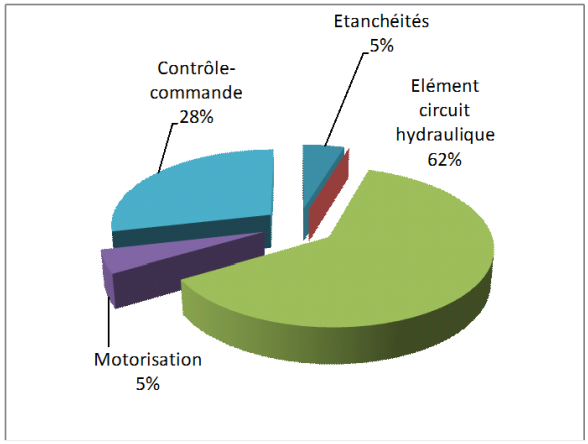


***Figure 7.b** : Composants à l'origine des pertes de manœuvrabilité des vannes segments actionnées par vérin*

Dans le cas des vannes wagons (voir figures 8.a et 8.b), la tendance est sensiblement la même, avec toutefois une contribution plus forte du contrôle-commande aux dysfonctionnements des vannes actionnées par un système oléo-hydraulique. Sur cette technologie de vanne, on constate en outre une contribution plus fréquente des structures de pièces fixes ou des éléments de guidage aux dysfonctionnements observés.

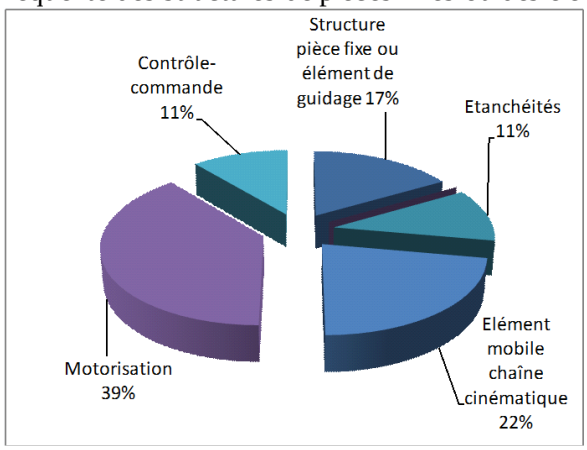


***Figure 8.a** : Composants à l'origine des pertes de manœuvrabilité des vannes wagons actionnées par un treuil*

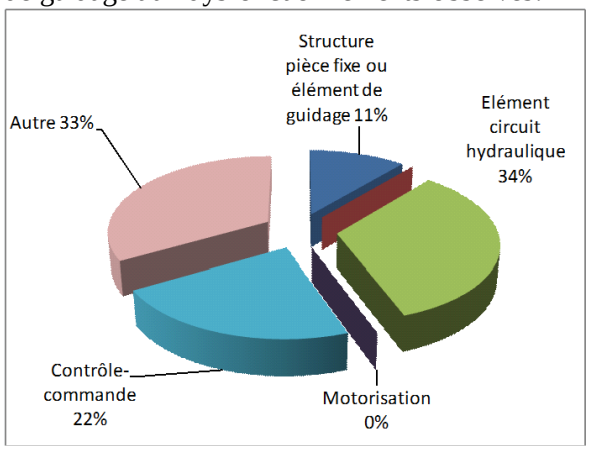


***Figure 8.b** : Composants à l'origine des pertes de manœuvrabilité des vannes wagons actionnées par vérin*

3.2. Utilisation de la base pour l'estimation de taux de défaillance

La taille actuelle de la base de données permet, pour les populations de vannes les plus représentées, d'envisager l'estimation d'un taux moyen de dysfonctionnement à la sollicitation γ pour le mode de défaillance global « perte de manœuvrabilité ». Sur une population de vannes données, on définit ce taux moyen γ_m comme le rapport du nombre de dysfonctionnements observés sur la période d'analyse (écarts et défaillances confondues) sur le nombre de manœuvres de vannes sur cette même période.

La robustesse des estimations peut être testée en étudiant la variance de ces estimations à partir de sous-échantillonnages aléatoires de la base complète générés sur un sous-échantillonnage compris entre 10% et 50% de la population. La figure 9 ci-dessous illustre les résultats obtenus à partir de ce type de simulations. Pour chacune des technologies de vannes les plus représentées dans la base (les vannes segments, les vannes wagon et les clapets), on a généré par un algorithme de Monte-Carlo des stirages de sous-échantillonnages de la base HyMéDiag compris entre 10% et 50% de la population. Ces simulations ont permis d'estimer le taux de dysfonctionnement moyen à la sollicitation γ_m et une borne supérieure de l'intervalle de confiance à 90% de cette estimation en prenant le fractile à 90% de la distribution ainsi générée.

Lorsque le taux de dysfonctionnement moyen γ_m est estimé à partir de l'intégralité de la base de données HyMéDiag, la borne supérieure de l'intervalle de confiance à 90% a été estimée analytiquement en utilisant l'hypothèse d'une loi log-normale pour la distribution de γ. La figure 9 ci-après montre le résultat d'un test d'adéquation de la loi log-normale à la distribution de γ/γ_m obtenue par simulations de Monte-Carlo à partir de sous-échantillonnages aléatoires de 20% de la base HyMéDiag pour l'ensemble de la population des

vannes charpentées (toutes technologies confondues). La probabilité (p-value) associée au test de Kolmogorov-Smirnov est supérieure à 90%, ce qui permet de justifier l'utilisation d'une loi log-normale pour modéliser l'incertitude sur l'estimation du taux de dysfonctionnement γ.

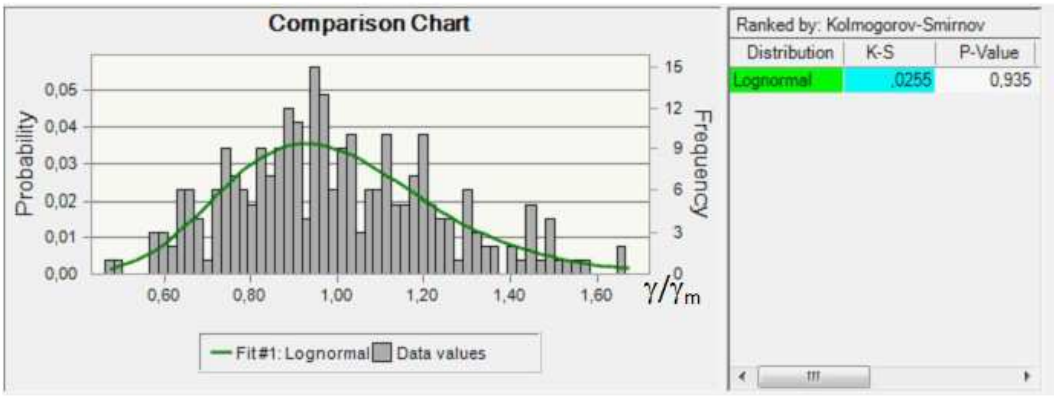


Figure 9 : *Test d'adéquation de γ/γ_m à une loi log-normale*

La figure 10 ci-après montre l'influence de la taille de l'échantillon pris en compte sur l'estimation du taux de dysfonctionnement, sur une plage allant de 10% de la base HyMéDiag à l'intégralité de la base. A ce stade de l'analyse, les simulations mettent surtout en évidence une assez bonne robustesse des estimations pour les technologies de vannes les plus représentées sur le parc. L'obtention d'intervalles de confiance sur le taux de dysfonctionnement à la sollicitation γ par technologie de vanne devient donc envisageable, par exemple pour les vannes wagons, les vannes segments et les clapets. En revanche, il est prématuré de retenir les valeurs absolues des taux de dysfonctionnement ainsi estimées (c'est pourquoi l'échelle des ordonnées a volontairement été omise sur la figure 10). En effet, les vannes ayant fait l'objet d'un diagnostic sont plutôt de criticité élevée ou ayant déjà subi des dysfonctionnements ou avaries (voir §1). Cela implique que les vannes avec forte occurrence de dysfonctionnement sont probablement sur-représentées dans la base HyMéDiag par rapport à la population moyenne des vannes du parc hydraulique.

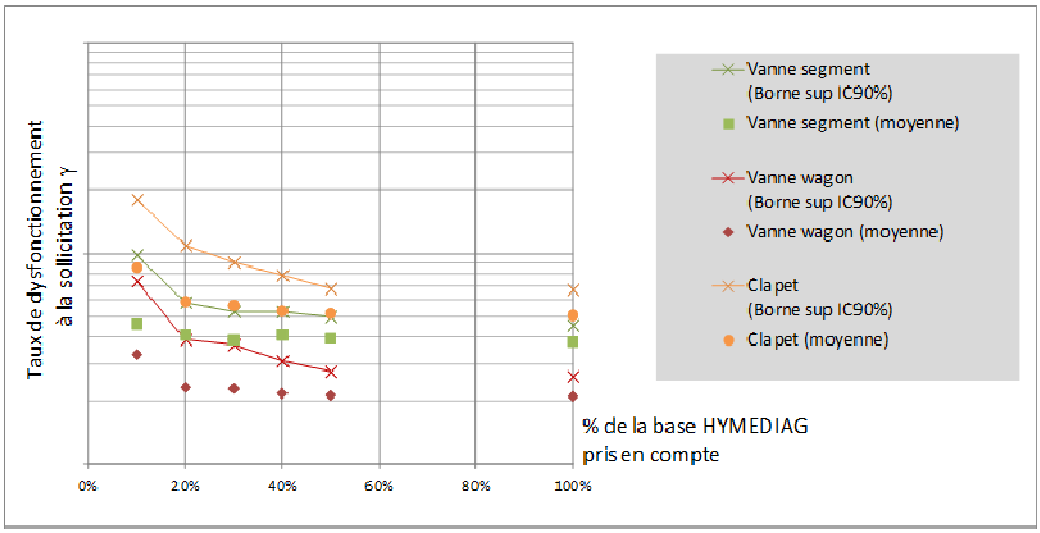


Figure 10 *: Estimation du taux de dysfonctionnement à la sollicitation γ*
Moyenne et intervalle de confiance à 90% estimé pour différents sous-échantillonnages de la base HyMéDiaG

Sans qu'il soit possible d'en tirer une loi générale, ces premiers traitements statistiques permettent de tirer quelques tendances sur le risque de perte de manœuvrabilité des différentes technologies de vannes:

- Parmi les vannes charpentées, tous systèmes de manœuvre confondus, les technologies les plus fiables sont les vannes wagons, suivies des vannes segments, les clapets étant globalement moins fiables,
- Les clapets actionnés par vérin sont significativement plus fiables que ces mêmes technologies lorsqu'elles sont actionnées par des treuils,
- En revanche, pour les vannes wagons et les vannes segments, c'est le contraire : les systèmes à treuils sont sensiblement plus fiables que les systèmes à vérin.

4. EXEMPLE D'UTILISATION DE LA BASE PAR ANALOGIES

Les analogies peuvent être utiles au moment de la conception d'un matériel, afin d'identifier des chargements difficiles à quantifier sur la vanne étudiée mais qui existent par ailleurs sur d'autres matériels :

- efforts hydrodynamiques sur une vanne avec des dimensions, une charge d'eau et une conception du couteau comparables ;
- embâcles rencontrés sur le même bassin versant ;
- problématique de glace rencontrée dans la même zone géographique, ou à la même altitude.

Lors de la réalisation d'un diagnostic, la base permet d'identifier des problématiques particulières qui seraient déjà survenues sur des matériels similaires. Inversement, elle permet aussi de vérifier si une défaillance envisagée au stade d'une analyse de risques est déjà survenue sur le parc. Ce type d'analyse peut être mis en œuvre dans les Revues de Sûreté, afin de se prononcer sur un mode de défaillance potentiel identifié lors de l'Étude De Dangers d'un barrage.

Ce raisonnement est illustré ci-après sur le cas d'une vanne de fond de type papillon. L'Étude De Dangers du barrage avait identifié un risque potentiel lié à la rupture des goupilles d'accouplement de la lentille à l'arbre de la vanne, sous l'effet de la corrosion (perte de section des goupilles). Le développement de la corrosion est en effet a priori possible sur cette vanne puisque un système d'aération expose les goupilles et la lentille à l'humidité.

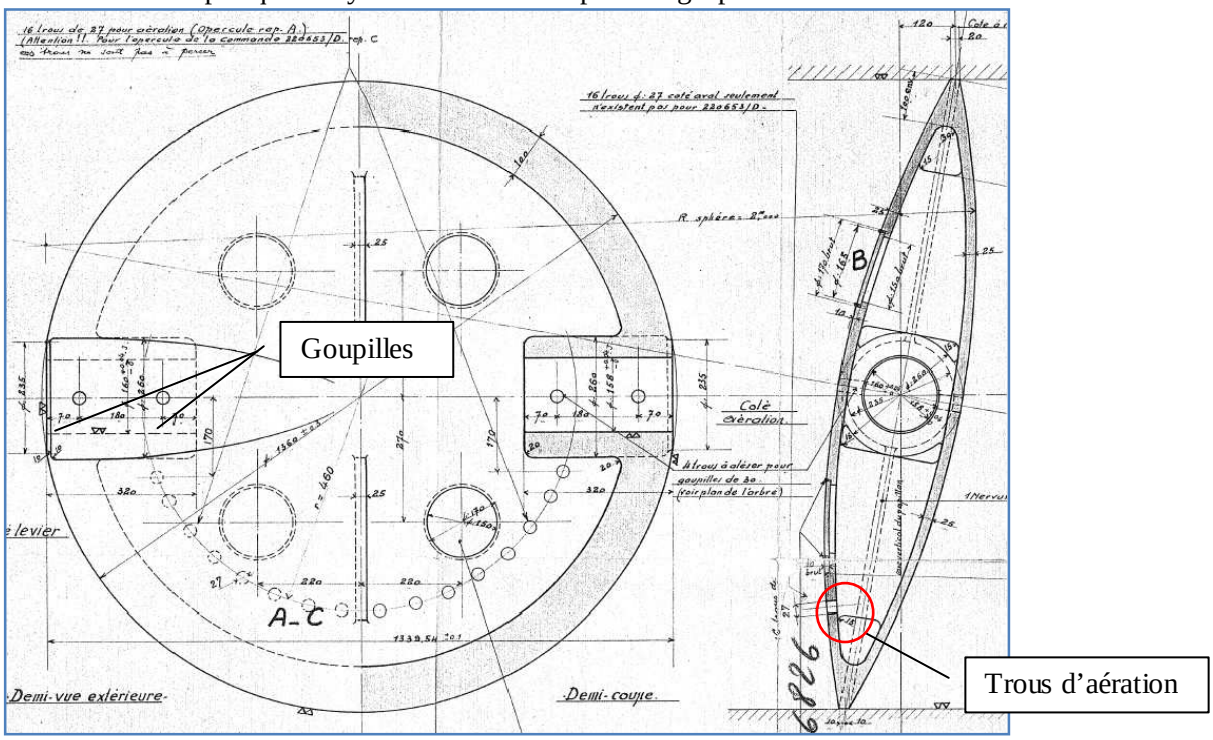


***Figure 11** : Lentille avec système d'aération*

Une recherche sur les dysfonctionnements rencontrés sur les 97 vannes papillons de la base a été réalisée et a pu aider au pesage de ce risque potentiel au stade de la Revue de Sûreté. Cette recherche a permis de mettre en évidence que, sur les vannes papillon renseignées, 23 défaillances ont été recensées (rupture et défauts de manœuvre) et les principaux modes de défaillances lors de la manœuvre sont liés :

- à des blocages (4/16) :
  - trois défauts concernent les tourillons (absence de graissage, rupture des éléments de fixation des tourillons) ;
  - un blocage concerne un dysfonctionnement de l'embrayage.
- à des défauts de l'alimentation électrique (2/16) ;
- à des déréglages du contrôle commande (3/16) ;
- à des ruptures d'éléments de la chaine cinématique (7/16) :
  - trois événements liés à un défaut sur un circuit hydraulique ;
  - un blocage lié à une mauvaise liaison de la chaine cinématique au génie civil ;
  - une rupture d'un élément de la chaine cinématique, probablement sous l'effet de la fatigue (fonctionnement prolongé à ouverture partielle) ;
  - deux événements liés à la rupture de goupilles.

Parmi les deux événements dont la rupture de goupille est identifiée comme la principale cause, aucune rupture n'est liée à la corrosion. Dans les deux cas, c'est un effort de manœuvre exceptionnel qui est en cause.
Ce raisonnement reste qualitatif. Cependant il permet de rendre plus robuste l'avis technique en le confrontant au retour d'expérience. Au final, le risque de rupture de goupille lié à la corrosion a été jugé peu probable au stade de la Revue de Sûreté. Cette étude rapide a par ailleurs montré qu'un moyen efficace d'éviter les ruptures de goupille était l'utilisation de limiteurs d'effort sur les chaînes cinématiques.

5. CONCLUSIONS : APPORTS DE LA DEMARCHE DE REX ET PERSPECTIVES

Depuis que la base de données HyMéDiag est mise en œuvre, on constate que son renseignement systématique est un facteur d'uniformisation des pratiques de diagnostic des vannes. La vérification technique des diagnostics et des Revues de Sûreté est facilitée par une meilleure organisation de la traçabilité des données.

Les données techniques collectées sur les matériels et leurs dysfonctionnements permettent d'ores et déjà d'enrichir les diagnostics réalisés en facilitant la recherche par analogie sur des problématiques éventuellement déjà rencontrées, ou en identifiant les principaux dysfonctionnements observés par famille de matériel. En phase de préparation des Examens Techniques Complets, la base des dysfonctionnements permet ainsi d'aider à un meilleur ciblage des composants élémentaires à examiner lors des visites.

Enfin, la base HyMéDiag constitue un véritable outil pour la formation des nouveaux chargés d'affaire en diagnostic. À terme, l'estimation de taux de défaillance devrait permettre d'affiner la cotation des évacuateurs de crues au stade des Études de Dangers, des Revues de Sûreté et des diagnostics mécaniques.

Un travail conséquent d'approfondissement reste cependant à effectuer afin de rendre plus robuste l'estimation des taux de défaillance et des intervalles de confiance associés. Pour cela, plusieurs axes sont à privilégier :

- Examiner de façon séparée des sous-ensembles de vannes en fonction de leur fréquence d'utilisation. Par exemple, il pourrait être pertinent de distinguer les vannes fonctionnant rarement de celles manœuvrées régulièrement, dans la mesure où les facteurs de dégradation peuvent être très différents,
- Prendre en compte d'autres critères de regroupement liés à certaines particularités des installations (hypothèses de conception, constructeur, conditions particulières d'utilisation...) permettra également de cibler des sous-ensembles plus homogènes en termes de fiabilité,
- Confronter ce retour d'expérience à celui d'autres exploitants de barrages à l'international.

ANNEXE : EXEMPLE DE DESCRIPTION D'UNE VANNE DANS LA BASE DE DONNEES

On présente ci-après un exemple de description technique (conception, chargements, fonctionnement, dysfonctionnements, actions correctives) de la porte d'écluse amont du grand sas de l'écluse d'Ottmarsheim.

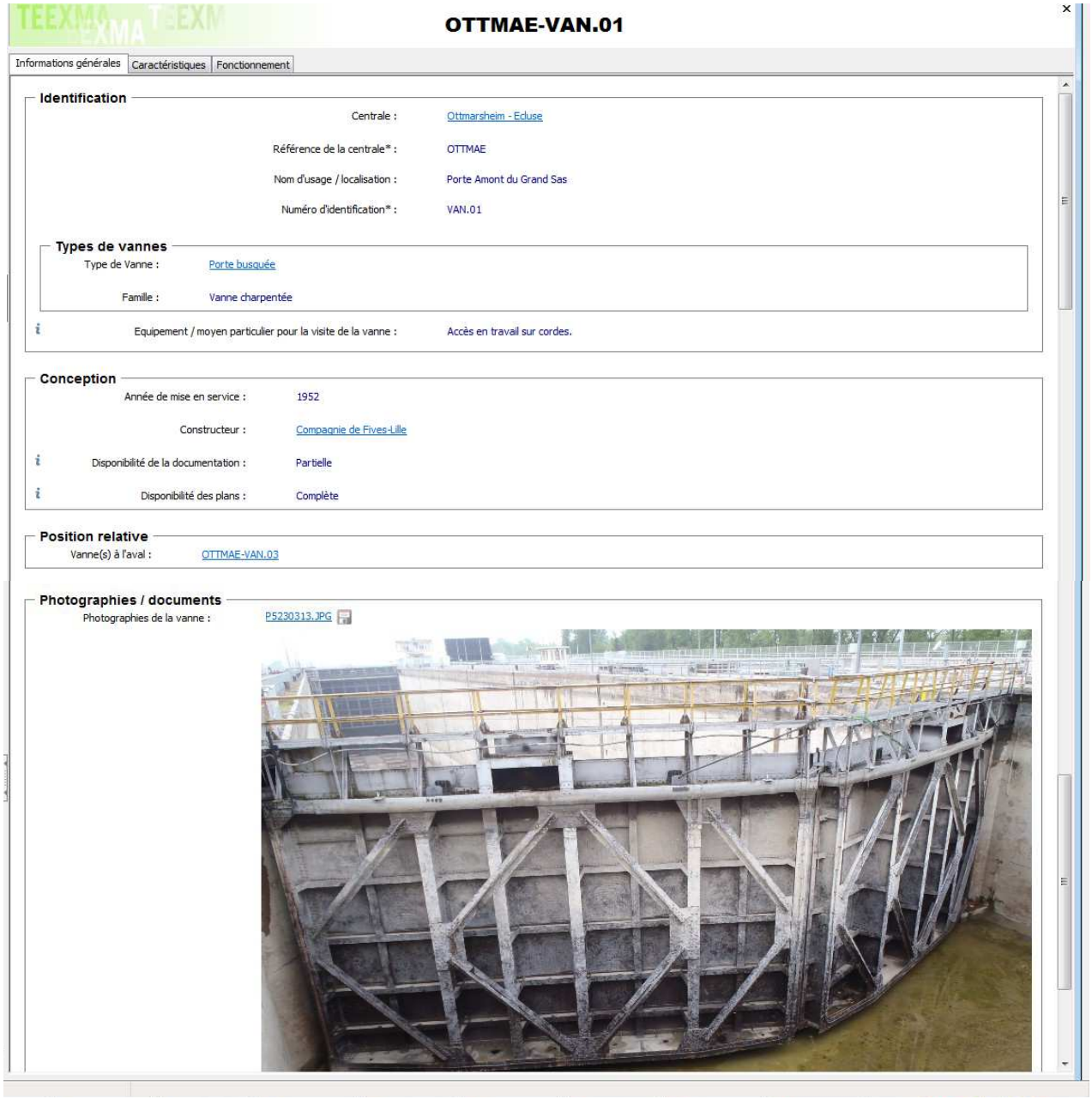


Figure 12 : Exemple de description d'une vanne : informations générales



***Figure 13** : Exemple de description d'une vanne : principales caractéristiques techniques*

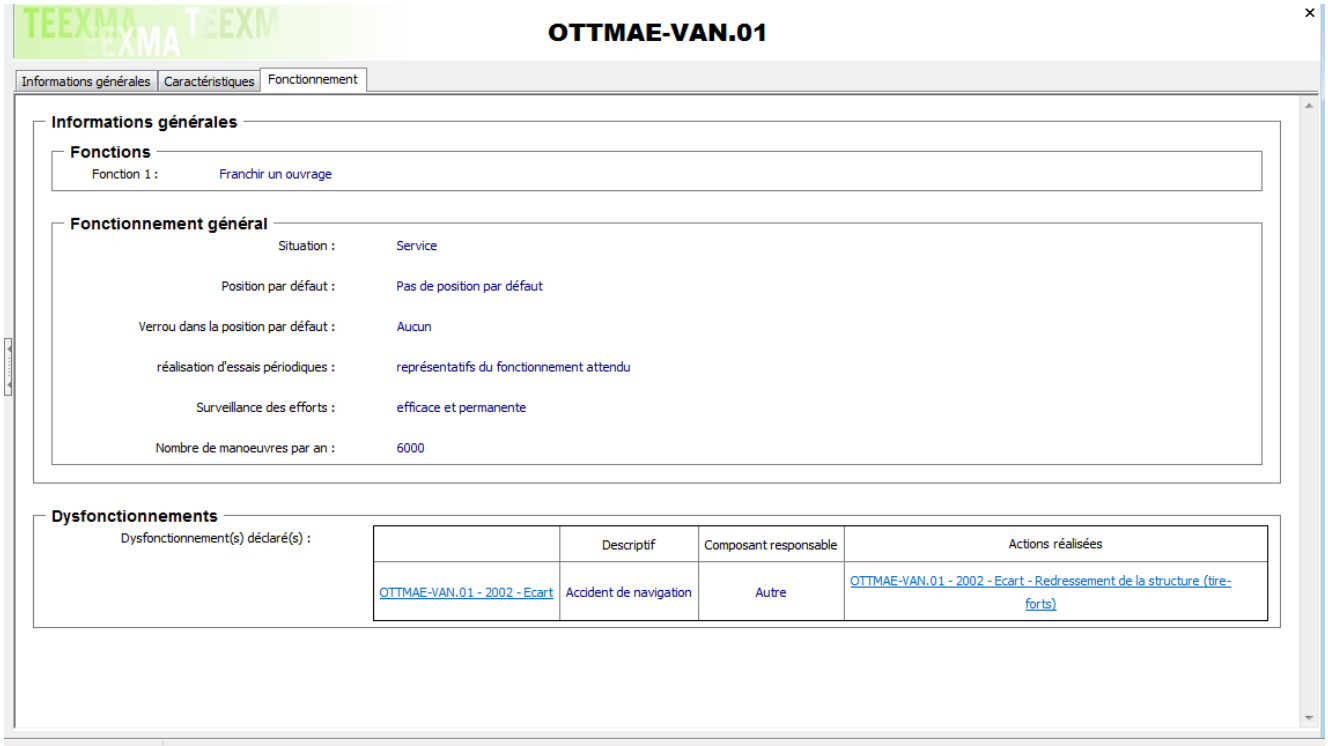


***Figure 14** : Exemple de description d'une vanne : fonctionnement*

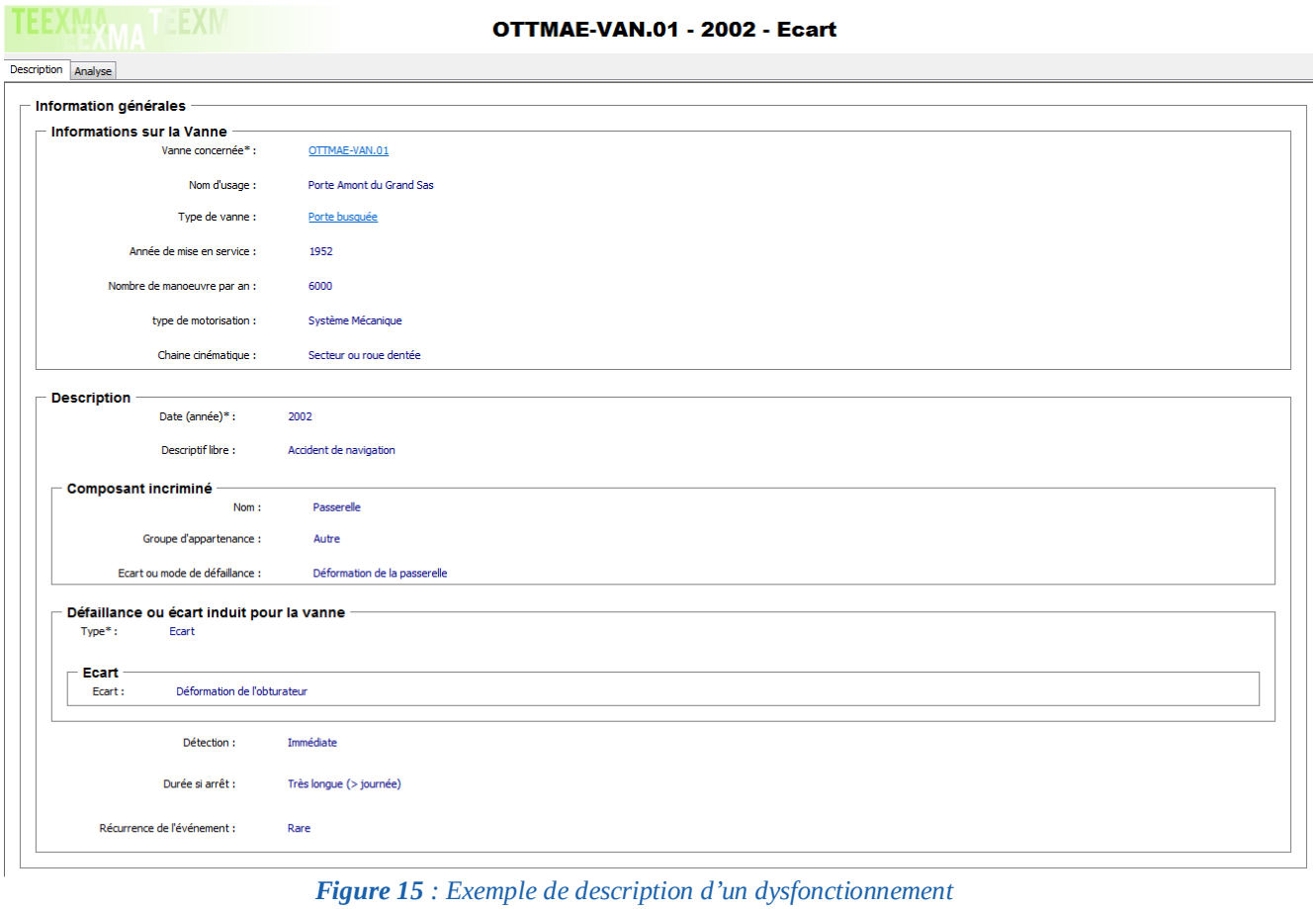


***Figure 15** : Exemple de description d'un dysfonctionnement*



Figure 16 *: Exemple de description d'un dysfonctionnement*

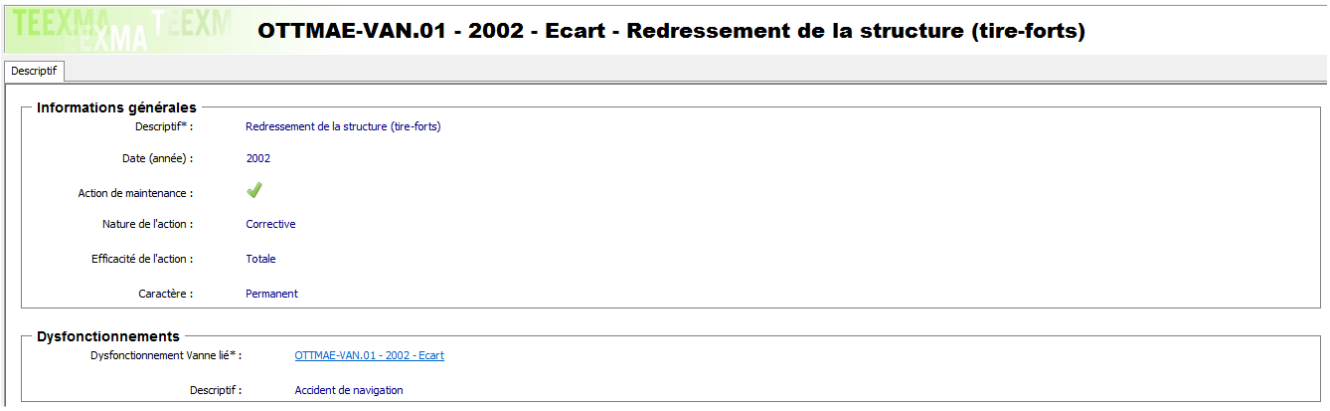


Figure 17 *: Exemple de description d'une action corrective*

DE LA PERFORMANCE DES EVACUATEURS DE CRUES DANS LES ETUDES DE DANGERS A LA PROBABILITE D'OCCURRENCE D'UNE RUPTURE DE BARRAGE EN CRUE

From the spillways performance in safety reports to the probability of dam break

François MASSE[1], Anabel LAHOZ, Thibault BALOUIN
INERIS - Parc Technologique Alata BP2 60550 Verneuil-en-Halatte
francois.masse@ineris.fr, anabel.lahoz@ineris.fr, thibault.balouin@ineris.fr

MOTS CLÉS

Barrage, Evacuateur de crues, Etude de dangers, Probabilité, Sûreté de fonctionnement, Niveau de confiance.

RÉSUMÉ

La réglementation relative à la sécurité des ouvrages hydrauliques définit des classes d'ouvrages pour les barrages et les digues et des obligations associées. Parmi celles-ci, les Études de Dangers (EDD) sont requises pour les barrages de catégories A et B. Une EDD est une évaluation, à un instant donné, du niveau de risque (caractérisé en probabilité d'occurrence et en gravité des conséquences) que l'ouvrage fait peser sur son environnement.
L'INERIS a réalisé une étude dont l'objectif est de valoriser les connaissances existantes sur l'évaluation des performances des dispositifs de sécurité, afin d'intégrer les performances des évacuateurs de crues (EVC) à l'évaluation semi-quantitative de la probabilité de rupture des barrages en crue réalisée dans les EDD. L'étude s'appuie sur l'état de l'art relatif à la prédétermination des crues et aux caractéristiques des EVC. Les différents types d'évacuateurs ont été évalués suivant les critères utilisés habituellement pour les barrières de sécurité : temps de réponse, dimensionnement adapté, niveau de confiance et maintien dans le temps. Le contenu détaillé de l'évaluation a été adapté aux spécificités des évacuateurs de crues. Le niveau de confiance permet d'assigner une classe de probabilité de défaillance à la demande à partir d'une évaluation technique et qualitative. La défaillance des évacuateurs de crues étant généralement considérée comme un événement initiateur dans une EDD, cette classe de probabilité a été traduite en fréquence annuelle. Ces éléments permettront donc de caractériser la probabilité d'occurrence d'une rupture de barrage en crue.

ABSTRACT

French regulation for dams' safety defines dam classes and related requirements. Among those requirements, safety reports are mandatory for dams of classes A and B. A safety report is the evaluation of the risk level (in probability and severity) that the structure poses on its environnement at a given time. INERIS has adapted existing methodologies about safety systems evaluation. The aim is to use spillways performance in order to assess the semi-quantitative probability of dam break due to a flood in safety reports. This work is based on the state of the art regarding flood predetermination and spillways conception and management. Different types of spillways have been evaluated according to the requirements in use for the safety barrier: response time, sizing, efficiency, confidence level and maintenance over time. The confidence level permits to assign a probability of failure on demand class to a safety barrier through a technical and qualitative evaluation. As the spillways failures are considered as root events in a bow-time diagram, the confidence level has been translated in annual frequency. Those different data are used to calculate a probability of dam break due to a flood.

[1]Auteur correspondant

1. LES EVACUATEURS DE CRUE DANS LES ETUDES DE DANGERS

1.1 Probabilités d'accidents potentiels

L'arrêté du 12 juin 2008 [1] définissant le plan de l'étude de dangers des barrages et des digues et en précisant le contenu, revient dans son chapitre 8 sur l'identification et caractérisation des risques en termes de probabilité d'occurrence, d'intensité et de cinétique des effets, et de gravité des conséquences. *« L'étude de dangers s'appuie sur une analyse de risques permettant d'identifier les causes, les combinaisons d'événements et les scénarios susceptibles d'être, directement ou par effet domino, à l'origine d'un accident important. Chaque accident potentiel est caractérisé par sa probabilité d'occurrence, l'intensité et la cinétique de ses effets et la gravité des conséquences pour la zone touchée. En synthèse, les différents scénarios d'accident sont positionnés les uns par rapport aux autres en fonction de leur probabilité d'occurrence et de la gravité des conséquences, évaluée en termes de victimes humaines potentielles et de dégâts aux biens, en mettant en évidence les scénarios les plus critiques ».*

Les accidents potentiels sont sélectionnés sur la base d'une analyse de risques, spécifique au barrage étudié. Parmi les accidents sélectionnés, la rupture de barrage pour cause d'arrivée d'une crue en amont (désignée dans la suite de l'article comme « rupture de barrage en crue ») fait partie des événements générant les effets les plus critiques. L'occurrence d'un tel événement dépend notamment des performances du ou des systèmes évacuateurs de crue dont l'ouvrage est équipé. La défaillance de ces évacuateurs est donc un point crucial dans l'évaluation de la probabilité de l'accident associé.

1.2 Rupture de barrage en crue

Le scénario de rupture de barrage en crue peut survenir lorsque la côte du barrage dépasse une cote de danger dans une situation de crue. Cette cote de danger (CD) doit être établie de manière conservative pour que le risque de rupture à une cote inférieure à la cote de danger soit négligeable (ou extrêmement faible).

La probabilité d'accident sera évaluée en considérant la cote de danger établie, la période de retour de différents scénarios de crues, des débits évacuables par les dispositifs EVC dans leur fonctionnement nominal, défaillant ou dégradé et des probabilités d'occurrence liées à des fonctionnements défaillants ou dégradés. Les différents scénarios d'atteinte de la cote de danger sont :

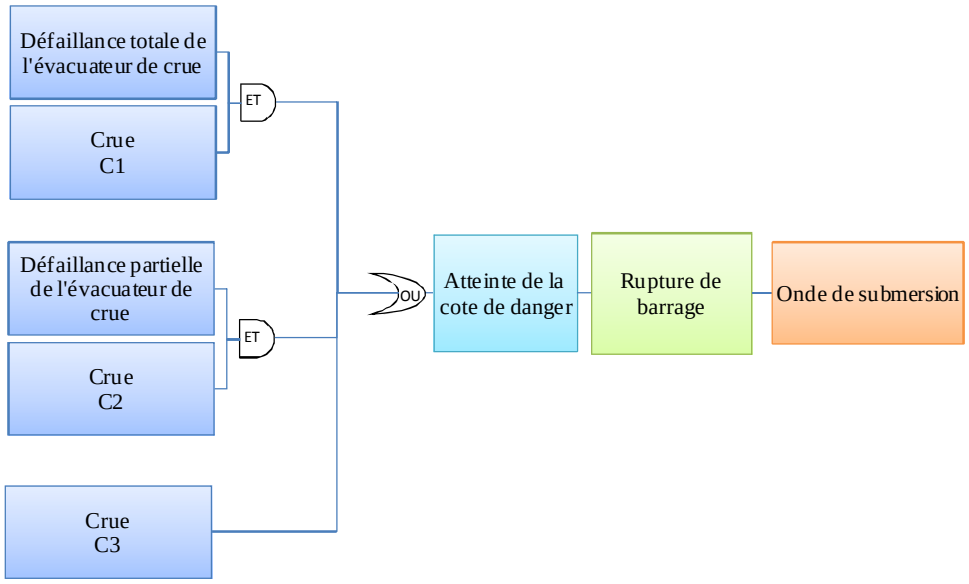
- Défaillance totale de l'évacuateur : en présence d'une crue inférieure ou égale au dimensionnement de l'évacuateur, l'évacuateur ne fonctionne pas dans le délai requis ;
- Défaut de dimensionnement de l'évacuateur : fonctionnement normal de l'évacuateur mais le dimensionnement des évacuateurs est toutefois insuffisant vis-à-vis des caractéristiques (débit, durée, gradient) de la crue (occurrence d'une crue hors dimensionnement de l'évacuateur) ;
- Fonctionnement dégradé de l'évacuateur : l'évacuateur fonctionne dans un mode dégradé ne permettant pas l'évacuation de crues inférieures à la crue de dimensionnement mais permettrait cependant l'évacuation de certaines crues (ouverture partielle ou encombrement de l'évacuateur diminuant le débit évacué).

On peut ainsi définir les crues « C » suivantes associées à une période de retour donnée « T » :

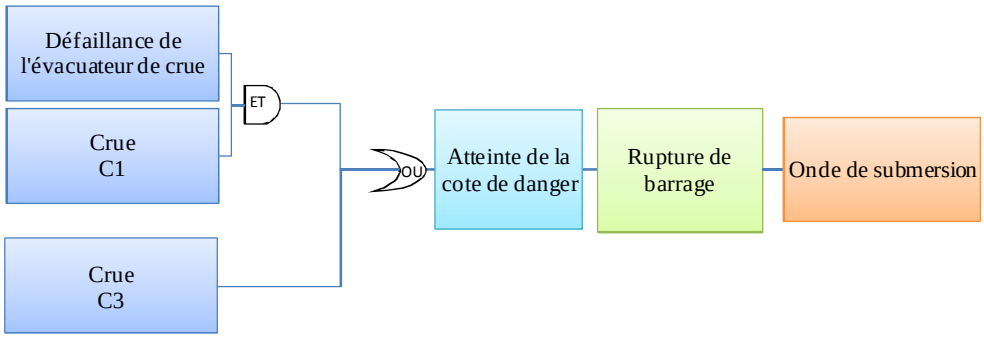
Identification	**Description**	**Période de retour**
C0	Crue ne présentant pas de risque pour l'ouvrage	T0
C1	Crue évacuable par les évacuateurs de crues en fonctionnement normal ou dégradé mais pas en cas de dysfonctionnement total	T1
C2	Crue évacuable par les évacuateurs de crues en fonctionnement normal, mais non en fonctionnement dégradé	T2
C3	Crue non évacuable par les évacuateurs	T3

Tableau 1: Caractéristiques des crues au regard des évacuateurs

Une représentation graphique d'un scénario de rupture de barrage en crue peut donc être la suivante :



La représentation suivante présente un cas simplifié ne prenant pas en compte les degrés de défaillance de l'évacuateur :

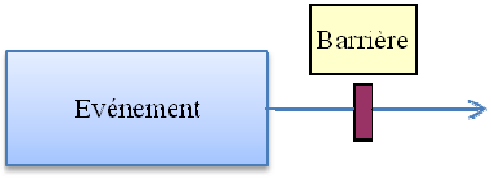


La probabilité des différents scénarios retenue dans le cadre des études de dangers repose en partie sur la probabilité de fonctionnement ou de défaillance des évacuateurs à la sollicitation. Cette dernière, pour être établie, nécessite d'évaluer indépendamment les différents éléments ou équipements constitutif du système d'évacuation des crues (vantellerie, contrôle-commande, communications, alimentations, etc.) puis d'évaluer ce système dans sa globalité.

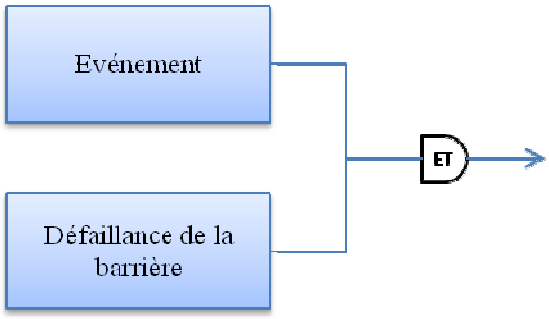
1.3 Rapprochement avec l'approche barrière

L'étape d'« Evaluation des risques » décrite dans le processus de gestion des risques de la norme ISO/CEI 31010:2009 peut s'appuyer sur les nœuds-papillons comme outils de représentation des scénarios d'accident majeurs potentiels. Cette représentation permet de positionner et de visualiser les barrières de sécurité présentes sur le scénario.

La représentation graphique d'une barrière de sécurité intervenant en aval d'un événement est la suivante :



Cette représentation est strictement équivalente à la représentation suivante avec l'introduction d'un opérateur logique « Fonction ET » :



Les barrières de sécurité sont évaluées en performance, car leur fonctionnement influe sur la probabilité d'occurrence des scénarios d'accident considérés. Cette évaluation se fait généralement par la détermination d'un niveau de confiance (NC). Le niveau de confiance traduit la probabilité de défaillance d'une barrière sur sollicitation. Il est déterminé sur la base des méthodes semi-quantitatives développées à l'INERIS et détaillées dans les méthodes Oméga 10 [2] et Oméga 20 [3], applicables respectivement aux barrières de sécurité techniques et humaines.

La représentation graphique d'une barrière peut être rapprochée de la représentation graphique d'une défaillance d'évacuateur, utilisée pour les ruptures de barrages en crue. C'est sur la base de cette constatation qu'une réflexion a été menée afin de déterminer dans quelle mesure les méthodes Oméga 10 et Oméga 20 pouvaient être transposées à l'évaluation des performances des évacuateurs de crue, en adaptant les paramètres qu'elles ciblent pour les barrières de sécurité classiques au cas spécifique des évacuateurs de crue de barrage. Ce travail a mené à la définition de niveaux de confiance, ou fréquences de défaillance sur sollicitation, pour différents types et différentes configurations d'évacuateurs de crue.

Pour cela, les critères de la méthode Oméga 10 ont été appliqués aux éléments techniques et les critères de la méthode Oméga 20 aux éléments humains. On juge ainsi de la conformité des évacuateurs de crue à des exigences de niveau de confiance. La correspondance entre NC, classes de fréquence et probabilités de défaillance à la sollicitation est la suivante :

NC	**Probabilité de défaillance à la sollicitation**	**Classe de fréquence**
NC1	10^{-1}	F1
NC2	10^{-2}	F2
NC3	10^{-3}	F3

Tableau 2 : Correspondance entre niveaux de confiance, probabilités de défaillance à la sollicitation et classes de fréquence

Note : Les méthodes ont été pensées pour les exigences particulières des barrières de sécurité rencontrées sur les installations à risques. Leurs critères ne sont pas tous adaptés aux évacuateurs, et certains ont dû être adaptés.

Remarque sur le fonctionnement dégradé des évacuateurs :
Dans le cas où l'évacuateur fonctionne en mode dégradé (évacuation partielle du débit), la montée des eaux dans la retenue est potentiellement plus lente que lors d'une défaillance totale du système. Aussi, une distinction dans les « degrés » de défaillance du système est parfois faite, ce « degré » influant sur la cinétique de l'accident potentiel.

Par souci de simplification, ce degré de défaillance n'est pas envisagé ici, et un non-fonctionnement optimal de chaque système ou sous-système d'évacuation est considéré comme une défaillance totale. En effet, la modification de la cinétique de montée des eaux ne sera pas systématiquement considérée comme suffisante pour garantir une intervention interrompant la séquence accidentelle, ou une évacuation des personnes réduisant la gravité de l'accident potentiel. Aussi, en première approche, il sera considéré la défaillance des systèmes évacuateurs au sens large, sans faire de distinction entre défaillance totale et fonctionnement dégradé.

2. PRINCIPES D'EVALUATION DES PERFORMANCES DES EVACUATEURS DE CRUES

2.1 Typologie des barrières et des évacuateurs

La typologie des barrières de sécurité reprise dans la figure ci-dessous dépend de la technologie mise en œuvre :

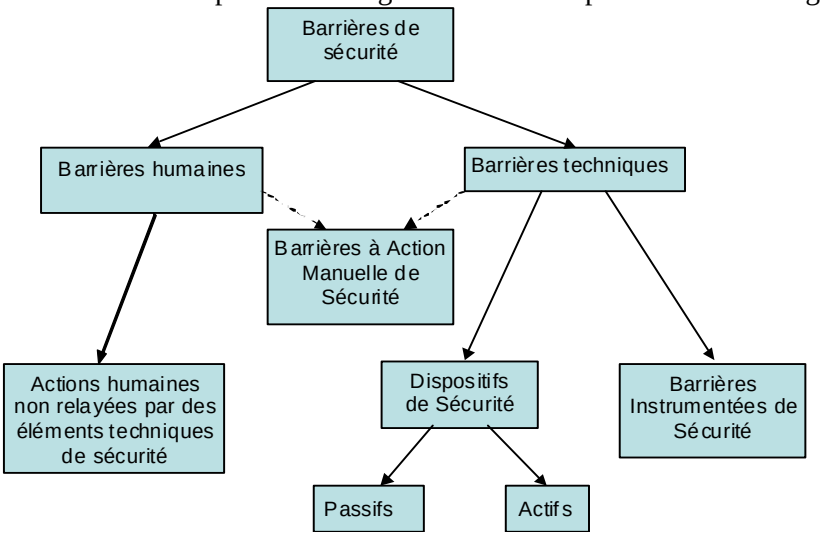


Figure 2 : Typologie des Barrières de Sécurité

Un dispositif passif est défini comme un dispositif ne mettant en jeu aucun système mécanique pour remplir sa fonction et ne nécessitant ni action humaine (hors intervention de type maintenance), ni action d'une mesure technique, ni source d'énergie pour remplir sa fonction.

Les évacuateurs sont généralement différenciés suivant leur fonctionnement : de surface ou en charge.

Afin de correspondre à la classification des barrières techniques de sécurité définie dans les études de dangers, qui permet d'évaluer un niveau de confiance, trois types d'évacuateurs sont définis :

- les évacuateurs passifs ne nécessitant pas d'énergie pour fonctionner ;
- les évacuateurs actifs dont l'énergie d'activation est fournie par la retenue ;
- les évacuateurs instrumentés nécessitant une source d'énergie externe.

Le lien entre les deux typologies est donné dans le tableau ci-dessous :

	Passifs	**Actifs**	**Instrumentés**
De surface	Seuil libre	Systèmes fusibles Systèmes gonflables Vannes/Clapets à flotteurs	Pertuis vannés de surface
En charge	Tulipe Siphons		Evacuateurs vannés de fond ou de demi-fond

Tableau 3 : Typologie des évacuateurs de crues

Les évacuateurs de crues sont des systèmes techniques qui font appel dans de nombreux cas à des actions humaines. Les éléments techniques et humains d'un évacuateur doivent être évalués. Les paragraphes ci-dessous présentent les évaluations de dispositifs techniques. La démarche présentée dans le cadre de cet article doit également être mise en œuvre pour les éléments humains pour être complète.

2.2 Adaptation des critères de performance des barrières de sécurité aux EVC

En préalable à la prise en compte de barrières techniques et humaines de sécurité dans la quantification du risque, trois critères doivent être vérifiés :

- L'indépendance vis-à-vis du scénario (i.e. une crue donnée) doit être assurée. Le bon fonctionnement des évacuateurs ne doit pas être remis en cause par la crue elle-même. Les organes de commande manuelle doivent être accessibles, les organes d'évacuation ne doivent pas être endommagés par les contraintes hydrauliques ou les embâcles.
- L'efficacité est liée au dimensionnement pour le cas des évacuateurs. Les crues inférieures à la crue de dimensionnement pourront être combinées avec un évacuateur dans les nœuds-papillons présentés dans la partie précédente. Les évacuateurs ne sont pas pris en compte pour les crues supérieures à la crue de dimensionnement.
- Le temps de réponse est le temps nécessaire à la mise en œuvre totale de l'évacuateur. Il peut s'agir par exemple du temps nécessaire à l'ouverture d'une vanne. Le temps de réponse doit permettre de mettre en œuvre une action efficace dans un délai compatible avec la cinétique de la crue.

Les évacuateurs de crues peuvent être évalués suivant ces trois critères. S'ils sont respectés, on peut retenir l'évacuateur dans l'évaluation de la probabilité d'accident. Pour cela, on évaluera leur niveau de confiance, suivant l'approche semi-quantitative utilisée pour les barrières de sécurité :

- Le Niveau de Confiance traduit une probabilité de défaillance à la sollicitation de l'évacuateur lors d'une crue. Il est évalué sur des critères de conception et d'exploitation et en fonction de la technologie, de la tolérance aux défaillances, du comportement sur défauts, des possibilités de rattrapage. Le niveau de confiance (NC1 à NC3) sera traduit en classe de fréquence (F1 à F3) de l'événement de défaillance du système pour la prise en compte dans les nœuds-papillons, et in fine la détermination de la probabilité de l'accident potentiel.
- Le maintien des performances dans le temps est obtenu par la maintenance et la gestion des modifications, processus suivis dans un SGS le cas échéant, et est démontré par des tests ou des inspections. Il permet de s'assurer que la probabilité évaluée initialement mais aussi l'efficacité et le temps de réponse sont maintenus dans le temps.

Les méthodes développées donnent des éléments d'évaluation détaillés pour chaque type de barrière et pour chaque type d'action humaine (obtention de l'information, diagnostic, choix de l'action, réalisation de l'action). Des éléments d'appréciation spécifiques doivent être adaptés aux technologies et au contexte d'utilisation. Ainsi, il s'avère nécessaire d'adapter aux différentes technologies d'évacuateur des critères spécifiques. Il apparaît par exemple que l'indépendance et l'efficacité peuvent être fortement corrélées, ou encore que les principes de sécurité positive, essentiels dans l'évaluation des barrières techniques de sécurité, ne sont pas adaptés au contexte des barrages.

3. APPLICATION A QUELQUES TYPES D'EVACUATEURS

3.3 Les évacuateurs passifs

Il s'agit de parties de génie civil du barrage sans partie mobile et ne nécessitant pas d'action humaine, ou automatique de type :

- seuil libre ;
- seuil en crête suivi d'un chenal ;
- siphon ou tulipe (sans amorçage manuel) ;
- seuil labyrinthique (dont déversoir en touches de piano de type PK weir).

D'une manière générale, pour les évacuateurs passifs, l'INERIS propose les éléments d'évaluation du niveau de confiance, ou de la classe de fréquence et de leur maintien dans le temps suivants :

- Contraintes spécifiques : Les contraintes spécifiques à la retenue et à la conception de l'ouvrage et des évacuateurs, notamment en période de crue, doivent être intégrées à l'évaluation. Ainsi, les risques d'embâcles et de coincements de corps flottants (problématiques de tirant d'air) ainsi que les contraintes dues aux écoulements hydrauliques doivent être pris en compte dans le dimensionnement, la conception et la réalisation.

- Maintien dans le temps : les contrôles et inspections périodiques de l'ouvrage doivent couvrir les évacuateurs (valables y compris pour les évacuateurs en charge) et permettre de s'assurer que l'intégrité et la débitance sont maintenues. L'entretien approprié doit être mis en œuvre en fonction de l'analyse des résultats.
- Niveau de confiance : il est proposé d'affecter un NC2 par défaut aux barrières passives qui sera majoré ou minoré de 1 suivant la mise en place de mesures complémentaires ou l'absence de mesures minimales. Les évacuateurs passifs sont généralement considérés comme fiables mais le risque d'obstruction totale ou partielle doit être évalué suivant les spécificités de l'ouvrage et de l'évacuateur. Il n'existe pas de retour d'expérience quantifié permettant d'évaluer leur probabilité de défaillance. Un NC2 ou une classe de fréquence de défaillance associée F2 est admissible pour les évacuateurs si les critères minimaux, permettant de se prémunir contre les causes d'obstruction les plus probables sont respectés et si le maintien dans le temps est assuré. Un NC3 peut être affecté pour des crues largement inférieures à la crue de dimensionnement. Le NC sera limité à NC1 si la justification du maintien dans le temps est incomplète. On retiendra un NC0 si la justification du maintien dans le temps est absente ou si les moyens d'évitement des principales causes d'obstruction ne sont pas mis en œuvre.

3.4 Les évacuateurs actifs

Les dispositifs de sécurité sont des dispositifs autonomes (ne nécessitant ni action humaine ni signal de commande externe) remplissant une fonction de sécurité et pouvant mettre en jeu des éléments mécaniques pour remplir leur fonction. Leur énergie d'activation est généralement fournie par l'événement redouté ou le phénomène dangereux, ici la montée des eaux.

Dans le cas des évacuateurs de crues, il s'agit d'organes mobiles ne disposant pas de commande externe pour fonctionner et dont la source d'énergie est fournie par la retenue lorsqu'elle atteint le seuil d'ouverture du dispositif. Il peut s'agir par exemple de :

- hausses fusibles ;
- boudins gonflables à commande hydraulique ne faisant pas appel à une source d'énergie externe ;
- seuils réglables de type clapet ou vannes secteurs ;
- vannes à flotteurs.

Le guide CFBR [4] sur les évacuateurs de crues les identifie comme « commande hydraulique à partir de la retenue ». Il peut s'agir de simples clapets à contrepoids, s'ouvrant sur la pression de la retenue ou de clapets plus complexes disposant de chambre de réglage et dont les débits d'alimentation et d'évacuation réglables permettent de remplir une fonction de régulation du niveau de la retenue. Les systèmes concernés peuvent inclure des flotteurs, des contrepoids, des capteurs, des dispositifs de verrouillage qui doivent être pris en compte dans l'évaluation.

Les critères minimaux sont les suivants :

Indépendance avec le scénario
De tels dispositifs sont conçus pour fonctionner en cas de crue. Les contraintes spécifiques en période de crues (embâcles, contraintes hydrauliques) doivent être prises en compte dans de la même manière que pour les évacuateurs passifs. Si des actions humaines sont prévues (déverrouillage), il faut s'assurer de la disponibilité des opérateurs et de l'accessibilité en période de crue.

Efficacité
Le dimensionnement doit être évalué de la même manière que pour les évacuateurs passifs.
La résistance aux contraintes spécifiques doit intégrer les éléments qui pourraient empêcher l'ouverture comme :

- un défaut du circuit hydraulique (obstruction, gel du flotteur) ;
- le bouchage des chambres de manœuvre par les débris flottants.

Ces éléments doivent être considérés dans la conception des évacuateurs. Par exemple, l'impact potentiel du gel doit être évalué et si besoin des dispositifs de chauffage mis en place. Dans le cas contraire, la résistance aux contraintes spécifiques n'est pas assurée.

Temps de réponse

Le temps d'ouverture de ces évacuateurs est relativement bref vis-à-vis du scénario de crue, le seuil d'ouverture doit être dimensionné de manière à ce que le temps d'évacuation soit acceptable. Il peut y avoir des dispositifs de verrouillage qui nécessitent une action humaine. Le temps de réalisation d'analyse et de réalisation de cette action doit être pris en compte. Il n'existe généralement pas d'action de secours sur ces évacuateurs en cas de défaut, donc pas de possibilité de rattrapage.

Niveau de confiance

Si les critères minimaux sont respectés, le niveau de confiance peut être évalué. Il est proposé de l'évaluer à partir de l'architecture (redondance), du retour d'expérience et des moyens de diagnostic.

NC ou classe de fréquence	**Tolérance aux anomalies matérielles (redondance)**	
	Eprouvé par l'usage avec diagnostic des défauts	**Non éprouvé par l'usage ou sans diagnostic des défauts**
1	0	1
2	1	2
3	2	3

Tableau 4: Niveaux de Confiance des évacuateurs actifs

La tolérance aux défaillances est le niveau de redondance du système d'évacuation des crues. Si deux clapets ou deux vannes avec ces commandes indépendantes permettent d'évacuer la crue, la tolérance aux défaillances est de 1. Dans le cas général, si un seul dispositif est intégré à l'ouvrage, la tolérance aux défaillances est de 0.

Deux exigences permettent de déterminer quelle règle appliquer pour la tolérance aux défaillances :

- L'équipement **éprouvé par l'usage** est un équipement qui, par son utilisation antérieure dans des conditions d'utilisation similaires, a permis de prouver sa performance (son efficacité et sa fiabilité). Ce concept repose donc sur le retour d'expérience.
- Pour les dispositifs complexes (intégrant capteurs, flotteurs ou chambre de réglage), des moyens de **diagnostic des principaux défauts** doivent être mis en œuvre.

On retiendra un NC1 ou une classe F1 si le dispositif est éprouvé par l'usage et est de conception simple ou comprenant des moyens de diagnostic des défauts. Sinon, l'ouvrage devra disposer de deux dispositifs indépendants pour valoriser une classe F1. Si deux clapets sont disponibles, on pourra retenir une classe F2 pour une crue évacuable par un seul clapet et une classe F1 pour une crue nécessitant l'ouverture des deux clapets.

Le maintien des performances dans le temps est justifié par la réalisation de contrôles périodiques, d'essais périodiques et d'opérations de maintenance préventive ou curative. Le test d'ouverture des dispositifs actifs est rarement possible. Cependant, l'ensemble des organes d'évacuation doit être inspecté périodiquement. Cette inspection doit en particulier s'assurer de l'état des vannes et des clapets et des éléments annexes (flotteurs, contrepoids, etc.). Ces vérifications portent sur l'état général des équipements (corrosion, déformation, déplacement, dégradation) et sur l'encrassement susceptible de bloquer leur fonctionnement. Il faut également s'assurer de l'absence de dispositifs de verrouillage. Enfin, il faut s'assurer que l'ensemble des dispositifs réglables est correctement réglé. La maintenance périodique concerne principalement des travaux d'entretien mineur de type lubrification ou ajustement.

3.5 Les évacuateurs instrumentés

Les évacuateurs instrumentés ou vannés sont assimilables à des barrières techniques instrumentées de sécurité. Ils reposent en effet sur la mise en œuvre d'instrumentation (instruments de mesure, capteurs, automates, relayage, actionneurs) pour créer un système d'acquisition de mesures et de commande. Souvent, la commande d'ouverture des vannes nécessite également une action humaine : ceci permet de se prémunir contre les risques d'ouverture intempestive.

La boucle instrumentée peut être constituée de tout ou partie des éléments ci-dessous :

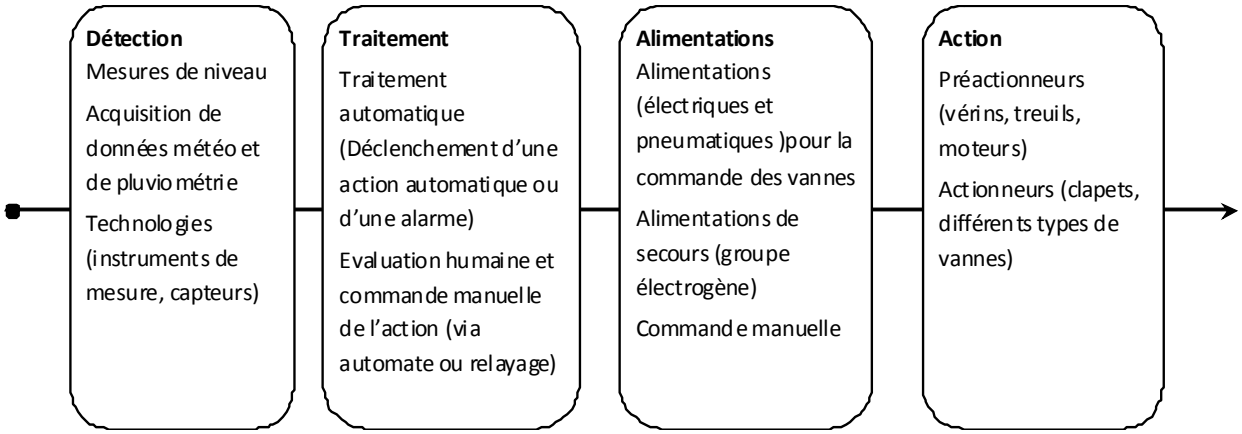


Figure 3 : Eléments constitutifs d'un évacuateur instrumenté

Les critères minimaux doivent être respectés pour retenir l'évacuateur dans l'évaluation des probabilités de rupture de barrage en crue.

Indépendance avec le scénario

Les différents équipements doivent fonctionner même en cas de crue importante. Si des actions humaines sur certains équipements sont prévues dans le fonctionnement normal ou dégradé de l'évacuateur, l'accessibilité à ceux-ci doit être assurée y compris lors d'une crue. Il faut vérifier en particulier :

- que les organes de manœuvre, les systèmes électriques et de contrôle-commande, les accès aux équipements essentiels et de manière générale tous les éléments permettant une intervention sur les organes de sécurité de l'ouvrage, sont installés au-dessus des plus hautes eaux connues ou attendues ;
- que la sûreté intrinsèque d'un ouvrage peut être assurée par l'exploitant, en autonomie et en local (sans apport d'énergie externe), le cas échéant sans système automatisé à sa disposition (en situation dégradée).

Efficacité

Comme pour les autres types d'évacuateurs, l'efficacité est liée au dimensionnement. Les évacuateurs vannés peuvent être des évacuateurs de surface ou des évacuateurs en charge. Le risque et les effets des embâcles doivent être évalués.

La résistance aux contraintes spécifiques doit intégrer les éléments qui pourraient empêcher l'ouverture comme :

- un défaut du circuit hydraulique (obstruction, gel du flotteur, fuite sur circuit hydraulique) ;
- le bouchage des chambres de manœuvre par les débris flottants ;
- les pertes d'alimentation électrique par le réseau.

Ces éléments doivent être considérés dans la conception des évacuateurs. Par exemple, l'impact potentiel du gel doit être évalué et si besoin des dispositifs de chauffage doivent être mis en place. Dans le cas contraire, la résistance aux contraintes spécifiques n'est pas assurée.

Temps de réponse

Le temps de réponse est lié au niveau de confiance que l'on souhaite obtenir. En cas de défaillance des moyens de commande des vannes, une action manuelle doit être mise en place ou les moyens d'action restaurés. Le fonctionnement étant rarement à sécurité positive[2], ces moyens de secours sont nécessaires à l'atteinte du NC1. Le temps de mise en œuvre des moyens de secours est donc dimensionnant pour le temps de réponse.

Le temps de réponse doit être évalué pour la chaîne instrumentée dans son ensemble. Il comprend le temps de réalisation et de transmission de la mesure (qui peut être exprimé par une fréquence), le temps de traitement des données (qui comprend des actions automatiques ou humaines), le temps de réalisation de

[2] Un équipement est dit « à sécurité positive » lorsqu'une perte du fluide moteur (dont électricité) ou des utilités conduit l'équipement à se mettre en situation sécuritaire stable ; la position de sécurité du système doit être maintenue dans le temps.

l'action (temps de manœuvre de la vanne) et le temps de mise en œuvre des actions de secours sur défaut d'un ou plusieurs éléments de la chaîne.

Le temps de réponse des évacuateurs vannés ne permet généralement pas de prévenir la rupture due aux crues soudaines. Pour les crues rapides et lentes, l'évaluation doit être faite.

L'évaluation du respect des critères minimaux permet de dimensionner les crues pour lesquelles l'évacuateur est efficace (dimensionnement, résistances aux contraintes spécifiques, modes dégradés) dans un temps de réponse suffisant. L'évacuateur sera retenu pour l'évaluation de probabilité uniquement pour ces crues.

Niveau de confiance

Le niveau de confiance doit être évalué pour chacun des sous-systèmes de l'évacuateur instrumenté (capteurs, automate, organes de manœuvres, vannes). Le niveau de confiance global correspondra au NC du sous-système le plus faible.

Pour les systèmes instrumentés, on définit normalement une position de sécurité qui est atteignable dans tous les modes d'exploitation du système : en cas de défaillance de l'un des équipements, le système est conçu pour passer en repli dans cette position de sécurité. Du point de vue de la fonction d'évacuation, cette position correspond à l'ouverture des vannes. Il ne s'agit pas d'une position de sécurité dans la mesure où l'ouverture intempestive est l'évènement initiateur d'un scénario d'accident. Le fonctionnement à sécurité positive est difficilement acceptable pour un évacuateur instrumenté.

La conception des évacuateurs instrumentés doit permettre d'atteindre un compromis acceptable entre la fiabilité et le risque d'action intempestive. Plusieurs stratégies peuvent être adoptées :

- Mettre en place des actions humaines de préférence à des actions automatiques. En cas de défaut détecté, d'alarme de franchissement d'un seuil de mesure ou de perte d'alimentation, la décision d'activation des évacuateurs dépendra de l'analyse de la situation sur site. Cette option est acceptable si les crues sont prévisibles, observables et à cinétique lente. Il faut donc s'assurer que la prise de décision et l'action sont toujours réalisables dans des délais acceptables. Ceci peut ne pas être le cas pour des barrages isolés sur lesquels il n'y a pas de présence permanente ou susceptibles de subir des crues soudaines.
- Si des actions automatiques sont mises en œuvre, elles doivent éviter la sécurité positive : le déclenchement automatique sur défaut ou perte d'alimentation induit un risque d'ouverture intempestive qui n'est pas acceptable. En l'absence de sécurité positive, l'atteinte d'un NC1 peut nécessiter de mettre en place d'architecture redondante ou de moyens de secours. Il faut en particulier veiller à la disponibilité de l'alimentation en énergie et/ou disposer d'un moyen d'ouverture manuel des vannes compatible avec le temps de réponse attendu.

Le niveau de confiance est évalué à partir des architectures définies dans le tableau ci-après, tableau adapté pour des fonctionnements à l'émission :

Niveau de redondance	**Niveau de confiance**	
	Pas de diagnostic des défauts	**Diagnostic des défauts et action compensatoire existante**
0	NC 0	NC 1
1	NC 1	NC 2
2	NC 2	NC 3

Tableau 5 : Niveau de confiance maximal pour les équipements des évacuateurs instrumentés

Pour les équipements non programmables, le tableau ci-dessus s'applique. En l'absence de fonctionnement à sécurité positive possible, un diagnostic des défauts, ou une vérification de la réalisation de l'action commandée (fin de course sur une vanne par exemple), doit permettre de mettre en œuvre une mesure compensatoire (action manuelle, seconde voie de commande) dans un délai permettant d'atteindre le temps de réponse acceptable. Dans ces conditions, un NC1 est atteignable pour des systèmes non redondés.
Les automates standards (non certifiés de sécurité) doivent au minimum disposer de moyens de diagnostics des principaux défauts pour que l'on considère qu'ils contribuent à la réduction du risque. Ces diagnostics

doivent couvrir les alimentations, les cartes d'entrée/sortie utilisées pour les capteurs, vannes et alarmes liés à l'évacuateur de crue, l'intégrité des mémoires et des processeurs (ces deux derniers points sont normalement traités par l'automate de façon standard) et permettre de basculer sur un autre moyen de contrôle-commande ou de remettre l'automate en service. Si cette condition est respectée, la seconde colonne du tableau ci-dessus s'applique.

Pour les automates de sécurité, le niveau de confiance retenu sera équivalent au niveau SIL sous réserve que les prescriptions et limites d'utilisation et de maintenance soient appliquées.

3.6 Exemples d'évaluation

Nous présentons ci-dessous les résultats d'évaluation de deux évacuateurs instrumentés :

- le premier cas correspond à une installation ancienne ;
- le second cas correspond à une installation similaire dont les différents équipements ont été fiabilisés.

Un barrage mobile est constitué des 4 passes chacune équipée d'une vanne segment. Les vannes sont manœuvrées par des treuils à chaînes. Lorsque le débit augmente en période de crue, les vannes sont levées progressivement. L'ouverture totale de trois vannes est suffisante pour évacuer la crue de projet. Le tableau ci-dessous présente et compare l'évaluation du NC de la fonction d'évacuation de ces vannes pour deux configurations : l'une de conception ancienne et la seconde fiabilisée. L'évaluation du NC est faite pour chaque élément utilisé pour la réalisation de la fonction. Le NC global est le NC du maillon le plus faible.

	MESURE	**CONTRÔLE COMMANDE**	**ALIMENTATIONS ET UTILITÉS**	**ACTIONNEURS**	**NC GLOBAL**
Installation ancienne non fiabilisée	Un point de mesure testé régulièrement. Alarme sur valeur hors gamme **NC1**	Commandes manuelles centralisées et en local. **NC1**	Redondance des alimentations électriques (Réseau ERDF et groupe électrogène fixe). **NC1**	4 vannes manœuvrées par treuils à chaînes. Avec indicateurs de position **NC2**	**NC1**
Installation ancienne fiabilisée	Redondance des points de mesure avec contrôle des discordances. **NC2**	Commande automatique par automate de sauvegarde plus alarme transmise à l'astreinte. Commande manuelle de secours centralisée. Commande manuelle de l'organe. **NC2**	Redondance des alimentations électriques (Réseau ERDF et groupe électrogène fixe) les deux liaisons électriques sont totalement indépendantes. Protection incendie du local du groupe électrogène. Redondance des liaisons de communication. **NC3**	Chauffage pour permettre les manœuvres en période de gel intense. Procédure de mise en place des batardeaux assurant qu'une seule vanne sera batardée en période de crue. **NC3**	**NC2**

Tableau 6 : Description de deux configurations pour un même système d'évacuation des crues

Dans le premier cas, des modes communs de défaillance peuvent mettre en défaut la fonction d'évacuation des crues. La redondance sur les vannes permettrait d'atteindre un NC2 mais la chaîne de commande limite le NC à 1. Dans le second cas, les redondances et les contrôles mis en place permettent de se prémunir contre une perte de la fonction d'évacuation due à une défaillance unique. La fiabilisation de l'évacuation des crues a nécessité une réflexion sur l'ensemble des équipements mis en œuvre.

4. CONCLUSION

L'intégration des évacuateurs à l'estimation de probabilité de rupture de barrage en crue demande, dans un premier temps, de distinguer les scénarios de crues évacuables par le dispositif, en fonction de son dimensionnement et de son temps de réponse, des scénarios de crues pour lesquels il ne peut pas être retenu comme sécurité. Ces deux types de crues seront deux événements initiateurs distincts ; le second type ayant une période de retour plus importante.

Dans la première configuration, la défaillance de l'évacuateur, associée à l'arrivée de la crue, sera considérée comme un événement initiateur de la séquence accidentelle. On estime dans ce cas que la classe de fréquence de cet événement initiateur peut être rapprochée d'une notion de niveau de confiance.

L'évaluation de ce niveau de confiance peut se faire selon les critères de méthodes développées par ailleurs à l'INERIS, moyennant certaines adaptations : la redondance et la sécurité positive n'étant pas caractéristiques des évacuateurs de crue, on cherchera davantage à valoriser le retour d'expérience et la possibilité de réaliser des actions compensatoires. Aussi, les actions humaines ont une part importante dans la détermination des performances en matière de sécurité des évacuateurs. Elles doivent être évaluées au même titre que les éléments techniques. Si cet article se concentre sur l'évaluation des dispositifs techniques, une démarche similaire doit être mise en œuvre pour ces actions humaines afin que la démarche soit complète.

La fiabilisation d'un système d'évacuation des crues doit s'appuyer sur un référentiel global permettant d'évaluer l'ensemble des éléments techniques et humains sollicités et non de faire porter l'effort uniquement sur les actionneurs ou le contrôle-commande.

RÉFÉRENCES ET CITATIONS

[1] Arrêté ministériel du 12 juin 2008 définissant le plan de l'étude de dangers des barrages et des digues
[2] Omega 10 - Évaluation des Barrières Techniques de Sécurité, consultable sur http://primarisk.ineris.fr
[3] Omega 20 - Démarche d'évaluation des Barrières Humaines de Sécurité, consultable sur http://primarisk.ineris.fr
[4] Guide CFBR « Recommandations pour le dimensionnement des évacuateurs de crues de barrages », juin 2013.

APPORTS DE L'ETUDE DE DANGERS SUR LA CONCEPTION D'UN OUVRAGE

Contribution of the "safety risks assessment" on a new dam design

Pascal BORONAT
EDF-CIH , Savoie Technolac 73373 Le Bourget du Lac cedex
pascal.boronat@edf.fr

Richard GABRIEL
EDF-SEI , 20 place de la Défense, Tour EDF PB6 92050 La Défense
richard.gabriel@edf.fr

MOTS CLÉS :

EDD – risques – maîtrise variations de débit (MVD)

RÉSUMÉ

Le barrage de Rizzanese est situé dans la région de l'Alta Rocca en Corse du sud. Il créée une retenue de 1,3 millions de mètres-cubes et un tronçon court-circuité jusqu'à la centrale de plus de 6 km. Les études d'origine se sont déroulées en 1997 puis la réalisation sur site entre 2009 et 2013. Les études de dangers (EDD) ont pour leur part débuté en 2008 à EDF et décision a été prise de rajouter le barrage de Rizzanèse, en cours de construction à la liste des ouvrages à étudier. L'EDD étudie l'ensemble des risques pouvant provenir d'un ouvrage, tant à l'amont qu'à l'aval et dans les différents modes d'exploitation. L'étude de dangers de Rizzanese a mis en évidence 5 événements redoutés centraux (ERC). Les quatre premiers, relatifs à la solidité de l'ouvrage, sont ressortis avec une très bonne criticité (occurrences « E : extrêmement improbable » et « D : très improbable »). Le dernier traitant de la maîtrise des variations de débit à l'aval présentait, quant à lui, une occurrence B (probable) qui a généré la reprise de conception pour la mise en œuvre de mesures spécifiques. Cet exemple montre ainsi les améliorations apportées par la démarche EDD sur la conception d'un ouvrage neuf, notamment en termes de mise sous contrôle du risque exploitation.

ABSTRACT

Rizzanese dam is located in south Corsica. The reservoir volume water is about 1,300,000 cubic meters and the area downstream the dam down to the power station is more than 6 kilometers. Original studies were made in 1997but the erection have been done between 2009 and 2013. On the other hand, the "safety risks assessments" have begun at EDF since 2008 and it was decided in 2009 to add the Rizzanese dam to the list of danger studies even though its construction had begun by this time. The risks assessment of Rizzanese dam revealed 5 "central bad events". The 4 first ones, which were about dam construction strengh, were quoted with a very good criticity (possibilities "E : extremely improbable" and "D : very improbable"). The last event, about the downstream flow control, had, for its part, a "B" criticity (probable) which has needed some new studies for specific treatment. This example has shown the improvement with the safety risks evaluations for the design of a new dam, particularly for controlling the operation risks.

1. PRESENTATION DE L'OUVRAGE

1.1 Situation

L'aménagement du Rizzanese, situé dans la région de l'Alta Rocca, équipe le tronçon du Rizzanese entre les altitudes 541 NGF et 110 NGF. Le barrage se situe à la confluence des affluents du Codi et du Saint Antoine. Il crée une retenue de 1,3 millions de mètres-cubes, à la cote de « retenue normale » (RN), soit 541,00 m NGF et couvre une superficie de l'ordre d'une dizaine d'hectares.
Les ouvrages de chute (galerie de 5800 m et conduite forcée de 1245 m) permettent de dériver les eaux afin de les turbiner environ 420 mètres plus bas à l'usine implantée au pied de la commune de Sainte Lucie de Tallano.
L'usine est équipée d'un bassin de démodulation dont le but est de permettre la meilleure utilisation possible de la chute lors des pointes de consommation.
Le tronçon court-circuité, situé entre le barrage et la sortie du bassin de démodulation de l'usine est d'une longueur de plus de 6 km.

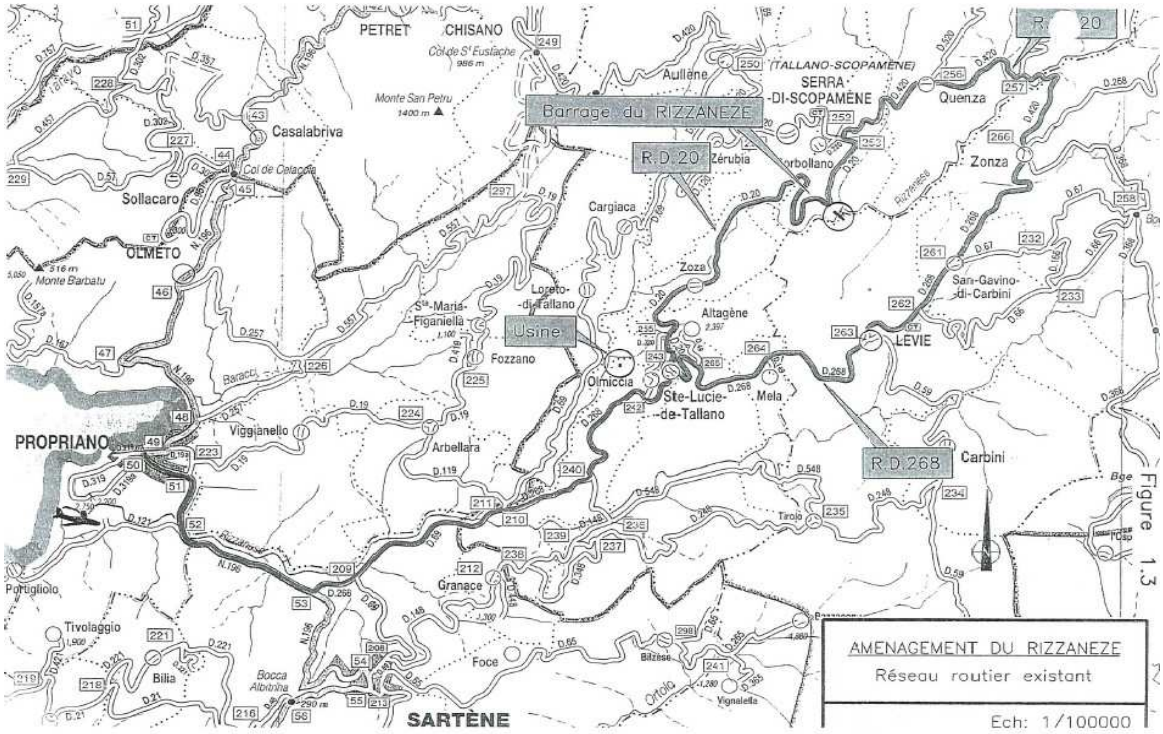


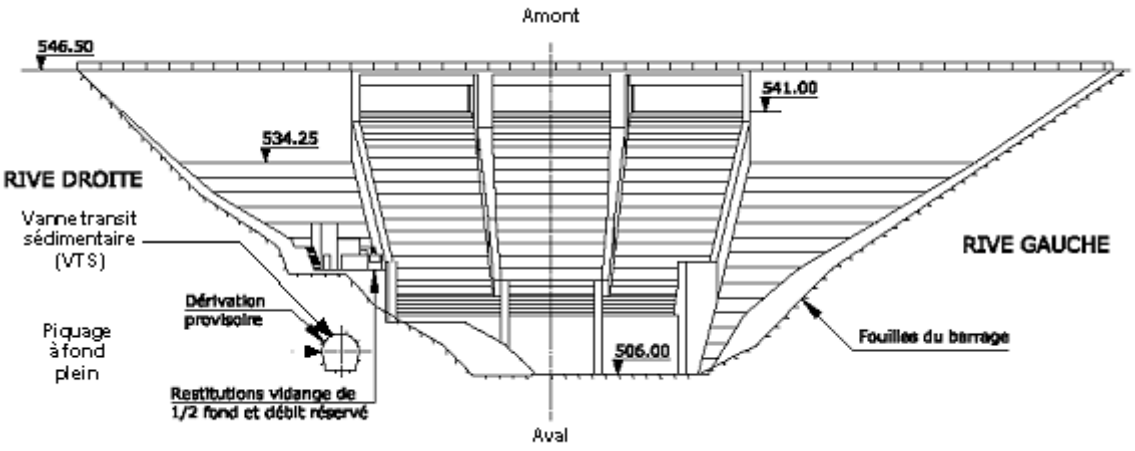
Figure 1.3

1.2 Description du barrage

Le barrage du Rizzanèse a les caractéristiques suivantes :

- Barrage poids en BCR (Béton Compacté au Rouleau), créant une retenue d'un volume utile d'environ 1 Hm3 pour 1,3 Hm3 brut à la cote 541 m NGF
- Déversoir à seuil libre d'une capacité d'évacuation de 1090 m3/s
- Vanne de vidange de demi-fond de type segment calée à la cote 521,60 m NGF d'une capacité d'évacuation de 39 m3/s à cote de RN
- Vanne de débit réservé permettant de restituer 365 l/s en pied de barrage
- Prise d'eau avec grilles et batardeau (cote radier = 522 NGF) d'entrée galerie.
- Vanne de transit sédimentaire et sa vanne de garde calées à la cote 512 m NGF d'une capacité d'évacuation de 280 m3/s à cote de RN.

Nota : en cours de réalisation, la mise en conformité du barrage avec la nouvelle loi sur l'eau pour sa partie relative au transit sédimentaire a justifié la mise en œuvre d'une vanne de transit sédimentaire. Cette dernière a été installée en sortie de galerie de la dérivation provisoire et a fait l'objet d'un APD et d'un marché séparés. Sur un ouvrage à faible volume comme celui de Rizzanese, elle permet également d'améliorer la sûreté et la performance en évitant ou limitant fortement l'accumulation sédimentaire.



1.3 Principes d'exploitation

Le barrage de Rizzanèse est un aménagement fonctionnant en éclusées. Comme tous les ouvrages de production hydraulique, il fonctionne selon deux modes d'exploitation distincts :

Exploitation normale (hors crue)
Les deux groupes de la centrale de Rizzanese sont téléconduits depuis le dispatching d'Ajaccio qui a également en charge l'équilibre "offre-demande" et la conduite du réseau HTB (gestionnaire du Système). Hors période de forte hydraulicité, la centrale de Rizzanese doit donc répondre aux pointes de consommation d'électricité sur le réseau d'EDF Corse. Le débit maximum turbinable est de 15 m3/s à puissance maximale (55 MW).
Par ailleurs et dans la mesure du débit entrant, les 365 l/s du débit réservé sont restitués par un petit groupe de production situé en pied du barrage. Un secours est prévu par une vanne de restitution.
Dans ce mode d'exploitation, la vanne de transit sédimentaire est consignée fermée.

Exploitation en crue
L'évacuation du débit entrant dans la retenue peut être complètement assurée par l'évacuateur à déversoir libre. La consigne d'exploitation en période de crue prévoit cependant la possibilité d'utiliser la vanne de demi-fond et celle de transit sédimentaire dès l'état de veille dans le cadre de l'abaissement de la retenue à des fins de préparation du transit sédimentaire. L'objectif étant aussi d'éviter les dépôts en amont des organes de fond. La manœuvre de ces organes se fait par un opérateur selon des modalités précises incluant des paliers.

1.4 Contrôle commande initial du barrage

Le besoin initial (APD de 1997) en termes de contrôle commande barrage était :

- Les installations du site du barrage ne nécessitent aucune action à distance,
- L'automatisme de la vanne de demi-fond est réalisé sur la base de relayage électromécanique. Toutes les commandes sont locales.
- La vanne de débit réservé est pilotée par un régulateur de débit prenant en compte le débit entrant et le niveau de la retenue.
- Les informations importantes et alarmes sont transmises du barrage à la centrale de Rizzanèse par un câble fibres optiques.

La révision des études en 2008 a conduit aux ajouts suivants :

- La mise en place d'un Automate Programmable au Barrage (APB) pour calculer les débits entrant et sortant de la retenue, piloter un petit groupe de turbinage du débit réservé (la vanne initiale de débit réservé est conservée en secours) et assurer la consignation d'état du site.
- La création d'une fonction "vague d'alerte" pour limiter les risques inhérents aux débits transités par le déversoir qui peuvent être importants. La vague d'alerte sera également gérée par l'APB en fonction d'un certain nombre de paramètres (cote, gradient de débit entrant, perte du débit sortant par l'usine etc.).
- La création d'une vanne de transit sédimentaire et de sa vanne de garde (commandées à partir de relayage électromécanique).
- Le doublement de la voie de communication réalisée par la fibre optique par un faisceau Hertzien propriétaire redondant.

2. APPORT DE L'ETUDE DE DANGERS DE RIZZANESE

2.1 Contexte

EDF s'est organisée en mode projet de 2008 à 2014 pour produire les premières études de dangers (EDD) de tous les barrages concernés. Les barrages classés A au sens du décret 2007-1735 ont été priorisés par rapport aux barrages classés B. Dans le cadre de cette campagne et à la demande du Préfet, le barrage de Rizzanèse a fait l'objet d'une EDD priorisée alors qu'il n'était pas encore construit. Cette EDD a par ailleurs été réalisée alors que tous les marchés de génie-civil et de matériels mécaniques étaient déjà contractualisés et que ceux des installations électriques et de contrôle-commande étaient en cours de consultation sur l'ensemble de l'aménagement. Les principes d'exploitation prévus initialement pour la conception de l'ouvrage devaient être encore précisés ou complétés avant la mise en service de l'ouvrage.

2.2 Synthèse de l'EDD

L'Etude de Dangers, dans sa phase de conception, a mis en évidence les 5 Evénements Redoutés Centraux suivants :

Pour la fonction « Retenir l'eau »

- Rupture du barrage (ERC 1)
- Rupture de la vanne segment de transit sédimentaire (ERC 2)
- Rupture du piquage sur la dérivation provisoire (ERC 3)
- Rupture de la vanne de demi-fond (ERC4)

Pour les fonctions « Maîtriser le débit relâché à l'aval » et « Maîtriser la cote du plan d'eau amont »

- Non-ouverture de la vanne de demi-fond (ERC5) pour réaliser une vague d'alerte sur arrêt ou déclenchement de la centrale

L'analyse faite des occurrences et gravités peut se résumer ainsi :

- pour la fonction « retenir l'eau » :
Le risque « rupture barrage » (ERC1) a été coté en occurrence « E » (extrêmement improbable) avec une gravité exprimée en analogie avec crue naturelle supérieure à la crue millénale.
Les 3 autres risques (ERC2 à 4) ont été coté en occurrence « D » (très improbable) avec une gravité inférieure à la crue décennale.

- pour la fonction « Maîtriser le débit relâché à l'aval :
Le risque « non ouverture de la vanne de demi-fond » (ERC5) a été coté en occurrence « B » (probable) avec une gravité exprimée en analogie avec crue naturelle inférieure à la crue décennale.

Le risque de non-ouverture de la vanne de demi-fond pour réaliser une vague d'alerte sur arrêt ou déclenchement de la centrale a été jugé d'une criticité suffisante (occurrence et gravité) durant les périodes de forte fréquentation, s'agissant d'une région touristique, pour générer l'engagement suivant :

- « Mise en place d'une motorisation de secours, indépendante, pouvant être pilotée par une sécurité intrinsèque, indépendante (NTH : RN – 20 cm) afin de palier le risque d'une non ouverture de la vanne de demi-fond par l'automatisme principal pour réaliser une vague d'alerte, avant la mise en service de l'aménagement ».

Ces dispositions de réduction des risques concernant l'ERC 5 (cf. §3)s ont permis de remettre une EDD au Préfet avec une occurrence des risques cotée en « D » (Très Improbable).

A noter suite à une évolution de l'évaluation des conséquences au travers de la combinaison des occurrences réalisée par la suite au niveau du projet EDD réduit aujourd'hui cette occurrence « D » en occurrence « C » (improbable) pour ce même ERC5. En effet, à ce jour, la combinaison dans un ERC de B « ET » B est cotée en C et non plus en D.

3. SYNTHESE ET ETUDES REALISEES

3.1 Synthèse du fonctionnement avant EDD

Le barrage, équipé d'un déversoir, ne nécessite aucune action humaine pour passer une crue. La vanne de demi-fond qui l'équipe sert en premier lieu à la sécurité de l'ouvrage (vidange partielle) et éventuellement à la restitution d'un débit par précaution durant la période de veille et à une vague d'alerte avant le déversement.

C'est le fonctionnement de cet organe qui a été approfondi lors de l'EDD. A noter que les consignes d'exploitation n'existant pas encore à ce moment, l'EDD a servi également de donnée d'entrée à l'établissement de ces dernières.

Le fonctionnement de la vanne de demi-fond prévu avant l'EDD (études initiales de 1997 et complément de 2008 pour la consultation) était le suivant :

- Alimentation en énergie de la vanne par les installations BT du barrage composées : pour l'alimentation « normale » d'un abonnement commercial et pour le secours d'un groupe électrogène dédié.
- Manœuvre manuelle de la vanne de demi-fond en local depuis le barrage. Pour la connaissance du débit transité, l'exploitant dispose des informations de débit calculées par l'APB et du niveau de la retenue.
- Manœuvre automatique de la vanne jusqu'au premier cran (débit limité) par un ordre de l'APB qui calcule le risque de déversement, dans un délai compatible. Pour définir les conditions de déclenchement d'une vague d'alerte, il était alors prévu de se baser sur la connaissance du débit entrant d'une part et du débit sortant en exploitation normale d'autre part.

Nota : à ce moment du projet, les calculs de débit entrant étaient prévus par la mesure de débit au niveau des deux affluents du Rizzanese, le Codi et le Saint-Antoine. Pour le débit sortant en exploitation , la remontée du débit transité par l'usine était remontée par les liaisons télécoms. Les conditions de manœuvre automatique de la vanne de demi-fond restaient encore à définir.

3.2 Compléments d'études pour la sécurisation de la vague d'alerte

L'EDD ayant conclu à la nécessité de compléter l'action sur la vague d'alerte jugée sensible avec un engagement d'EDF sur sa réalisation avant la mise en service, il a été décidé de réaliser les actions suivantes :

- Renforcer l'anticipation de la vague d'alerte par de nouvelles conditions programmées au niveau de l'automate, notamment en entrant une notion d'autonomie avant déclenchement (connaissance fine des débits et de la courbe de capacité de la retenue). Le fonctionnement finalement retenu a été le suivant : Temps avant déversement inférieur ou égal à 2 heures.
- Mettre en œuvre un système d'ouverture supplémentaire pouvant intervenir en cas de panne de l'alimentation électrique de la commande de la vanne. Ce dernier a été réalisé à l'aide d'un accumulateur et d'un vérin spécifique d'une course maximale de 1/10 de l'ouverture totale de la vanne, laissant le temps à la vague d'alerte de se diffuser avant le passage de l'eau par le déversoir,
- Conditionner la manœuvre de la vanne par ce dispositif à l'action une poire de niveau haut permettant, en cas de dysfonctionnement du système de commande principal, la génération de la vague d'alerte,
- Réaliser un bridage mécanique au niveau du vérin de commande de la vanne de demi-fond afin de ne pas dépasser la valeur autorisée pour la vague d'alerte qui aura été définie par des essais en rivière.

3.3 Essais de vague d'alerte

Outre la mise en œuvre des éléments de sécurisation du dispositif de vague d'alerte, il s'agissait également de « calibrer » la vague d'alerte. Ce point a donc été réalisé en juin 2012 en vérifiant les conditions en rivière d'un lâcher, estimé par calcul, d'une valeur de 2,5 m3/s en 6 points jugés les plus "à risque" du linéaire court-circuité (accès facile, fréquentation, …) dont l'accès à l'aval immédiat du barrage.

A noter toutefois que si la vague d'alerte est nécessaire à certaines périodes de l'année (pêche…), elle peut aussi, dans certaines configurations de très faible débit (quelques centaines de litres par seconde), notamment en été, présenter un caractère risqué par la différence de débit instantané. Ce point est toujours en phase de définition au niveau d'EDF.

4. CONCLUSION

L'EDD a ainsi permis de se réinterroger dès la phase de conception en critiquant certains éléments sur la base d'une analyse de risques fondée sur une approche fonctionnelle, regroupant maîtrise d'œuvre et futur exploitant. Ce qui est aussi un des fondements des exigences de la doctrine EDF applicables aux ouvrages et matériels importants pour la sûreté hydraulique (OMISH).

En matière de vague d'alerte, il apparait que le principe qui avait été imaginé lors de l'EDD, censé pouvoir couvrir tous les cas, est finalement assez délicat à mettre en œuvre. Il fait d'ailleurs l'objet d'un réexamen dans le cadre de l'actualisation de l'EDD, en cours actuellement.

Nota : cette actualisation de l'EDD, précède ainsi la revue de sûreté de l'ouvrage programmée en 2017 (5 ans après la 1ère mise en eau).

Le résultat définitif d'exploitation de cette vague d'alerte fera l'objet d'une nouvelle communication le cas échéant.

5. REMERCIEMENTS

Nous remercions tous ceux qui ont participé à l'EDD de Rizzanèse et notamment Daniel Pignier (pilote de l'EDD), Pierre Carlioz (vérificateur GC et responsable des études générales dans le cadre du Projet Rizzanese) et Marc Delort (vérificateur électromécanique).

QUAND LA REGLEMENTATION EN MATIERE DE SECURITE DES OUVRAGES HYDRAULIQUES CONDUIT A METTRE EN ŒUVRE DES TECHNOLOGIES INNOVANTES

When dam safety regulations pave the way for technological innovation

Frédéric GUILLOT
SUB-C MARINE, 18 rue Alfred Nobel - BP 24 - 69320 FEYZIN
+33 (0)4 72 89 03 88
fg@subcmarine.com

MOTS CLÉS

ROV, caméra acoustique, inspection subaquatique, scanner, sonar, examen technique

RÉSUMÉ

La réglementation en matière de sécurité des ouvrages hydrauliques, les conditions d'intervention variables, les besoins de résultats probants ont nécessité la mise en œuvre et le développement de technologies innovantes dans le domaine de l'inspection subaquatique, notamment pour l'examen de la vantellerie immergée.
Pour l'ensemble des contrôles, plusieurs contraintes ont dues être prises en compte :
- Assurer un niveau de sécurité pour les intervenants humains en supprimant ou limitant les risques en intervention hyperbare,
- S'affranchir des contraintes de turbidité de l'eau
- S'affranchir des contraintes de travaux en Profondeur d'intervention
Pour mener à bien ces investigations, nous avons donc développé tout un panel de moyens pour gérer toutes ces contraintes. Pour assurer la sécurité et qualité d'interventions en profondeur et en milieu confiné, il a fallu mettre en œuvre des systèmes s'appuyant sur la robotique sous-marine spécialement équipée de moyens de vision acoustique sous forme de scanner 2D et caméra acoustique.
Nous partagerons notre retour d'expérience, permettant ainsi de présenter les moyens modernes basés sur la vision acoustique : Caméra acoustique 2D, Scanner 2D, Imagerie scanner 3D …
Pour présenter ces moyens, l'article illustrera les résultats d'examen d'entonnement de vidange, de vanne de fond, de grille (état, encombrement, piégeage de matières organiques, envasement de conduite,…

ABSTRACT

Dams and hydraulic structure safety regulations, variable intervention conditions and the need for conclusive results have led to the implementation and development of innovative technologies for underwater inspection, in particular to examine submerged gate and valve systems.
To thoroughly investigate all the points to be checked, several limiting factors have to be addressed:
- Guarantee human safety for diving crews by eliminating or mitigating hyperbaric risk
- Be able to work properly despite turbidity
- Be able to conduct works correctly and securely in deep water conditions
To carry out underwater investigations, we have developed a full spectrum of methods and instruments to overcome all this. To ensure safety as well as quality interventions in deep water and in confined environments, the systems had to be based on underwater robotics, specially equipped with acoustic imaging technologies; i.e. 2D imaging sonars and acoustic cameras.
We wish to share the lessons we have learned by presenting some of the latest acoustic imaging methods used: 2D-mapping acoustic cameras, 2D imaging sonars, 3D sonar imagery...
To describe them, this article illustrates the results obtained when inspecting bell-mouth outlets, bottom outlets, bar screens (condition, obstruction with debris, trapped organic matter, pipe silting, etc.).

1. INTRODUCTION

La réglementation en matière de sécurité des ouvrages hydrauliques a évolué depuis le décret de décembre 2007 et permet dans le cadre des revues de sureté d'engager sans dérogation des examens des parties habituellement immergées sans vidange de la retenue. Proposer dans le cadre des Examens Techniques complets et de travaux de surveillance sur les ouvrages immergés, la réponse aux inspections par vidéo télévisuelle n'est plus suffisante en regard des attentes de chacun.

Compte tenu que la qualité des eaux varie selon les lieux, fleuves, rivières, retenues…, il a fallu développer de l'instrumentation spécifique pour palier à la turbidité variable des cours d'eau et répondre aux exigences des maitres d'ouvrage et des autorités de surveillance des ouvrages pour ausculter les parties immergées de barrages, ports, canaux, et galeries.

Pour cela, la technologie s'appuyant sur de l'imagerie acoustique permet de travailler dans des eaux totalement turbides et fournir de l'imagerie de grande qualité. Les outils acoustiques se présentent sous forme de caméra 2D et 3D ainsi que de scanners 2D et 3D.

Combiné à de la robotique filoguidé, les conditions d'intervention ont sensiblement évolué quant à leur qualité de rendu, les limites d'interventions, que cela soit en temps de travail mais également en profondeur et distance (pour les galeries).

La sécurité des opérations d'inspection s'est ainsi améliorée, puisqu'elle ne nécessite moins d'intervention humaine en milieu hyperbare dans le cadre de ces travaux d'inspection. Toutefois, les données recueillies par ses moyens particuliers de vision apportent des informations primordiales pour les travaux en milieu hyperbare par la pertinence des images sur plus ou moins grande échelle, dans un milieu rendu hostile par la turbidité de l'eau ou de zones confinées. C'est une nouvelle approche qui peut être envisagée combinant une vision globale et/ou ciblée par des techniques robotiques et acoustiques et des examens ciblés par scaphandriers.

Un champ d'application de surveillance des ouvrages immergés particulièrement concerné par ce type de travaux, est celui de la vantellerie. En effet, par exemple, les écluses sur les canaux sont souvent des milieux difficiles à appréhender du fait de leur situation sur des cours d'eau troubles comme la Seine, le Rhin, le Rhône ….

Les tabliers (ou obturateurs) des vannes ou vantelles, les grilles, les parties immergées des commandes d'organes rentrent pleinement dans le champ d'application de l'inspection par imagerie acoustique.
Selon les cas, l'inspection sur les organes de vantellerie portera sur différents axes, selon le but recherché. On peut vouloir connaitre l'état d'envasement, la présence d'embâcles au droit des prises d'eau et des pertuis. Dans ce cadre, on se situe dans de l'inspection d'ordre environnementale et fonctionnelle et sur grande échelle.
On peut également faire de l'inspection de type visuel plus rapprochée, voire du contrôle non destructif sur les organes de vantellerie comme les écluses, les vannes, les rainures, les grilles ….
Chaque besoin répond à une mise en œuvre de moyens acoustiques appropriés détaillés dans la suite de l'article.

2. LES TECHNIQUES « CLASSIQUES »

Classiquement les inspections subaquatiques sont menées par :
- scaphandrier équipé d'une caméra avec retour vidéo,
- ROV de deux familles de dimension : mini-ROV et ROV équipés pour la plupart de caméra couleur haute définition et caméra noir & blanc haute sensibilité.

Hormis les techniques associées de positionnement ou localisation, chacune de ces techniques présente ses propres avantages et inconvénients mais deux points particuliers restent en commun :
- méthode très sensible à la turbidité des eaux qu'elle soit existante ou provoquée par les mouvements ;
- un champ de vision réduit du fait de la nécessité de se maintenir à proximité des points à inspecter pour garantir une qualité d'image suffisante.

Ces méthodes continuent d'évoluer tant du point de vue matériel optique que du matériel porteur.

Pour les inspections d'organe de vantellerie, elles permettent l'examen de détail des composants : brimbales, rainures à batardeau, tablier de vanne, état de revêtement… A titre d'exemple, les mini–ROV permettent d'accéder à des zones d'accès restreint : passage par les trappes à batardeau ou au travers de barreaudage étroit.





Images 1 et 2 : examen de brimbale et de rainure à batardeau



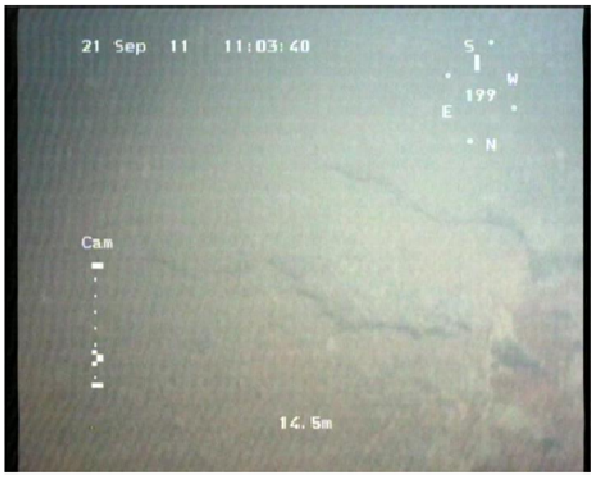


Image 3 : exemple de défaut sur une conduite (corrosion feuilletante)

3. LES TECHNIQUES ACOUSTIQUES

3.1 Caméra acoustique 2D

3.1.1 Possibilité d'investigation

La caméra acoustique 2D donne une vision en temps réel de la zone d'investigation. Cette caméra est généralement embarquée sur robot télé-opéré ce qui permet de se positionner dans des axes privilégiés, ou de s'introduire dans les parties d'ouvrages tel que les conduites.

Elle offre une image très fine de la surface, de la texture des appareils inspectés, et le personnel qualifié peut interpréter de façon fiable les observations.

Ce procédé offre également la possibilité de faire de la détection de fuite. Le système acoustique détecte les variations de densité et température du fluide, les microbulles, les mouvements de particules.

Dans le cas concret ci-après, les fuites sur les seuils de vannes sont repérées par le panache formé par les microbulles.

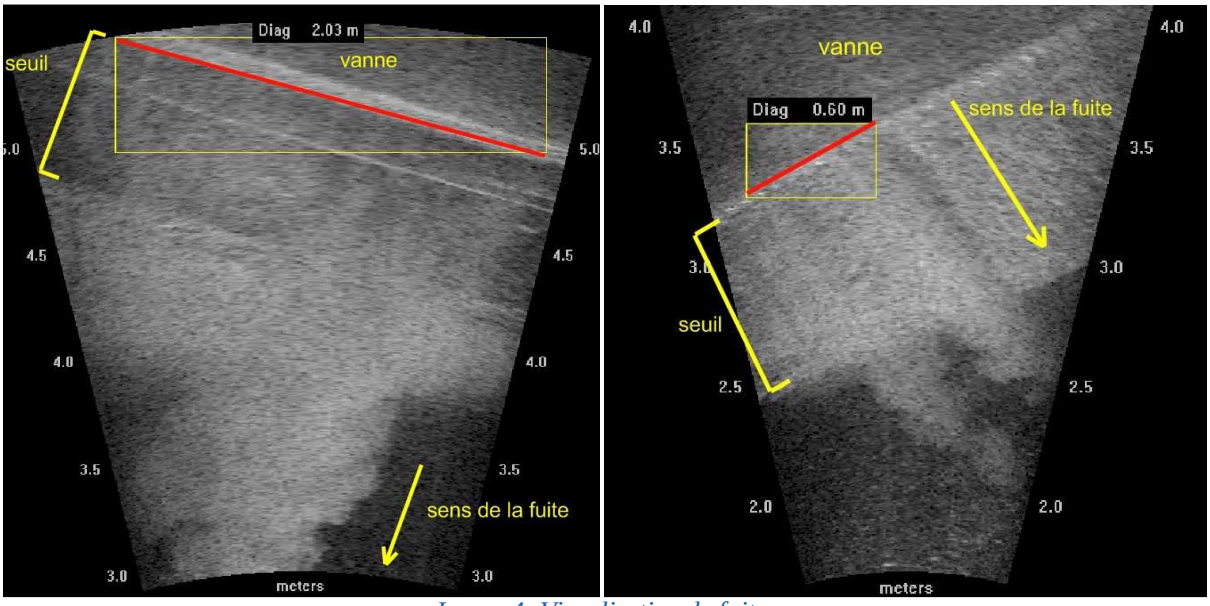


Image 4: Visualisation de fuite

Le champ de vision peut s'étendre de 1,5m à 20m permettant d'avoir soit des vues d'ensemble, soit des vues de détail



Image 5 : caméra acoustique 2D montée sur ROV

3.1.1 Le principe de la technologie

Tous les moyens acoustiques présentés reposent sur le même principe de diffusion du son dans l'eau. Chaque appareil a ses propres émetteurs et capteurs, fréquence d'émission du son, et logiciel de traitement des données qui transformeront les signaux en imagerie acoustique.

3.1.1 Exemples d'applications & rendus

Les extraits d'investigations présentés ci-après permettent d'illustrer les différentes possibilités offertes.

Dans l'examen d'une grille anti embâcle, on peut déceler la déformée de barreaux, et la présence d'éléments bloqués entre barreaux.

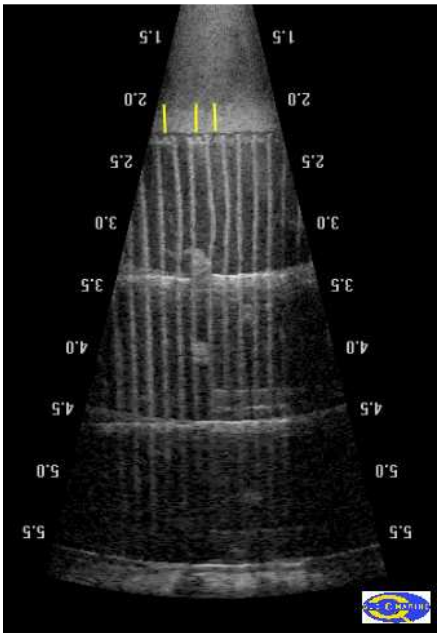


Image 6 : Vue générale d'une grille avec quelques défauts

L'exemple suivant permet de comparer la vue par imagerie et l'ouvrage réel – les défauts de la structure génie civil au droit de la rainure à batardeau sont très bien détectés

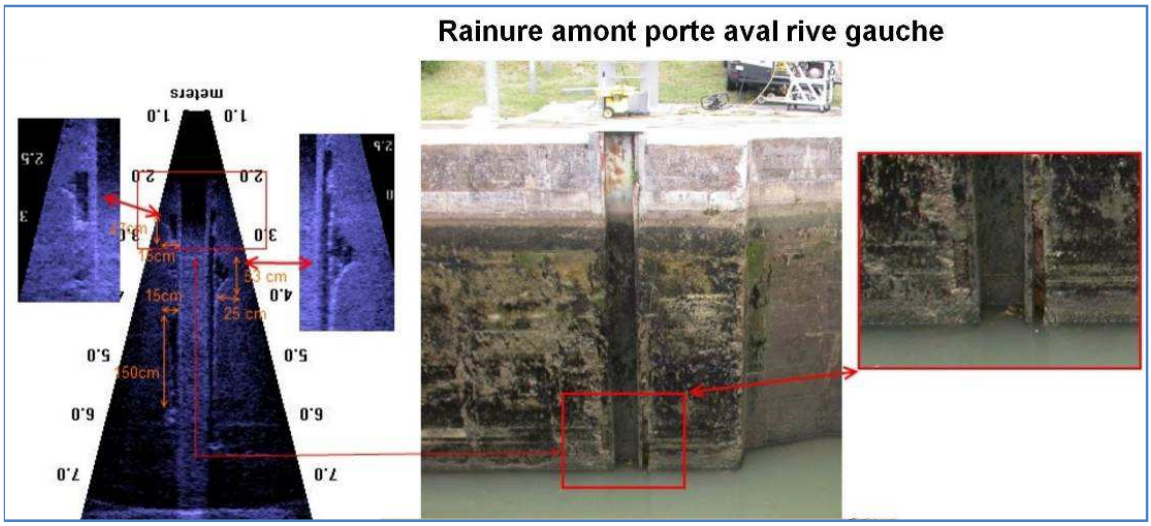


Image 7 : Examen d'écluse

Un examen d'une partie de vantellerie de taille plus modeste : une crépine pour laquelle on peut examiner son état d'obturation

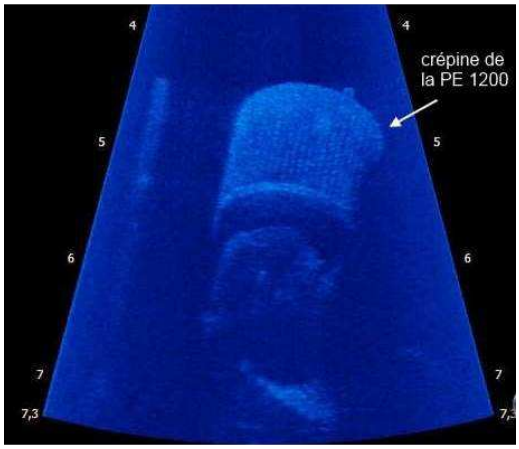


Image 8 : détail d'une crépine

Les investigations peuvent porter sur l'intérieur des conduites pour lesquelles il est possible d'identifier d'éventuels dépôts et concrétions. L'examen peut se poursuivre sur les éléments de vannes

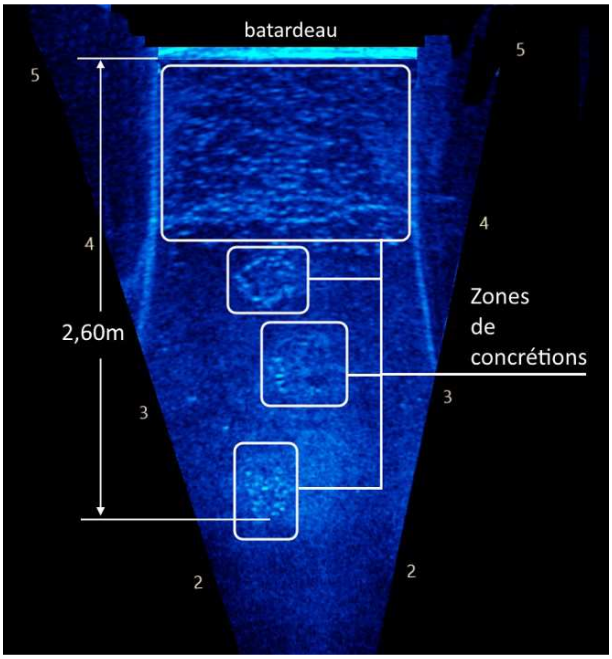


Image 9 : Intérieur d'une conduite

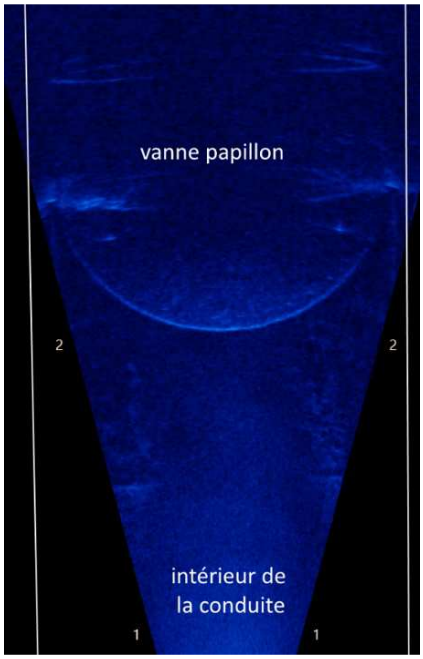


Image 10 : Vanne papillon

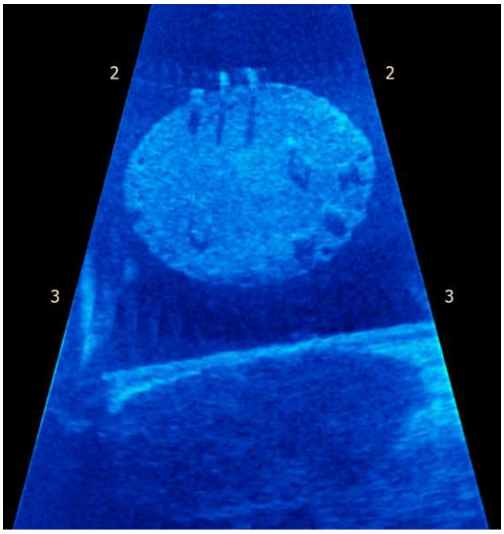


Image 11 : Plaque pleine d'obturation d'une conduite

3.2 Imagerie par scanner 2D

3.2.1 Possibilité d'investigation

Le scanner 2D apporte des visions élargies de tout ou partie d'ouvrage et permet d'appréhender la structure immergée afin de localiser les vannes, pertuis et grilles mais aussi de visualiser l'état d'envasement et encombrement de ces organes. Sa haute résolution permet d'obtenir des images de type photos numériques. Tous les désordres, caractéristiques de l'ouvrage peuvent être localisés, géo-positionnés. Le post-traitement permet de reconstituer par le biais de clichés successifs la reconstitution de l'ouvrage complet.



Image 12 : scanner 2D et 3D

3.2.2 Exemples d'applications & rendus

En post traitement, il est possible de reconstituer un mur guideau et de positionner les équipements de vantellerie.

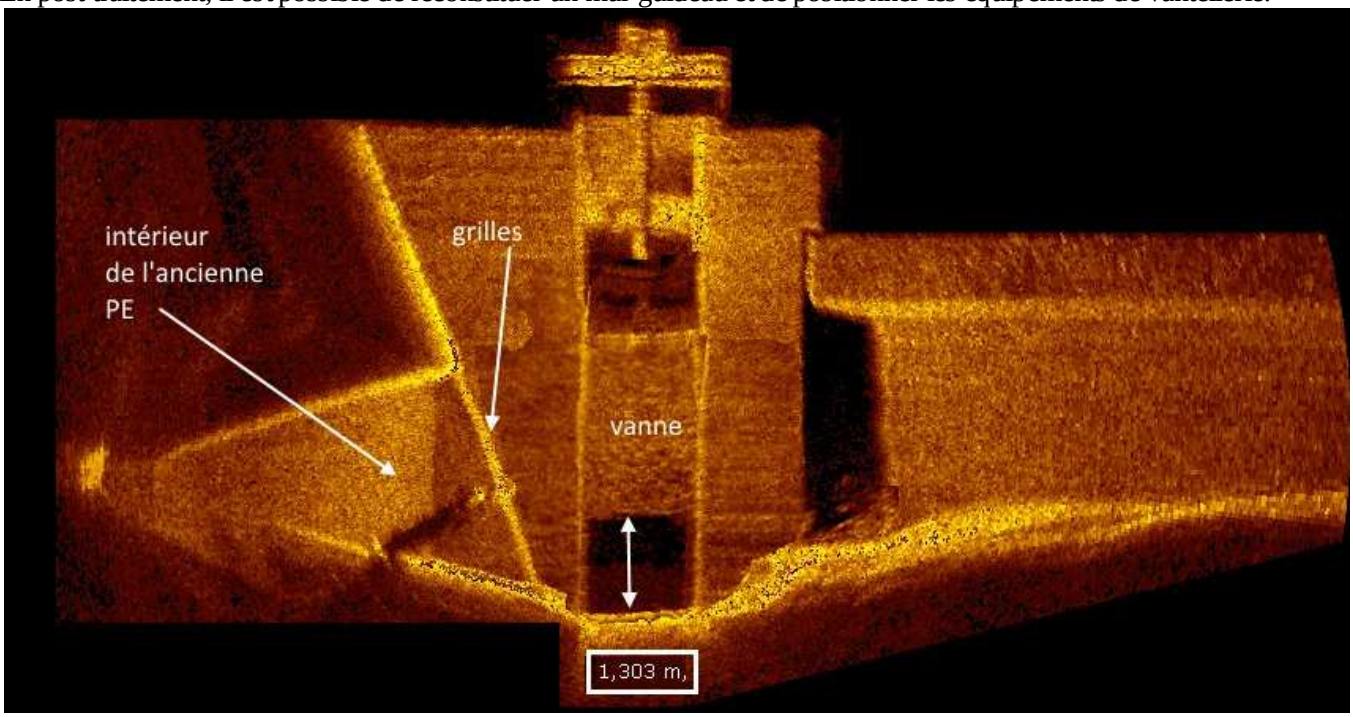


Image 13 : Image reconstituée en post-traitement - Observation générale de l'ouvrage et repérage des organes

Il est possible aussi de reconstituer des ouvrages de vantellerie linéaires et d'en apprécier l'état général.

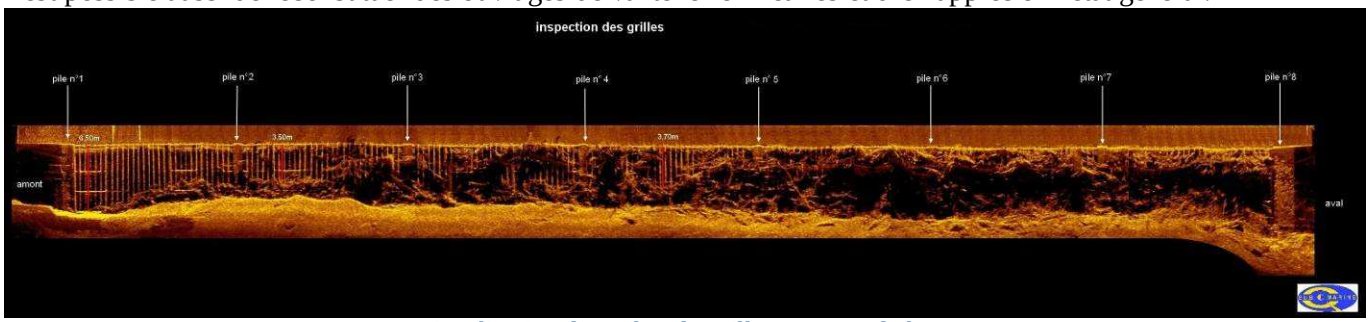


Image 14 : Visualisation d'un plan de grilles sur 25m de largeur.

L'imagerie par scanner permet d'avoir des rendus rapides de l'état d'ouvrage et notamment d'encombrement de grille piège embâcle.

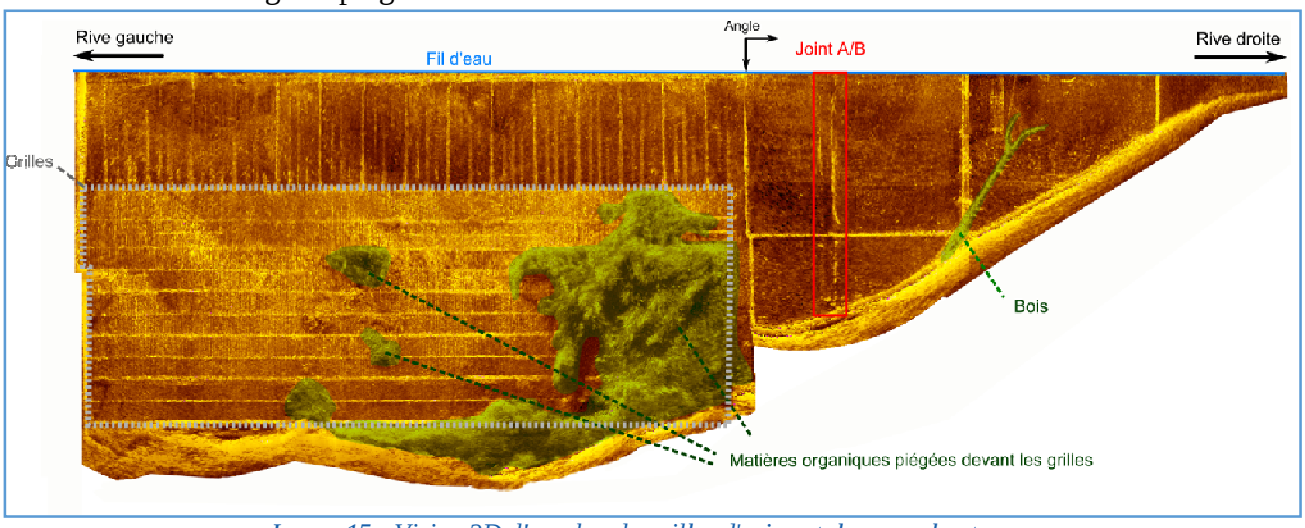


Image 15 : Vision 2D d'un plan de grilles d'usine et de son colmatage

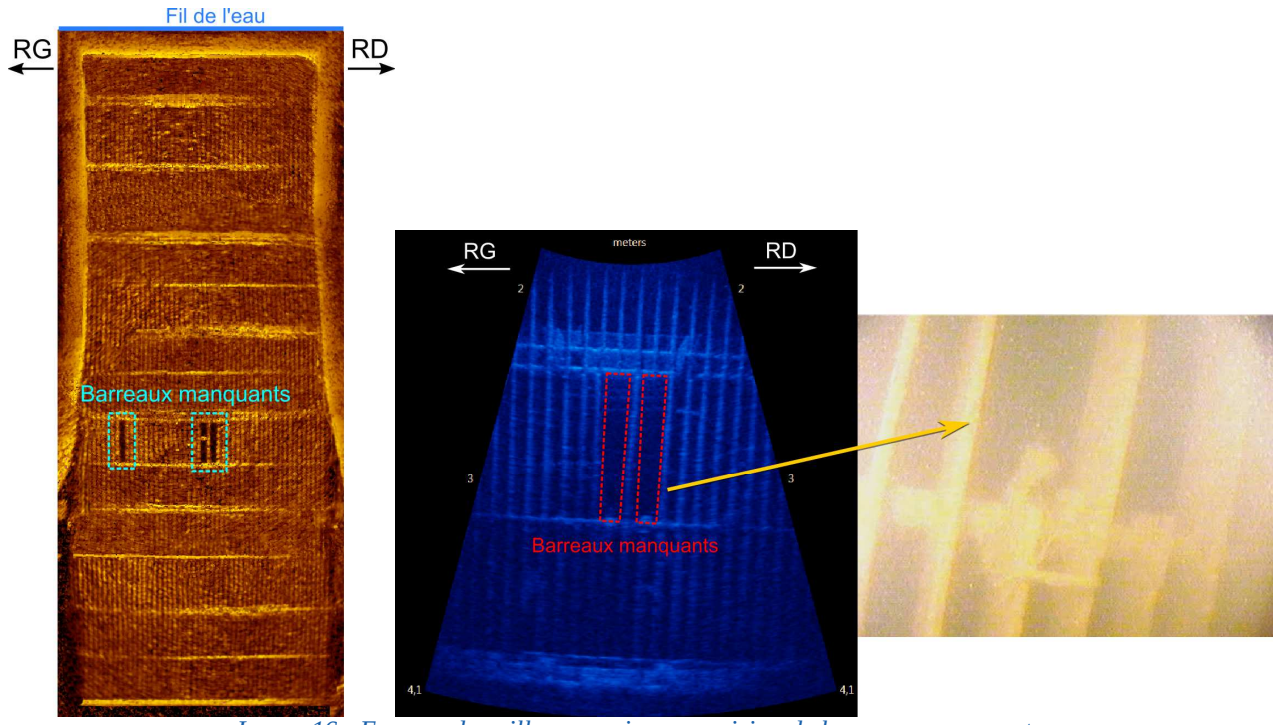


Image 16 : Examen de grilles sur usine avec vision de barreaux manquant

Sur cette même inspection, toutes les systèmes de vision acoustique et télévisuels ont été utilisés simultanément (scanner 2D à gauche, caméra acoustique au centre, image télévisuelle à droite). Chaque système apporte un niveau d'information complémentaire les échelles d'investigation étant différentes.

3.3 Imagerie par scanner 3D

3.3.1 Possibilité d'investigation

Cet outil d'imagerie acoustique apporte une vision tridimensionnelle de zone précise aux abords d'un ouvrage. Le type d'acquisition de données est sous format de nuage de points ce qui permet d'effectuer de la métrologie subaquatique : cotations et localisation précise.
Il est spécialement adapté pour des zones confinées. Le post-traitement permet de reconstituer par le biais de levés successifs la morphologie de tout ou partie d'un ouvrage.
Il est généralement utilisé pour établir les niveaux d'envasement au pied de vanne de fond.



Image 17 : Scanner 2D porté sur ROV

3.3.2 Exemples d'applications & rendus

Cette technologie permet d'avoir différentes vues 3D d'une vanne de prise d'eau et son niveau d'envasement.

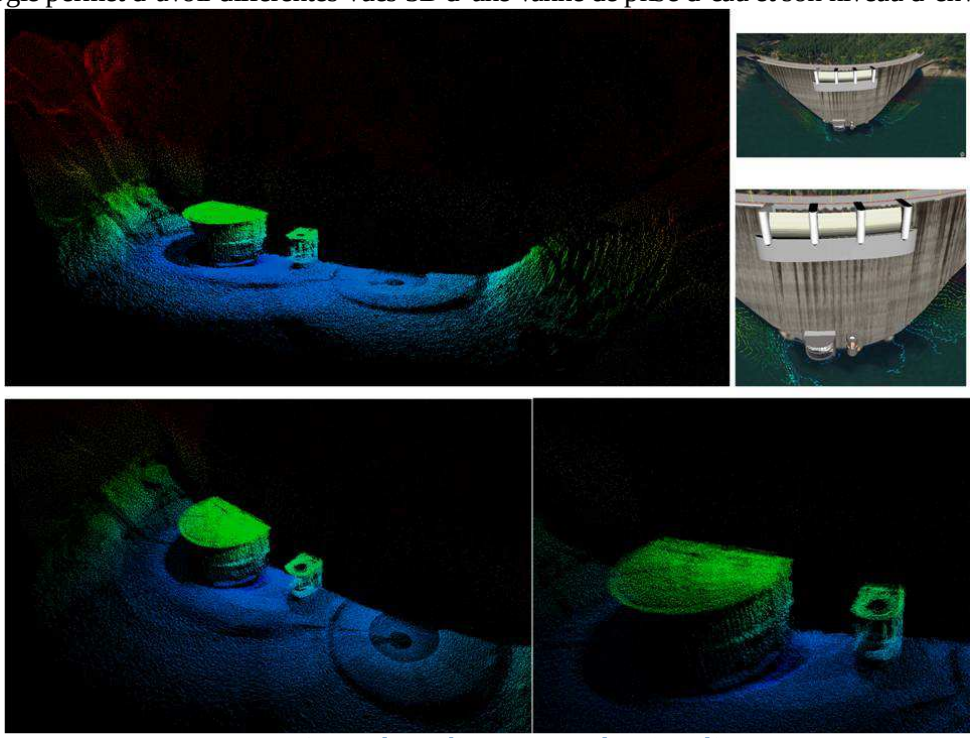


Image 18 : Etude sur l'envasement de prises d'eau

3.4 Caméra acoustique 3D

3.4.1 Possibilité d'investigation

Cette caméra acoustique réalisant des **vues 3D en temps réel**, sera plus dédiée à l'examen en grand de l'état d'entonnement, de barreaudage et de grille. La capacité d'avoir un rendu en temps réel, permet d'organiser la suite des investigations ou d'interventions dans la foulée. La détection rapide de l'état d'encombrement, l'existence de désordres lui permet d'être un outil dans la recherche de défaillance d'un organe ou d'un circuit hydraulique tel qu'une vidange de fond.
C'est aussi un outil permettant la reconstitution ou de vérification de plan de location d'ouvrage et organe.



Image 19: Caméra acoustique 3D portée sur embarcation

3.4.2 Exemples d'applications & rendus

Les clichés suivants illustrent des cas d'utilisation. Ces investigations restent à l'échelle de l'ouvrage et partie d'ouvrage mais n'entre pas dans la recherche du détail.

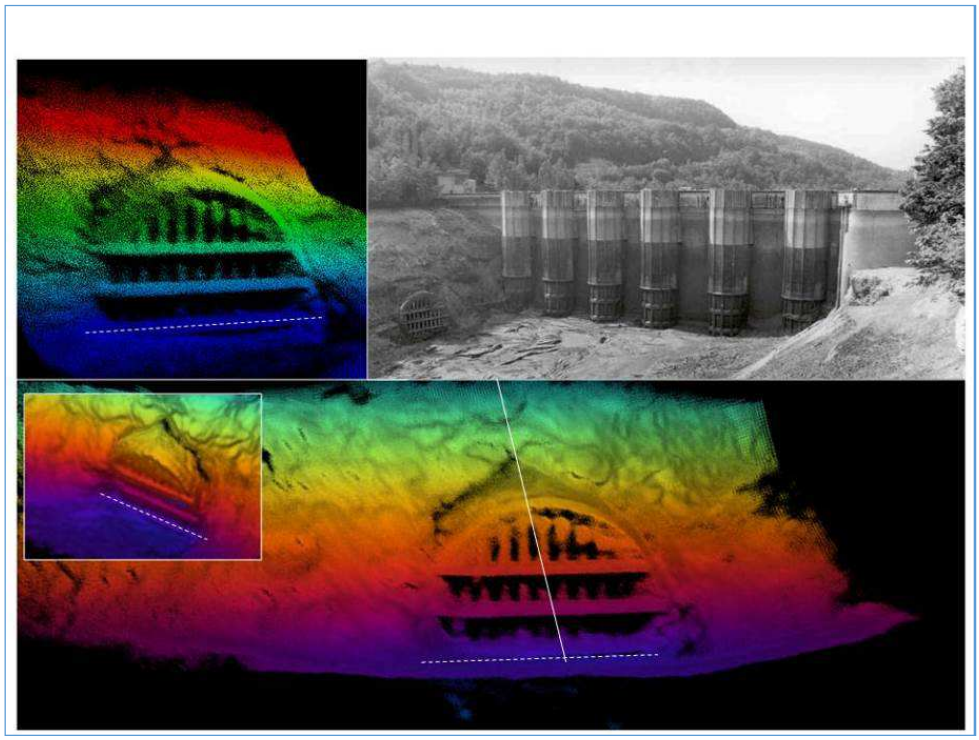


Image 20 : Etude d'envasement d'une vidange de fond à l'amont d'un barrage par 50m de fond.

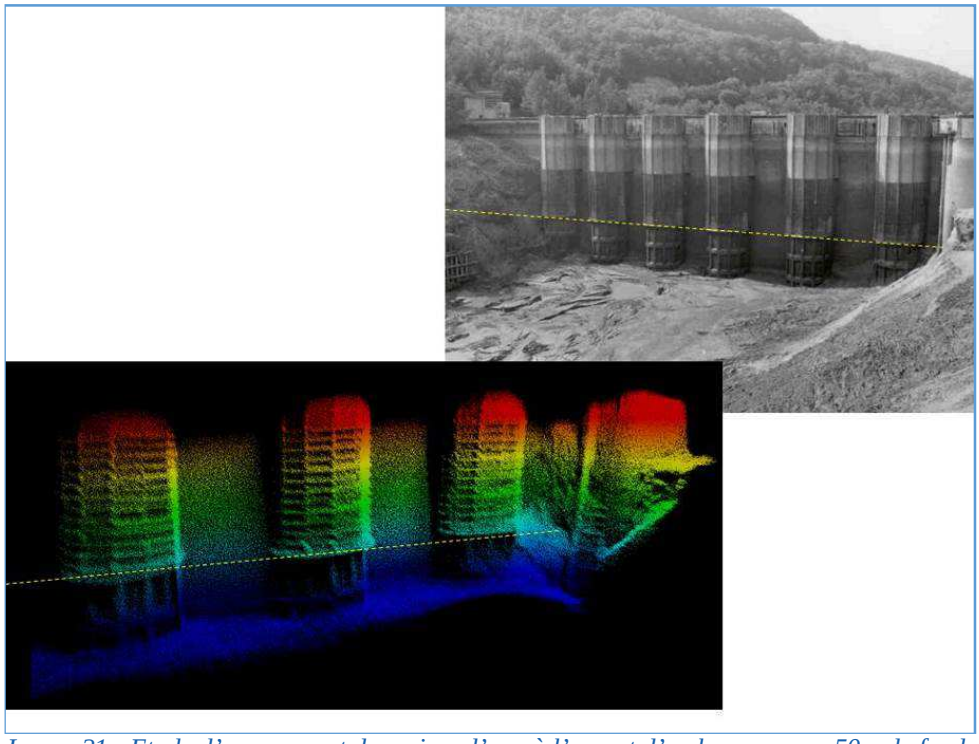


Image 21 : Etude d'envasement des prises d'eau à l'amont d'un barrage par 50m de fond.

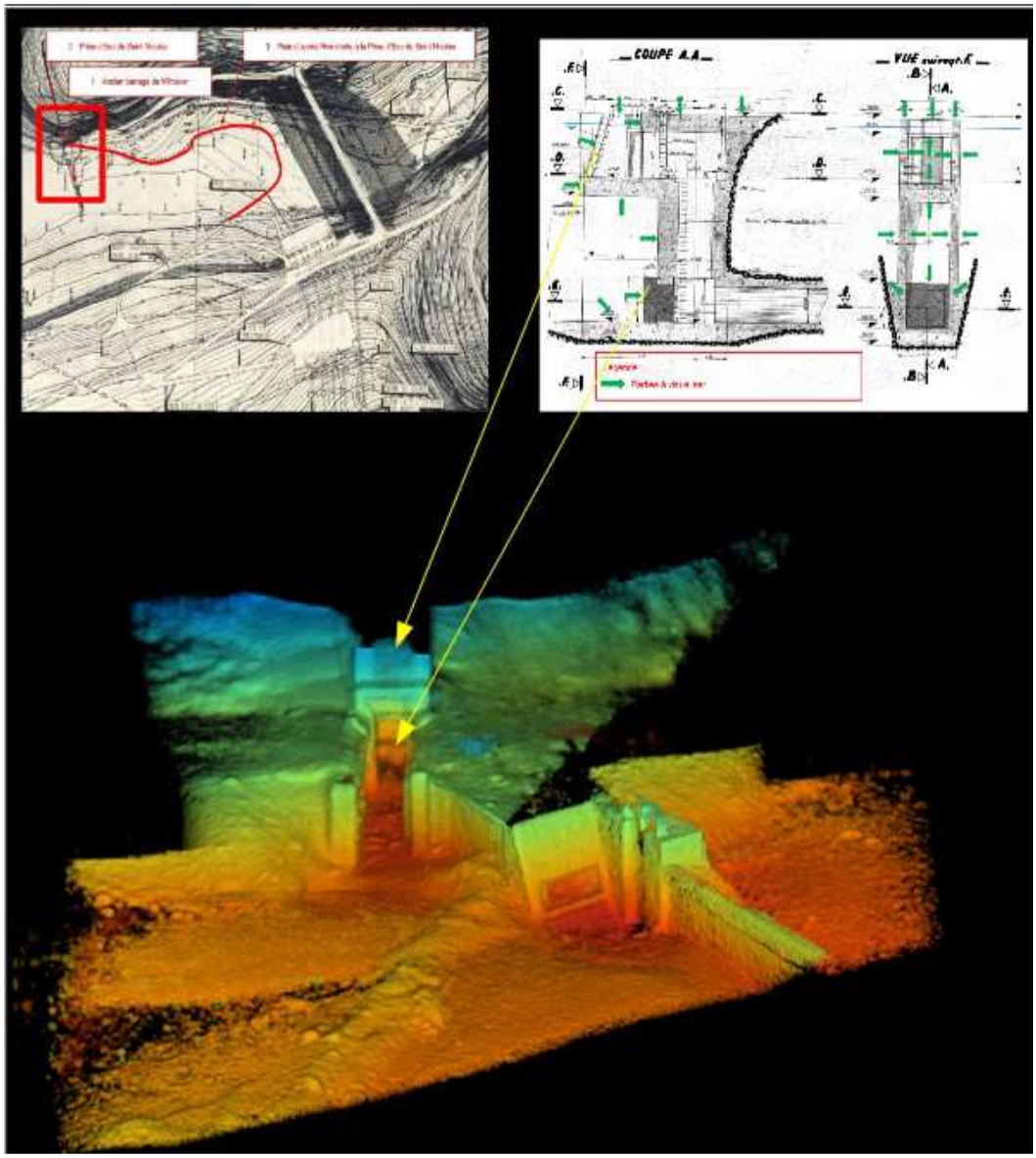


Image 22: Inspection en 3D d'une partie d'ouvrage regroupant les différents organes d'un barrage.

4. CONCLUSION

Nous avons choisi de présenter des technologies d'investigations subaquatiques différentes mais complémentaires des méthodes classiques par scaphandriers et caméra optique afin de montrer que des méthodes innovantes peuvent être mise en œuvre soit de la manière générale pour les parties immergées des ouvrages.

Il ne faut pas considérer que ces technologies viennent remplacer celles déjà existantes et éprouvées mais plutôt comme étant complémentaires.

Il n'existe pas de solutions type pour mener les investigations mais nous avons à disposition un panel de technologies qui permet de proposer des moyens adaptés pour répondre aux objectifs d'un programme défini par le bureau d'étude en charge de l'examen technique. Il peut être envisagé d'avoir une approche graduée dictée par les conditions d'exploitation de l'ouvrage, les conditions de visibilité et les objectifs de l'examen : une vision large et globale permettra d'identifier ou pas des anomalies suivie d'une inspection ciblée avec des techniques plus classiques.

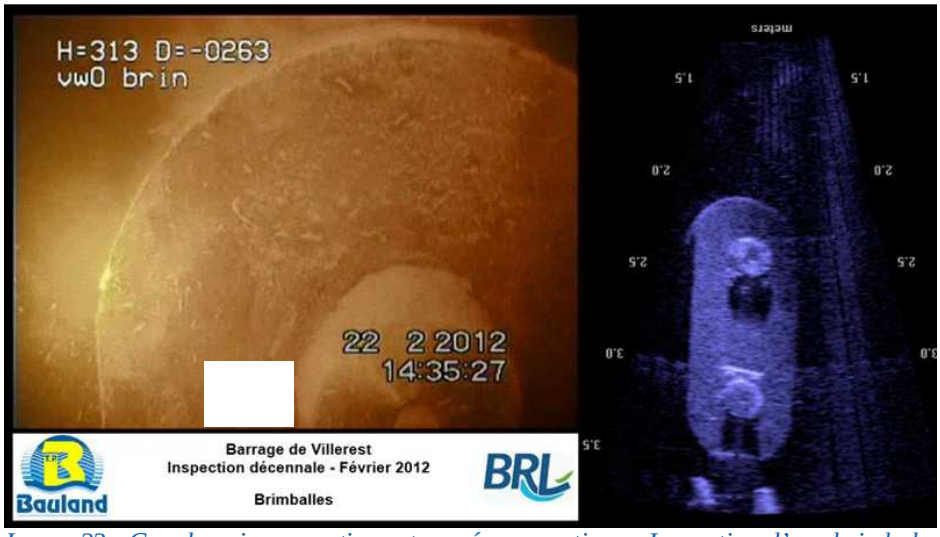


Image 23 : Couplage image optique et caméra acoustique : Inspection d'une brimbale

On voit aussi au travers de ce recueil de méthode qu'il reste des voies d'amélioration dans leur utilisation notamment pour cibler l'examen de détail ou les ouvrages particuliers que sont les conduites de grande longueur. L'embarquement de méthode de contrôle non destructif évoluée (mesures d'épaisseurs, contrôle d'état de revêtement anticorrosion, etc.) reste également un axe de progrès très important.

Thème B

Rénovations et maintenance des organes de vantellerie des barrages



Système d'ouverture des vannes de crues du barrage de Sampolo
© EDF – Bruno CONTY

BARRAGE DE VILLEREST : REHABILITATION VANNES DE DEMI-FOND AVEC REALISATION DE BATARDAGE SPECIFIQUE

Villerest dam: Upgrade of the mid-water gates with the realization of a specific cofferdam system

Jean-Pierre DUMONT
BRL, 1101, Avenue Pierre Mendès France – BP 94001 - 30001 NIMES Cedex 5
Téléphone : +00 (04) 66 875 260, Fax : +00 (04) 66 875 076, Courriel : jean-pierre.dumont@brl.fr

Mamy TOMBOZAFY
Etablissement public Loire
2, quai du Fort Alleaume, CS 55708, 45057 Orléans Cedex
mamy.tombozafy@eptb-loire.fr

MOTS CLÉS

Batardeaux flottants, pertuis immergés, parement amont à courbure variable, absence d'appui ou système de fixation pour batardeau, guidage vertical vanne

RÉSUMÉ

Le barrage de Villerest a les 3 vocations d'écrêtement des crues, de soutien d'étiage, de production d'énergie électrique et comporte notamment cinq pertuis de demi-fond et un pertuis de restitution des faibles débits, équipés chacun d'une vanne segment

En l'absence de système d'isolement amont des pertuis des vannes de demi-fond, l'opération de réhabilitation a fait appel à des techniques innovantes pour s'adapter à des conditions de batardage spécifiques :
- *Parement amont courbe, rayon de courbure variable*
- *pont route non dimensionné pour charges lourdes*
- *aucune zone d'appui possible, aucune rainure*
- *forte variation possible du plan d'eau, toute l'année*
- *solution mise en œuvre reproductible à moyen ou long terme*

Pour la réalisation du batardeau, la solution retenue par le maitre d'ouvrage après dialogue compétitif comporte :
- *Un tablier métallique constitué de 8 éléments acier*
- *Une manutention des éléments réalisés par 2 grues routières*
- *La mise en place de 2 platines au droit du pertuis de chaque vanne, scellées dans le parement amont*
- *Sur les platines, des suspentes et des caissons de guidage latéraux permettant de guider les éléments du batardeau*
- *Mise en place de cadres d'étanchéité en néoprène et joints latéraux en cornière*

ABSTRACT

The Villerest dam ensures three vocations: flood mitigation, water supply and hydropower. It is made up of 5 mid-water openings and a low flow opening, each equipped with a radial gate.
Without any possibility of upstream watertight closure, it was necessary to conceive a specific cofferdam system. This cofferdam had to take into account:
- *A curved upstream face with a variable radius of curvature*
- *A road-bridge not sized/designed to handle heavy loads*
- *No support area, no slots*
- *High variability of the water level all year around*
- *The solution should be repeatable in the medium or long term*

After competitive dialogue, the contracting authority chose the following cofferdam solution. The cofferdam consists of 8 steel stoplogs. 2 hoisting cranes are used to manipulate the stoplogs. For each openings, 2 mounting plates are embed in the upstream face. The mounting plates support the guiding rails of the stoplogs. The watertightness is ensured with a neoprene frame.

1. INTRODUCTION

Des problèmes d'étanchéité ont été constatés sur les vannes de demi-fond du Barrage de Villerest, depuis la mise en eau du barrage en 1984. A l'occasion de la visite décennale de 2002, le service chargé du contrôle du barrage a demandé à l'EP Loire, Maitre d'Ouvrage, de procéder à la réparation des problèmes d'étanchéité constatés avec pour objectif la résolution des problématiques avant la visite décennale suivante, prévue en 2012.

L'expertise, puis les travaux de réparation des vannes devaient obligatoirement être réalisés hors d'eau. Une organisation spécifique à partir de dispositifs de batardage (à concevoir) a donc été nécessaire. A noter également que plusieurs travaux de maintenance préventive annexes ont été réalisés à l'occasion de ces interventions sur les étanchéités.

En préalable du lancement d'une consultation des entreprises, des études spécifiques ont été réalisés afin de valider la faisabilité technique de ces travaux (jusqu'à l'établissement d'un Avant-projet Sommaire) et fournir aux candidats des éléments permettant de proposer des offres viables et pertinentes.

Les résultats de l'étude d'APS du batardage ont été présentés le 18 octobre 2006, en présence du Service de Contrôle qui, par courrier du 3 avril 2007, a validé le principe de batarder durablement (pendant plusieurs mois) un pertuis du barrage (laissant l'ouvrage avec 4 vannes de demi-fond opérationnelles sur 5). En dehors de la confirmation de la faisabilité technique et d'une évaluation budgétaire des travaux, les 2 principales conclusions de l'APS étaient les suivantes :

- laisser ouvert aux entreprises le choix de la technologie du batardeau et de ses pièces fixes : par exemple, batardeau fixé par des rainures latérales ou posé sur des corbeaux au niveau du seuil du pertuis
- préconiser un dispositif de manutention par un portique roulant sur le pont route, plutôt qu'une manutention par grues mobiles (même si cette dernière solution n'était pas exclue)

Ces orientations ont été retenues par le Maître d'Ouvrage après validation par le service de contrôle sur avis du Bureau d'Etude Technique et de Contrôle des Grands Barrages (BETCGB).

Les études « amont » ont été réalisées par EDF – CIH (Centre d'Ingénierie Hydraulique d'EDF), la maitrise d'œuvre des travaux a été réalisée par BRL Exploitation sous la direction de Jean-Pierre Dumont pendant toute la durée de l'opération (de la consultation des entreprises jusqu'à la réception des travaux).

2. PRESENTATION DU BARRAGE



2.1 Caractéristiques techniques

Caractéristiques principales du barrage :

- Type : barrage poids, arqué, en béton
- Volume du corps du barrage : 350 000 m3 environ.
- longueur en crête : 455 m,
- largeur en crête : 7 m,
- altitude de la crête du barrage : 325 NGF,
- rayon de courbure à l'amont : variable (spirale logarithmique).

Caractéristiques de la retenue

➢ Altitude maximale de la retenue

- en exploitation normale (RN) : 304 à 315,30 NGF
- exceptionnelle (PHE) : 324,00 NGF (altitude maximale atteinte à ce jour : 319,00 NGF)

➢ Aire et capacité de la retenue

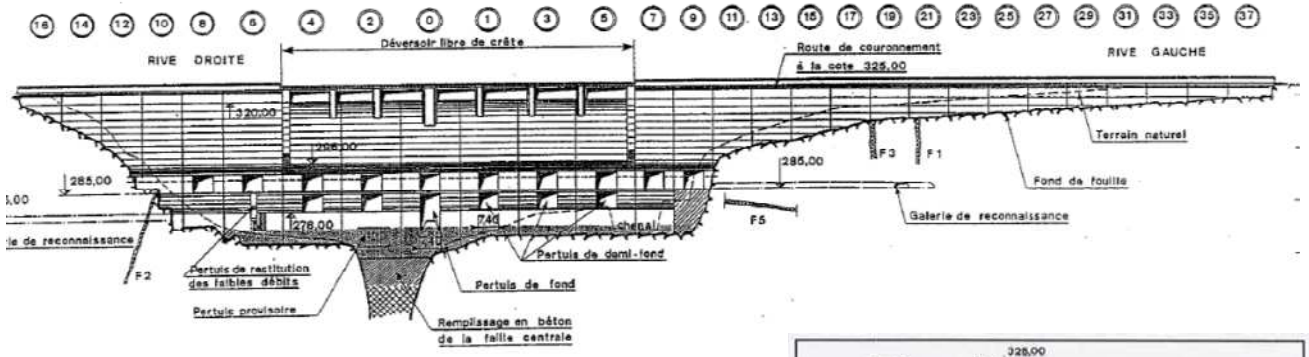
- au niveau normal (RN - 316 NGF) : 7,7 km²
- au niveau exceptionnel (PHE - 324 NGF) : 23,3 km²
- 138 millions de m3 à la cote 316 NGF de retenue normale (RN)
- 235 millions de m3 à la cote 324 NGF des plus hautes eaux exceptionnelles (PHE)

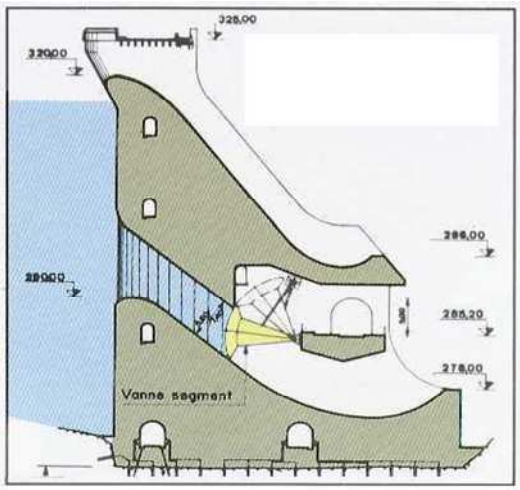
➢ Caractéristiques climatiques et hydrologiques

- Aire du bassin versant naturel : 6 520 km².
- Volume d'eau transité chaque année : 2.10^9 m^3.
- Plus fortes crues : 5 000 m3/s en 1846 ; après construction barrage : 2 900 m3/s en 2003
- Estimation crues : décennale : 1 600 m3/s - centennale : 3 700 m3/s - millénale : 6 000 m3/s .

Système de restitution et d'évacuation du barrage

Le système d'évacuation des crues et de vidange comporte : les pertuis de demi-fond et de fond, le déversoir de surface. Il permet d'évacuer un débit maximal de 8 540 m3/s pour la cote 324 NGF des plus hautes eaux exceptionnelles (PHE). Il est complété par un pertuis pour la restitution des petits débits (soutien d'étiage).





Les caractéristiques de ces ouvrages sont les suivantes :

➢ Déversoir libre de surface

- cote du seuil : 320 NGF
- Longueur déversante nette : 103,14 m
- Débit : 1 690 m3/s pour la cote 324 NGF (PHE)

➢ Cinq pertuis de demi-fond

- Cote du seuil d'entrée : 290 NGF
- Débit total : 5 600 m3/s pour la cote 324 NGF (PHE)
- Sur chaque pertuis, vanne segment de 5,60 m x 7,40 m

➢ Un pertuis de fond

- Radier à la cote 270 NGF
- Débit : 1 250 m3/s pour la cote 324 NGF (PHE)
- Pertuis équipé d'une vanne segment de 5,60 m x 7,40 m et d'une vanne wagon de garde

➢ Un pertuis de restitution des débits de soutien d'étiage :

- Cote du seuil : 280 NGF
- Débit : 90 m3/s pour la cote 316 NGF (RN)
- Pertuis est équipé d'une vanne segment de 2,00 m x 1,80 m et d'une vanne-wagon de garde

2.2 Vocations et règlement d'eau

Les principes de la gestion hydraulique du barrage de Villerest sont précisés par le Règlement d'eau approuvé par décret du 4 mai 1983. Ce règlement est complété par les consignes d'exploitation établies en application du Règlement d'eau qui ont fait l'objet d'une approbation par le Ministère de l'Environnement en date du 24 avril 1985.

Le règlement d'eau définit l'ordre de priorité des fonctions du barrage :

- la fonction écrêtement des crues est prioritaire sur les fonctions soutien des étiages et production d'énergie, lorsqu'il y a crue ou risque de crue,
- la fonction soutien des étiages est prioritaire sur la fonction production d'énergie.

En exploitation normale

- Du 15 septembre au 1er décembre, le niveau est ramené à la cote 304 NGF en vue de l'écrêtement des crues éventuelles d'automne,
- du 1er décembre au 15 septembre, la cote maximale est comprise entre 314 NGF et 315,30 NGF suivant les périodes. Le niveau varie en fonction du soutien des étiages, en restant si possible supérieur à 312 NGF jusqu'au 10 septembre pour les activités nautiques. Le marnage en période normale est de 50 cm.

En étiage

Durant la période des basses eaux qui peut s'étendre de juin à novembre, le barrage assure le soutien des étiages de la Loire, garantissant un débit minimal moyen journalier de 12 m3/s en aval immédiat et contribue avec le barrage de Naussac à assurer l'objectif à Gien (60 m3/s).

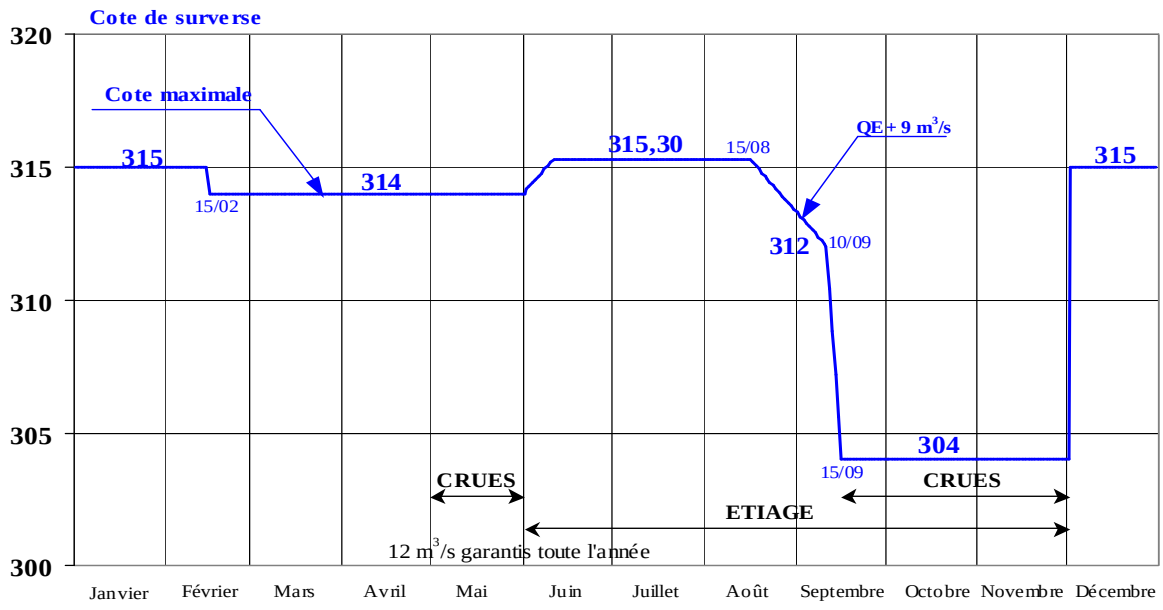
En situation de crue et de risque de crue

Il y a risque de crue dans l'un des cas suivants :

- en permanence au mois de mai et du 15 septembre au 30 novembre
- lorsque l'exploitant compétent constate sur le haut bassin de la Loire des pluies de hauteur supérieure à 50 mm dans un délai inférieur à 24 heures, sur l'un des postes pluviométriques faisant partie du système de prévision des crues à l'entrée de la retenue du barrage de Villerest
- lorsque le débit de la Loire dépasse le seuil de 350 m3/s à Bas en Basset ou à l'entrée de la retenue de Grangent

Schématiquement, la gestion du barrage s'effectue suivant 3 périodes :

- 1ère période : Un déstockage préventif, qui a lieu dès lors qu'une crue d'une intensité supérieure à 1000 m3/s est prévue à l'entrée de la retenue (Feurs). Le débit en sortie du barrage est augmenté jusqu'à 1000 m3/s, débit non dommageable pour l'aval. Lorsque le débit en entrée de la retenue devient supérieur à 1 000 m3/s, le barrage est transparent, le débit relâché étant égal au débit entrant,
- 2ème période : On calcule alors le débit d'écrêtement, qui permettra d'atténuer la pointe de la crue, sans dépasser la cote maximale permise au règlement d'eau. L'objectif est d'utiliser au mieux le volume du barrage afin d'optimiser l'écrêtement. La deuxième période, qui correspond à une phase de stockage, se caractérise par une montée du niveau de la retenue.
- La troisième période correspond à un déstockage, pour retour la cote normale d'exploitation



3. RESULTATS DES ETUDES PREALABLES

3.1 Bilan des études préalables

Cette étape « pré-opérationnelle », comportant tout ce qui a pu être évalué et imaginé en amont par le maitre d'ouvrage et son assistant EDF, a permis de maitriser le niveau de risque à la fois :

- sur le plan de la faisabilité technique des travaux
- sur le plan de la mobilisation des budgets nécessaires
- sur le plan de la procédure de consultation à envisager

Les études préalables ont permis :

- D'identifier un certain nombre de contraintes : surplomb des déversoirs, charge maximale admissible par le pont-route limitante, contraintes en crue et difficultés à procéder à un simple abaissement,
- D'écarter la solution de vidange du barrage, peu compatible avec la durée des travaux et la sécurité du chantier,
- D'estimer le coût du batardeau de manière réaliste. L'enveloppe globale de l'opération a pu être déterminée à partir de ces études même si l'estimation du coût du batardage pour 5 opérations était sous-estimée à ce stade,
- D'évaluer la faisabilité de l'opération,
- D'évaluer les résistances mécaniques des vannes avec une étude de résistance des matériaux, qui a été très utile en phase chantier,

A noter que les résultats de l'expertise subaquatique du parement amont, dont la réalisation était pertinente, se sont révélés erronés lors de la phase travaux et n'ont pas été profitable.

L'étude de faisabilité préconisait de mettre en place le batardeau, puis, dans un ou deux marchés séparés, d'expertiser les vannes et de les réparer. Cette démarche, qui n'a finalement pas été retenue par le maitre d'ouvrage au stade des travaux, comportait deux inconvénients majeurs :

- Le fait de scinder les travaux entre le batardage et la réhabilitation des vannes présentait un risque majeur sur la mise en œuvre, en séparant également les responsabilités, objectifs et délais de chaque entreprise (par exemple : niveaux de fuite du batardeau qui auraient rendus impossible les travaux sur les vannes …). Ce point n'était pas clairement identifié dans les études préalables, l'expérience des travaux sur la VS4 a démontré la pertinence de ce risque
- Les études préalables étaient très orientées vers la problématique du batardage et pas assez approfondies sur les travaux de réhabilitation des vannes. Plusieurs prestations auraient du être réalisées en amont afin de limiter les incertitudes sur le coût de l'opération et sur le phasage des travaux :
    - L'analyse des niveaux de fuite afin de déterminer les priorités entre les différentes vannes. Les études préalables orientaient vers une réalisation des 5 opérations de batardage (optimisation budgétaire) alors que l'expérience du chantier a démontré le contraire : la mise en place du batardeau sur chaque pertuis est une opération lourde à réserver aux cas indispensables (lorsque les niveaux de fuite arrivent à un seuil élevé, très supérieur au débit de fuite des VS1, 3 et 5).
    - Les travaux de démontage et d'expertise d'un vérin de la VS2 (vanne consignée à l'époque) auraient pu être engagés afin d'évaluer l'intégralité des travaux nécessaire sur ce type d'organe et également d'affiner la méthodologie de démontage/remontage des vérins
    - Lors du déroulement du chantier, il est apparu des composants défectueux sur les centrales hydrauliques : les clapets logiques, système ayant un impact sur le verrouillage de la vanne en position après manœuvre. L'identification du problème n'a pas été simple et le sous-traitant de l'entreprise titulaire a effectué le diagnostic complet de ce problème après une recherche laborieuse. Ce problème aurait pu être anticipé et identifié dès les études amont, par simple manœuvre réelle de la vanne.

Par ailleurs, des éléments importants pour la suite du projet n'avaient pas été réunis à ce stade :

- La capacité du pont route (en tonnage supporté) n'était pas connue alors que cette information était structurante dans le choix des solutions de manutention des batardeaux. Les notes de calcul, notamment du pont route auraient dues être réunies lors de cette phase.
- Les plans « ouvrages exécutés » du barrage : la recherche de ces documents a été lancée à la fin de la procédure de dialogue compétitif, après transmission des offres des entreprises donc (trop tard pour les rendre contractuels).
- Les plans disponibles ne correspondaient pas tout à fait à la réalité. Néanmoins, malgré quelques erreurs notables, la présence de ces plans s'est avérée indispensable à la réalisation de l'opération (exemple : positionnement des joints et du ferraillage du barrage pour la pose des platines, plan de courbure du parement….). Leur absence aurait entraîné des surcoûts (par exemple mesures nécessaires pour le rayon de courbure du barrage), et des prises de risque majorées lors de la réalisation de l'opération.
- La topographie du parement amont qui a été un élément manquant important avec plusieurs aléas qui ont eu pour origine des défauts du parement amont non anticipés
- L'examen des terrains utilisables pour le chantier (base vie, points de mise à l'eau …) et pour le stockage du batardeau à titre provisoire et définitif

4. DEROULEMENT ADMINISTRATIF

4.1 Choix de la procédure de consultation des entreprises

Le maitre d'ouvrage a délibéré le 6 juillet 2006 pour engager l'opération, avec les décisions suivantes :

- procéder à l'expertise subaquatique des vannes à l'automne 2006,
- autoriser la conception, la réalisation et l'installation d'un batardeau complet, en vue de réparer ces vannes, étant précisé que cette opération sera engagé en 2007/2008,
- autoriser la réalisation de travaux sur les vannes en 2008.

L'expérience de l'Etablissement pour la reprise des groupes de pompage turbinage à Naussac, ainsi que la complexité de l'opération, ont conduit le maître d'ouvrage à réévaluer ces décisions et à utiliser les nouvelles dispositions du code des marchés public en mettant en œuvre une procédure de dialogue compétitif. Afin de réduire les risques qui auraient résulté de la passation de marchés séparés, il a également été prévu d'intégrer dans un même marché la réalisation des travaux sur les vannes et l'opération de batardage.

4.2 Procédure de dialogue compétitif et l'attribution du marché de travaux

Les dates principales de la procédure de dialogue compétitif sont les suivantes :

- 06 janvier 2009 : avis de consultation pour sélection des candidats
- 03 février 2009 : remise des candidatures
- 19 mars 2009 : sélection de 4 candidats retenus pour le dialogue
- 12 et 13 mai 2009 : première réunion du dialogue compétitif avec les 4 candidats
- 23 et 24 Juin 2009 : deuxième réunion du dialogue compétitif avec les 4 candidats
- 1 et 15 septembre 2009 : troisième réunion du dialogue compétitif avec les 4 candidats
- 25 novembre 2009 : analyse des offres techniques et financières
- 4 juin 2010 : notification du marché

La procédure de dialogue compétitif pour la consultation des entreprises a été très productive avec plusieurs arguments factuels :

- 4 entreprises consultées et seulement 3 réponses viables : le choix de sélectionner 4 candidats a été prix justement pour parer le risque de défaillance d'un candidat en cours de dialogue (un des candidats a clairement proposé une offre insuffisamment étudiée)
- Sur les 3 entreprises ayant proposé des offres viables, les solutions techniques de batardage étaient totalement distinctes et différentes des solutions envisagées dans les études « amont » : démonstration de l'intérêt de faire appel aux compétences des entreprises dans le cas de chantiers complexes
- Sur les 3 réponses viables, l'échelle des prix était très variable

5. SOLUTION TECHNIQUE RETENUE

5.1 Solutions présentées par les candidats

Le résultat du dialogue compétitif a été le suivant :

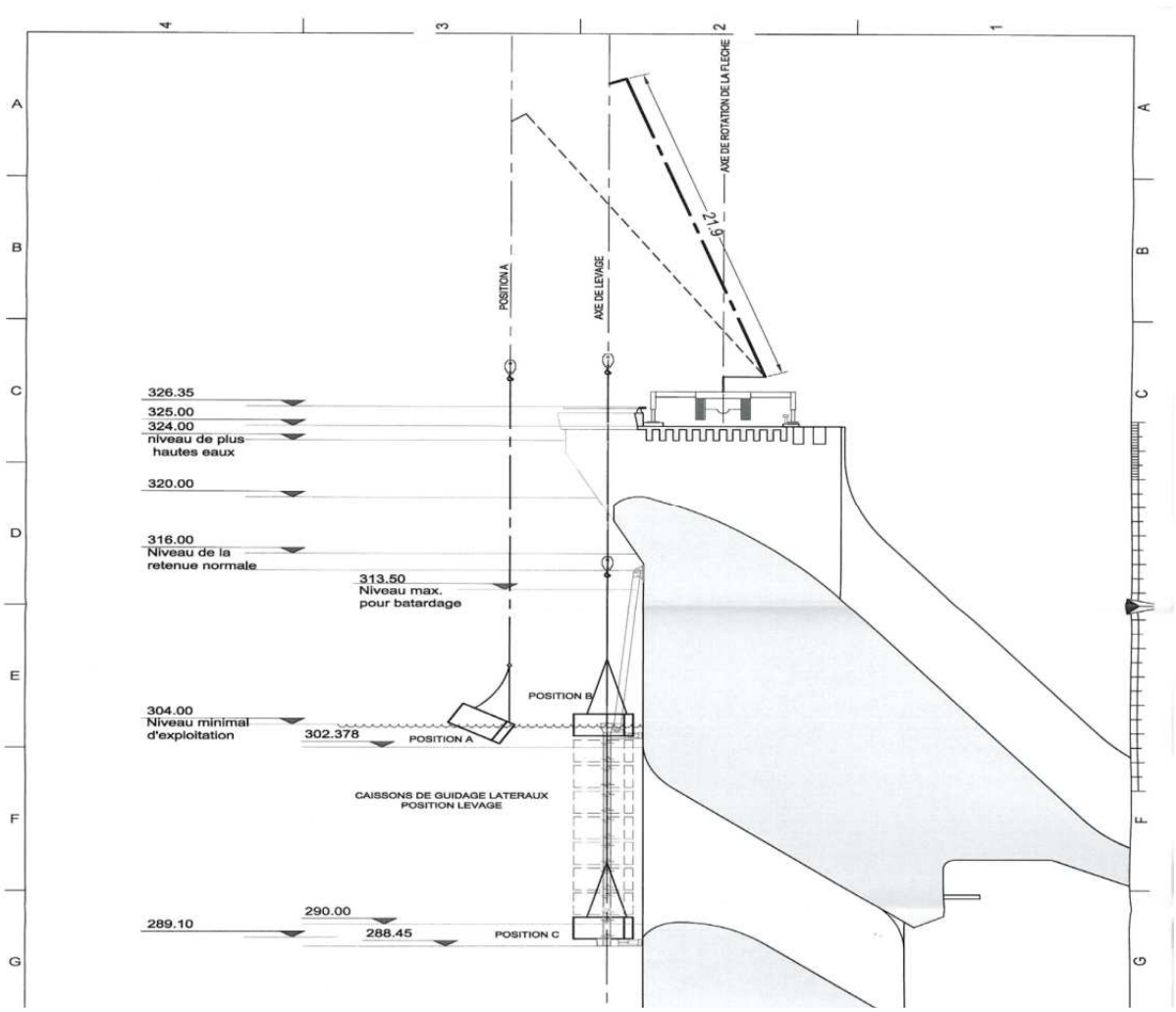
- 4 solutions techniques distinctes avec :
  - Un batardeau à caissons flottants, suspendus sur des suspentes fixées hors d'eau dans le génie civil de l'ouvrage, avec des caissons de guidage des 8 éléments le composant (positionnés horizontalement) et des manutentions réalisées pour chaque élément depuis le pont route par des engins de levage
  - Un batardeau monté intégralement sur rive et équipé de ballon jouant le rôle de ballast pour faire flotter ou couler le batardeau, avec bateau pour positionner celui-ci au droit du pertuis à batarder
  - Un batardeau traditionnel composé de 8 éléments horizontaux installés dans des glissières fixées sur le parement amont, avec des manutentions depuis le pont route par des engins de levage
  - Un batardeau par 8 éléments submersibles verticaux installés par une grue de levage sur barge, depuis le plan d'eau (solution technique la moins étudiée avec de nombreuses incertitudes)
- Des prix variables, du simple au double selon la technique mise en œuvre.

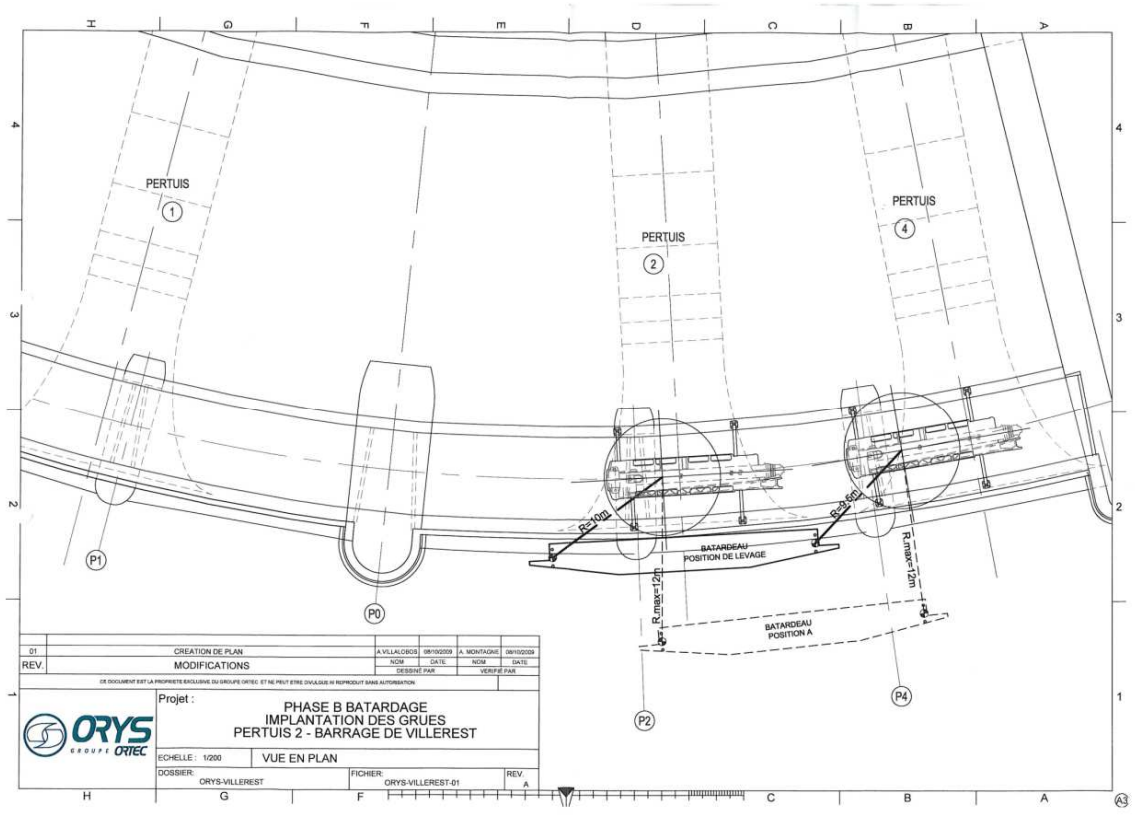
En résumé, le dialogue compétitif a ouvert le champ des possibles pour l'élaboration de solutions techniques très distinctes par les entreprises (6 offres techniques différentes au total, puisque certaines entreprises ont proposé plusieurs variantes), avec des niveaux de prix variable (les offres techniquement les moins abouties étant logiquement les plus chères) mais surtout, au final, 4 offres techniquement acceptables et financières très proches.

5.2 Solution retenue

Les principes de la solution retenue sont :

- Tablier métallique composé de 8 éléments en acier de masse unitaire 32 Tonnes, avec une conception « caisson » permettant d'assurer une flottaison des éléments
- Platines de fixation des suspentes fixées sur le parement amont au droit de chaque vanne
- Deux caissons de guidage latéraux permettant le guidage des 8 éléments du batardeau, au droit du pertuis à isoler
- crics hydrauliques permettant d'écarter les caissons de guidage du parement pendant la mise en place des caissons, puis de ramener l'ensemble contre le parement amont lorsque le batardeau est totalement assemblé
- Cadres d'étanchéité en néoprène + joints latéraux en cornière + pièces d'adaptation pour ajustement à la courbure du parement amont
- Acheminement des éléments du batardeau depuis la zone de stockage (rive gauche du barrage) au droit du plan d'eau à l'aide d'une annexe motorisée et de deux grues routières de 130 Tonnes (circulation sur la partie « portante » du barrage)
- Installation d'une aire de levage sur la partie pont-route du barrage avec plaques de répartition pour la grue routière.
- Levage des éléments du batardeau par 2 grues routières de capacité 100 Tonnes et présentation dans les 2 caissons de guidage
- Ballastage des éléments grâce aux vannes papillons placées sur les éléments et contrôle de la descente (guidage) par les grues.
- Mise en place contre le génie civil à l'aide des crics manuels et contrôle du bon déroulement des opérations par plongeurs
- Mise en place d'un pont flottant modulaire pour personnel et petit matériel


AXE DE ROTATION DE LA FLECHE
21.9
POSITION A
AXE DE LEVAGE
326.35
325.00
324.00
niveau de plus hautes eaux
320.00
316.00
Niveau de la retenue normale
313.50
Niveau max. pour batardage
POSITION B
304.00
Niveau minimal d'exploitation
302.378
POSITION A
CAISSONS DE GUIDAGE LATERAUX POSITION LEVAGE
290.00
289.10
288.45
POSITION C


PERTUIS 1
PERTUIS 2
PERTUIS 4
P1
P0
P2
P4
R=10m
R=50m
R max=12m
BATARDEAU POSITION DE LEVAGE
BATARDEAU POSITION A
01
CREATION DE PLAN
A.VILLALOBOS
08/10/2009
A. MONTAGNE
08/10/2009
REV.
MODIFICATIONS
NOM
DATE
NOM
DATE
DESSINÉ PAR
VERIFIÉ PAR
CE DOCUMENT EST LA PROPRIETE EXCLUSIVE DU GROUPE ORTEC ET NE PEUT ETRE DIVULGUE NI REPRODUIT SANS AUTORISATION
Projet :
PHASE B BATARDAGE
IMPLANTATION DES GRUES
PERTUIS 2 - BARRAGE DE VILLEREST
ECHELLE : 1/200
VUE EN PLAN
DOSSIER:
ORYS-VILLEREST
FICHIER:
ORYS-VILLEREST-01
REV.
A
A3

Pour la partie réhabilitation des vannes :

- Etanchéité latérale :
  - Fourniture et pose de joints en néoprène 65 shore,
  - Fourniture de l'ensemble de la visserie (galvanisée à chaud)
- Etanchéité frontale :
  - Fourniture et pose d'une poutre frontale fixe et d'une poutre frontale embarquée sur la vanne + mise en peinture
  - Fourniture joints en néoprène 65 shore et ensemble de la visserie
- Etanchéité de seuil :
  - Confection et mise en place d'une pièce métallique,
  - Remplissage à la résine et meulage des coulures,
  - Fourniture joints en néoprène 65 shore et de l'ensemble de la visserie,
  - Modifications sur la vanne pour adaptation nouveau joint
- Etanchéité d'angle :
  - Fourniture des joints d'angle en néoprène 65 shore moulé
  - Modifications sur la structure pour adaptation des nouveaux joints
  - Fourniture de l'ensemble de la visserie

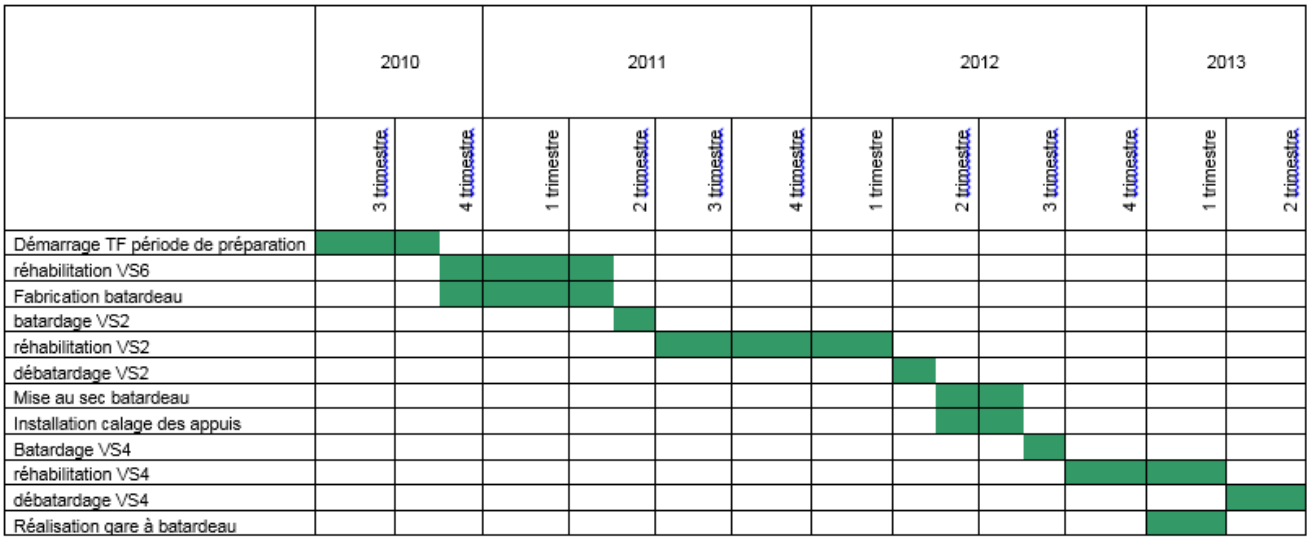
Pour la partie commande des vannes :

- Rénovation des vérins :
  - Démontage et expertise en atelier des vérins,
  - Remplacement des joints,
  - Remplissage de l'installation avec huile BIO
- Contrôle et expertise des bras de la vanne et ressuage des soudures
- Remplacement des filtres de la centrale hydraulique, rinçage de l'installation et remplissage du circuit avec huile BIO
- Remise en peinture de la vanne :
  - Lavage haute pression de la vanne
  - Fourniture et application d'une couche de peinture
- Essais à vide et essais en charge

5.3 Déroulement du chantier

5.3.1 Planning général de réalisation des travaux

Le planning général de l'opération est le suivant :



Pendant le déroulement du chantier, nous avons procédé à deux opérations d'enlèvement des batardeaux :

- opération d'adaptation « hors d'eau » des éléments de batardeau pour mise en place de cales de réglage nécessaire à l'appui sur le génie civil au droit du parement amont de la VS4 : mai/juin 2012
- opération de débatardage définitif et de stockage des batardeaux à la fin du chantier : mai/juin 2013.

Lors des travaux de démontage des éléments de batardeau, les risques de crues étaient réels (période fin mai /début juin). Le choix de ces dates s'est imposé à l'entreprise en raison d'une planification globale ayant été contrainte et des fins d'opération calées à cette période particulière. Pour anticiper les risques et maitriser l'ensemble de l'opération, nous avons établi et mis en œuvre plusieurs précautions:

- une procédure « alerte crue » spécifique à chaque opération de débatardage, avec :
  - un point quotidien des interventions prévues et des risques météorologiques
  - une obligation de limiter à 2 le nombre d'éléments de batardeau présent sur le plan d'eau à tout moment
- une organisation renforcée afin d'accélérer le rythme de travail pendant les phases à risque (équipes doublées)
- un plan de mise en sécurité des éléments de batardeau restés sur l'eau en cas de crue brutale, avec une solution éventuelle d'échouage des éléments flottants
- une procédure de consignation des vannes en rive gauche pendant toute la période de débatardage

Lors des travaux sur le parement amont (pose des platines de fixation du batardeau suspendu), la gestion du plan d'eau a été dérogatoire par rapport au règlement d'eau avec un abaissement plus important de 1 m environ afin de mettre hors d'eau l'échafaudage installé par l'entreprise. A noter qu'il aurait été possible de limiter la contrainte en ajustant l'organisation des travaux avec un choix différent des dates d'intervention mais avec toutefois des incertitudes liées à la météorologie (niveau du plan d'eau assez haut lors des épisodes pluvieux en période estivale).

5.3.2 Points importants en cours de chantier

Essais et réception des travaux des vannes

Les essais réalisés avant de procéder à la réception des vannes a été défini en collaboration avec l'exploitant, afin de répondre aux exigences de contrôle des travaux réalisés mais sans engendrer de conséquence sur l'exploitation de l'ouvrage et sur le règlement d'eau du barrage. Un protocole a été élaboré, validé par l'exploitant et le maitre d'ouvrage, proposé à la police de l'eau et mis en œuvre sur chacune des vannes réhabilitées (avec une phase avant débatardage et une phase après débatardage).

La coordination sécurité

La coordination sécurité sur ce marché a été sollicitée pendant toute la durée de l'opération avec une présence quasi systématique aux réunions de chantier et une visite de l'opération en moyenne 3 fois par mois (fréquence 1 fois par semaine dans les périodes les plus denses d'activité)

Elle a été un point fort de l'opération notamment :

- lors des phases de batardage/débatardage où nous avions en présence : l'entreprise titulaire, l'entreprise de manutention, l'entreprise de plongeurs. Ces phases cruciales dans le déroulement de l'opération faisaient notamment l'objet d'une réunion sécurité systématique avant le démarrage de chaque journée
- lors des points importants sur les vannes : réception des échafaudages, intervention de peinture, démontage vérins…
- pour le suivi des alternats ou coupures de la circulation routière sur le pont route
- pour les visites du site en pleine phase chantier (notamment une visite organisée par EDF)

L'opération a été relativement exemplaire, grâce à l'entreprise, mais aussi au Coordinateur Sécurité et de Protection de la Santé, avec néanmoins quelques petits problèmes réglés dans des délais très satisfaisants.

La fermeture du pont route

Les travaux de batardage/débatardage ainsi que les travaux de pose des platines sur le parement amont ont nécessité la mise en place d'alternats ou de coupure totale de la route (avec déviation).

Les demandes correspondantes ont été faites auprès des services du département (propriétaire des routes) avec des difficultés importantes pour trouver les bons interlocuteurs.

Il a été notamment demandé à l'entreprise d'organiser les déviations en contactant les communes traversées, ce qui semble vraiment anormal : la légitimité de cette démarche revient forcément au propriétaire de la route. Il s'agissait d'un problème de personne peu mobilisée, l'entreprise a assumé cette charge de travail en raison des risques d'arrêt de chantier en cas d'autorisation non accordée.

Le nettoyage du plan d'eau après la crue de 2013

La crue de 2013 (coup d'eau relativement modeste) a entrainé des embâcles et flottants qui se sont naturellement retrouvés amassés contre le parement amont du barrage au moment où le débatardage devait être organisé.
Il a été nécessaire de faire appel à une entreprise chargée du nettoyage des flottants, dans le cadre d'un marché à bons de commandes.
Pour les futures opérations de batardage/débatardage, il est essentiel de disposer d'un marché à bons de commande opérationnel afin de pouvoir procéder à un nettoyage en cas de crue.
En effet, la présence de flottants interdit toute intervention de plongeurs et tout déplacement de bateau ou de batardeau sur le plan d'eau
La coordination avec l'exploitant de l'usine : inondation base vie
Pendant le chantier, la base vie a été installée en rive droite sur un terrain délaissé appartenant à EDF. Cet emplacement est suffisant et aucune autre zone n'était disponible pour la base vie.
Lors d'une opération de maintenance d'un groupe de turbinage de la centrale par EDF, un incident chantier s'est produit avec pour conséquence une arrivée massive d'eau ayant inondé la base vie.
Cet incident n'a eu que des conséquences matérielles, mais la coordination entre le gestionnaire de l'usine EDF et l'exploitant du barrage n'a pas été efficiente : aucune information sur un éventuel risque n'avait été signalée.

La communication

L'opération a fait l'objet d'une communication :

- du public, par des panneaux d'information, le site Internet d'EPLOIRE
- des élus locaux avec une réunion d'information en amont des travaux (en mairie de Villerest)
- des administrations (police de l'eau, service de contrôle) par bulletins d'information réguliers

Aucune remarque n'a été faite sur ce sujet, aucune conséquence notable liée au déroulement des travaux et aux gènes occasionnées, en dehors de l'aspect « gare à batardeau » qui fait débat.

6. CONCLUSION

Avec le retour d'expérience de cette opération, nous constatons :

- des objectifs atteints : les vannes ont été réhabilitées,
- des délais respectés,
- pas d'incident majeur sur le chantier,
- une méthode de batardage et de réparation reproductible,
- des coûts respectés et maitrisés.

La principale complexité de ce chantier résidait sur l'aspect prototypique du batardeau. L'opération a été réussie en raison d'une collaboration active entre toutes les parties prenantes, avec des rôles parfaitement définis et une recherche permanente de solutions innovantes.

REMERCIEMENTS

Pour la réalisation de cette opération, je tiens à remercier, pour leur implication et leur collaboration dans les moments clés de ce chantier :

Le maitre d'ouvrage représenté par : Hélène Xhaard, Jean-Luc Roy, Mamy Tombozafy, C. Thuinet , Olivier Collon

Les entreprises Orys et Joseph Paris, pendant la phase de dialogue compétitif et pendant la construction puis l'installation du batardeau puis la réhabilitation des vannes, représentées par : MM Montagné, Delauné, Volps, Corti, Tessier, Ducret et Malpertu

Les collaborateurs de BRL Exploitation : MM Poras, Taibaoui, Tete et Breton

BARRAGE DE JOUX - RENOVATION DE LA VANNE DE DEMI-FOND ET DE SON SYSTEME DE MANŒUVRE

Joux Dam – Rehabilitation of the middle level gate and its operating system

Thomas BOURGOUIN
Tractebel Engineering France - Tour Part-Dieu - 129, rue Servient - 69326 Lyon CEDEX 3
thomas.bourgouin@gdfsuez.com

Clément FUGIER
Mairie de Tarare, 57 rue de la République 69173 Tarare Cedex
c.fugier@ville-tarare.fr

MOTS CLÉS

Vanne de demi-fond, motorisation, vérin electrique, rénovation, analyse de risques

RÉSUMÉ

La vanne de demi-fond du barrage de Joux est une vanne de type segment à contrepoids installée dans le cadre du rehaussement de l'ouvrage en 1954. Les fonctions de cette vanne sont d'assurer un ultime secours à l'évacuation des crues en cas d'obstruction de l'évacuateur à seuil libre et d'assurer la vidange rapide en cas de désordre pouvant mettre en cause la stabilité de l'ouvrage.

Les études récentes (étude de dangers en 2012, revue de sûreté en 2014) ont mis en évidence les risques liés à l'existence de cette vanne segment. Une défaillance du système de manœuvre de cette vanne de demi-fond pourrait en effet entrainer une ouverture intempestive de celle-ci et, par voie de conséquence, une crue artificielle désastreuse voisine de la crue décamillénale.

En 2014 et 2015, la vanne de demi-fond a fait l'objet de travaux de remplacement incluant le remplacement de son système de manœuvre vieillissant par une motorisation neuve et une nouvelle armoire de commande. L'alimentation des équipements électriques a été fiabilisée par la mise en place d'un onduleur et l'utilisation d'un groupe électrogène mobile

ABSTRACT

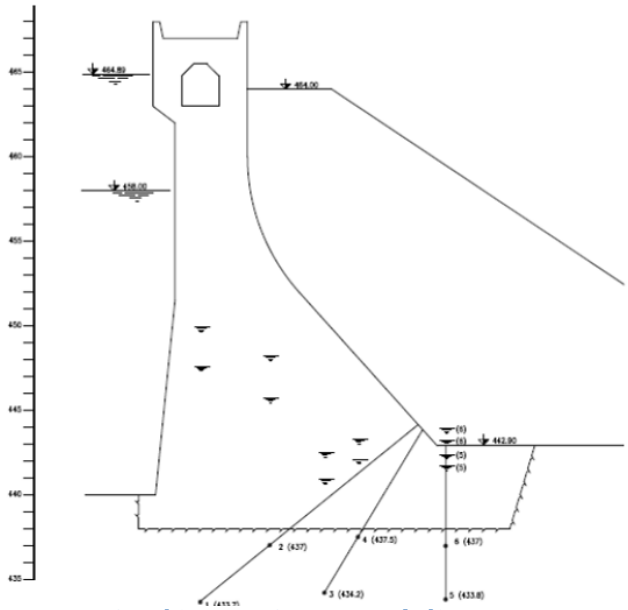
The middle level gate of Joux dam is a radial gate with a counter-weight since the dam rising in 1954. This gate aims at emptying the reservoir in case of emergency.

The last study about Joux Dam (Hazards study and detailled inspection) highlights the risks of the mid-height outlet. As a result of a failure of gate operating system, the opening of the gate may not be controlled by the operator. Thus, it would occur artificially the 10000-years flood which would affect the city of Tarare located downstream.

1. PRESENTATION DE L'OUVRAGE ET DE SON ORGANE DE VIDANGE DE DEMI-FOND

1.1 Présentation de l'ouvrage

La Ville de Tarare dans le Rhône (69) exploite le barrage de Joux sur la Turdine pour l'alimentation en eau potable et industrielle de la ville située à quelques kilomètres à l'aval du barrage.
A l'origine, le barrage de Joux est un ouvrage de type poids en maçonnerie ordinaire construit de 1901 à 1906, sans aucun joint de construction, ni dispositif de drainage ni aucun voile d'injection. Au cours de son existence, il a fait l'objet de travaux qui l'ont modifié. Il a en effet été rehaussé de 3,5 m par un caisson de crête en béton armé en 1954 ; ce caisson a été ancré à l'ouvrage en maçonnerie, puis renforcé en 1983 par adjonction d'un remblai stabilisateur aval et d'une galerie de drainage en partie basse.



Graphique 1 : Coupe-type de l'ouvrage



Graphique 2 : Barrage de Joux, vu de l'aval

La vidange de fond de l'ouvrage est une conduite de diamètre Φ 300 mm. Cette conduite est équipée d'une vanne de garde amont située dans la galerie de drainage, et d'une vanne de réglage à l'extérieur de l'ouvrage. Ces deux vannes sont de type opercule et manœuvrables manuellement.

L'ouvrage est équipé d'un dispositif de prise d'eau constitué de deux conduites de diamètre Φ 450 mm.

Chaque conduite est équipée d'une vanne de réglage à opercule située dans la chambre des vannes de la galerie de drainage. Une conduite Ø 450 mm de prise d'eau est alimentée par un bras mobile implanté à l'amont du barrage en 1994. La conduite d'alimentation en eau potable et industrielle de la ville de Tarare dessert une station de pompage située au pied aval du barrage, qui alimente la station de traitement à proximité de Tarare.

Un piquage sur une conduite de prise d'eau est utilisé pour la restitution du débit réservé (25 l/s).

Les dispositifs d'évacuation des crues du barrage de Joux sont composés de quatre seuils libres, dits en « becs de canard » et d'une vanne de demi-fond. L'ensemble des seuils libres a une capacité d'évacuation des crues de l'ordre de 65 m^3/s (crue décamillénale) sous la cote des Plus Hautes Eaux, et la vanne de demi-fond a une capacité d'évacuation de 64 m^3/s.



Graphique 3 : Seuils libres ou Becs de canard



Graphique 4 : Chenal d'évacuation

1.2 Présentation de la vidange de demi-fond

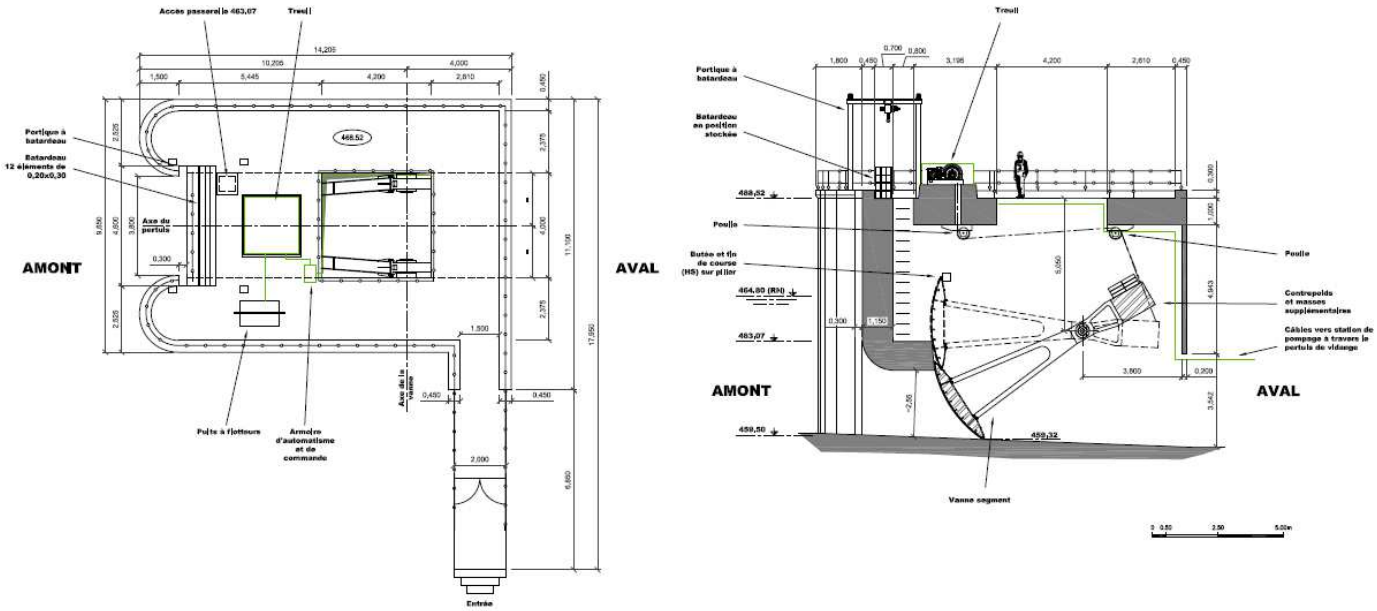
La vanne de demi-fond est une vanne de type segment à contrepoids de dimension h = 2,60 m x L = 4 m, située dans l'axe de la structure de l'évacuateur. Le seuil de la vanne se situe à environ à 5,5 m sous la niveau de la retenue normale. Les 2 bras de manœuvre de la vanne sont prolongés vers l'aval et entretoisés par des profilés métalliques qui supportent un contrepoids en béton armé.

Le système de manœuvre de la vanne est composé de :
- un treuil de manœuvre situé sur la plateforme en crête,
- une armoire d'automatisme et de commande,
- un puits à flotteur,
- un câble en acier mouflé à 4 brins reliant le contrepoids au treuil électrique,
- un frein à mâchoires.

Le batardeau est constitué de plusieurs poutres métalliques positionnées horizontalement les unes sur les autres dans des rainures directement à l'amont du tablier de la vanne segment, à l'aide d'un portique et d'une potence. Les poutrelles métalliques du batardeau sont stockées sur la plateforme en crête.

Cette vanne de demi-fond date de la surélévation du barrage (1954), Elle a été remise en état de fonctionnement avec l'abaissement de 2 m de la cote d'exploitation en 1979, en attendant le confortement de 1983.

Le débit théorique de débitance de la vanne segment sous PHE (465,35 m NGF) est de 64 m^3/s ; ce débit correspond à la crue décamillénale.



Graphique 5 : vue en plan et coupe-type de l'ouvrage de vidange de demi-fond

Les fonctions de cette vanne de demi-fond sont :
- de suppléer l'évacuateur de crues à seuil libre si son obstruction par des corps flottants réduisait sa capacité à évacuer une crue de façon satisfaisante,
- d'assurer la vidange partielle de la retenue, dans un délai convenu, pour réduire la charge hydrostatique appliquée sur le corps du barrage en cas de désordre pouvant mettre en cause sa stabilité.

Ces deux fonctions devant être assurées en toute circonstance, il est donc impératif de garantir la fiabilité et le fonctionnement de la vanne segment.

Cette vanne ne fait pas l'objet de manœuvres régulières pour ne pas risquer d'engendrer une crue artificielle à l'aval d'ampleur décamillénaire. Le dernier essai de manœuvre par l'exploitant date de 1994.



Graphique 6 : Tablier aval de la vanne et contrepoids

2. EXPERTISE DE LA VANNE DE DEMI-FOND ET DE SON SYSTEME DE MANŒUVRE

Afin de redonner à la vanne de demi-fond sa fonction d'organe de sécurité, et à la demande de la DDAF (Service du Contrôle des barrages), la ville de Tarare a missionné Tractebel Engineering France pour une expertise du fonctionnement de la vanne de demi-fond et de ses équipements connexes.

Les objectifs de cette étude sont les suivants :
- expertiser visuellement l'ossature mécano soudée de la vanne segment et réaliser un essai de fonctionnement
- proposer une solution de rénovation du système de manœuvre existant

2.1 Examen à sec de la vanne et de son système de manoeuvre

L'examen rapproché du tablier de la vanne a permis de relever de nombreux signes de corrosion en divers endroits. La face amont du tablier (observée lors d'un creux saisonnier marqué de la retenue) est en particulier très corrodée. La face aval du tablier montre plusieurs zones corrodées, notamment au droit des raidisseurs qui forment des pièges à eau de pluie stagnante.

Le raidisseur inférieur du tablier dans la zone d'assemblage du bras de manœuvre est une zone mécaniquement très sollicitée qui est particulièrement affaiblie par la corrosion.

Une vérification de l'épaisseur du tablier a mis en évidence une perte d'épaisseur de 3 à 6 mm par rapport à une épaisseur initiale de 15 mm lors de la rénovation du tablier de la vanne en 1983.



Graphique 7 : Vue amont de la tole de bordée de la vanne

Les visites de surveillance périodiques de l'ouvrage ont mis en évidence des fuites importantes au droit du joint de seuil de la vanne. Le joint de seuil est apparu en bon état avec quelques défauts d'horizontalité générant ces fuites importantes.

Des lests en béton ont été ajoutés au contrepoids et menacent de basculer dans le chenal de l'évacuateur de crue.

Le capot de protection du système de manœuvre a été provisoirement déposé pour permettre l'examen du dispositif ainsi qu'un essai de manœuvre.



Graphique 8 : Treuil électrique de manœuvre et système d'automatisme avec flotteur

Le câble en acier relie le treuil de manœuvre et le contrepoids et permet de maintenir la vanne dans sa position fermée. Ce câble n'est pas mécaniquement protégé, il est exposé aux actes de malveillance.

Le moteur électrique et l'ensemble de ces composants majeurs (électro-frein) n'ont pas de pièces de rechange.

Le système d'ouverture automatique de la vanne n'est plus opérationnel, les mécanismes de commande par flotteurs présentent des dysfonctionnements. Le câble de déblocage du frein à mâchoires du moteur électrique est rompu afin de rendre hors d'usage le pilotage de l'ouverture de la vanne segment par le flotteur principal.

Les articulations de la vanne segment et les engrenages du moteur sont lubrifiés à l'aide d'un circuit fermé d'huile équipé d'une pompe de relevage logée dans le carter des harnais d'engrenage du moteur. Cette pompe est hors service et un mélange "eau/huile" inacceptable a pu se constituer dans le carter. Des traces d'oxydation sont observées sur les engrenages du réducteur accouplé au moteur électrique. L'absence de lubrification du réducteur et des paliers engendre des risques de grippage des articulations et du moteur et défiabilise le système de manœuvre de la vanne segment.

Le cable d'alimentation 380 V de l'armoire de commande électrique est située dans le chenal de l'évacuateur et est très exposée à l'écoulement.

Lors de cet examen visuel, une manœuvre de la vanne derrière le batardeau a nécessité un engin de levage (palan et treuil manuel) et a permis de soulever la vanne de 20 centimètres environ.

2.2 Risques liés à l'existence de la vanne

L'étude a permis de recenser une liste de risques liés à l'exploitation de la vanne de demi-fond et de son système de manœuvre :

- Risque n°1 : L'exploitation de la vanne existante (surtout en mode automatique) peut conduire à déverser à l'aval un débit d'intensité égale à la crue décamillénale

- Risque n°2 : Dès que la retenue atteint la cote théorique 465,35 NGF, l'exploitation de la vanne segment en mode "automatique" provoque la pleine ouverture de la vanne sans qu'il soit possible d'interrompre

l'ouverture. Le débit déversé à l'aval sera toujours maintenu artificiellement à une valeur proche de celui de la crue décamillénale, y compris en phase de décrue

- Risque n°3 : Le grippage du moteur est susceptible de bloquer tout mouvement de la vanne segment. La même remarque peut être étendue à l'électrofrein.

- Risque n°4 : Le câble en acier du treuil n'est pas à l'abri d'un acte de malveillance. Sa rupture conduirait inévitablement à une brusque crue quasi décamillénale.

- Risque n°5 : la vanne segment et son automatisme ne se prêtent pas à une marche automatique dans des conditions satisfaisantes (exposition des capteurs à l'humidité, mauvaise lubrification des équipements).

La première Etude de Dangers du barrage de Joux a permis de considérer la rupture ou l'ouverture incontrôlée de la vanne de demi-fond comme un évènement probable (probabilité de l'évènement de 10^{-3} selon le guide des Etude de dangers). Cet évènement est susceptible de provoquer à l'aval de l'ouvrage une crue décamillénale (de l'ordre de 65 m^3/s) et d'impacter entre 10 et 100 personnes dans l'agglomération de Tarare.

L'évènement est placé sur la matrice de criticité suivante :

Occurrence / Gravité			10^{-5}		10^{-4}		10^{-3}		10^{-2}	
		E		**D**		**C**		**B**		**A**
5	désastreux									
4	catastrophique									
3	important							Rupture de la vanne de ½ fond		
2	sérieux									
1	modéré									

Tableau 1 : Criticité de l'évènement « rupture de la vanne de ½ fond »

Suite à la définition de ces risques dans l'étude de dangers, M. le sous-préfet de Villefranche sur Saône a présidé en 2012 une réunion de sécurité relative à la vanne de demi-fond en présence du Service de Contrôle (DREAL Rhônes-Alpes), du Maître d'Ouvrage (Ville de Tarare) et de son assistant technique (Tractebel Engineering France - Coyne et Bellier). Les services de l'état sont informés que le caractère obsolète du système de commande de la vanne de demi-fond induit un risque de crue artificielle d'intensité décamillénale pour les avaliers.
Les services de l'état formulent par arrêté préfectoral la demande de travaux de rénovation de la vanne de demi-fond et de son système de manœuvre. Des mesures transitoires de surveillance de la vanne sont également imposées au maitre d'ouvrage (surveillance journalière des câbles et de leur tension, inspection approfondie mensuelle du treuil).

3. PROJET DE RENOVATION DE LA VANNE

3.1 Description du projet

Le projet de rénovation de la vanne et de son système de manœuvre et le dossier de consultation des entreprises ont été établis respectivement en janvier et novembre 2013.

Plusieurs solutions de rénovation de la motorisation ont été étudiées :
- conservation du treuil électrique existant,
- motorisation par vérin oléohydraulique,
- motorisation par vérin électrique.

Le choix de la nouvelle motorisation s'est porté sur un vérin électrique. L'avantage principal de ce type de manœuvre est la simplicité dans son mode d'exploitation ne requierant que peu de maintenance, ce qui correspond aux attentes du maitre d'ouvrage. Sa durée de vie est garantie pour 20 000 cycles d'ouverture-fermeture.

Le tableau ci-après récapitule l'analyse des avantages et inconvénients de chaque solution technique de motorisatisation adaptée au cas du barrage de Joux.

Réhabilitation du système de manœuvre			
Critères	Conservation du treuil électrique existant	Vérin hydraulique + centrale oléo-hydraulique	Vérin électrique
Technicité	+	+	+
Contrôle de la vanne	-	-	+
Encombrement	+	+	+
Délai d'approvisionnement	-	-	+
Fiabilité	+ +	+ +	+ +
Résistance à la corrosion	-	+ (bâtiment)	+ (bâtiment)
Maintenance/Entretien	-	-	+
Facilité d'exploitation	-	-	+
Habitude de l'exploitant	+ +	-	-
Coût d'investissement	+	-	+
Coût d'exploitation et maintenance	-	-	+
Coût génie civil associé	+ +	- - (bâtiment)	- - (bâtiment)

Légende :
++ solution très adaptée/très bonne
+ solution adaptée/bonne
- solution moins adaptée/médiocre
-- solution non adaptée/mauvaise

Les travaux de réhabilitation de la vanne tel que prévus par le projet de base comprennent donc :

- le remplacement de la vanne segment et du contrepoids
- le remplacement du dispositif de manœuvre par un vérin électrique
- la fourniture et pose d'un verrouillage de la vanne
- la fourniture d'une alimentation électrique secourue
- la modification du cheminement de l'alimentation électrique
- l'automatisme d'origine par flotteurs est maintenu et également remis en état
- le remplacement du batardeau
- la mise aux normes des garde-corps.

Dans ce projet, l'ouverture de la vanne assurée par les seuls effets "moteurs" du contrepoids est conservée comme dans la conception d'origine de la vanne de demi-fond. Le vérin est donc en mode suiveur à l'ouverture de la vanne. Le poids du contrepoids de 16 tonnes est identique à la solution d'origine.

Le servomoteur de manœuvre de la vanne est à double effet, conçu de manière à permettre le maintien de la vanne à n'importe quelle ouverture utile pendant une durée indéterminée. Le servomoteur de manœuvre est dimensionné pour assurer la manœuvre de la vanne malgré toutes les forces antagonistes de friction (étanchéites frontales et latérales, articulations). Les efforts de dimensionnement du vérin sont de 16000 DaN en traction (le vérin est moteur) et en compression (le vérin est suiveur).

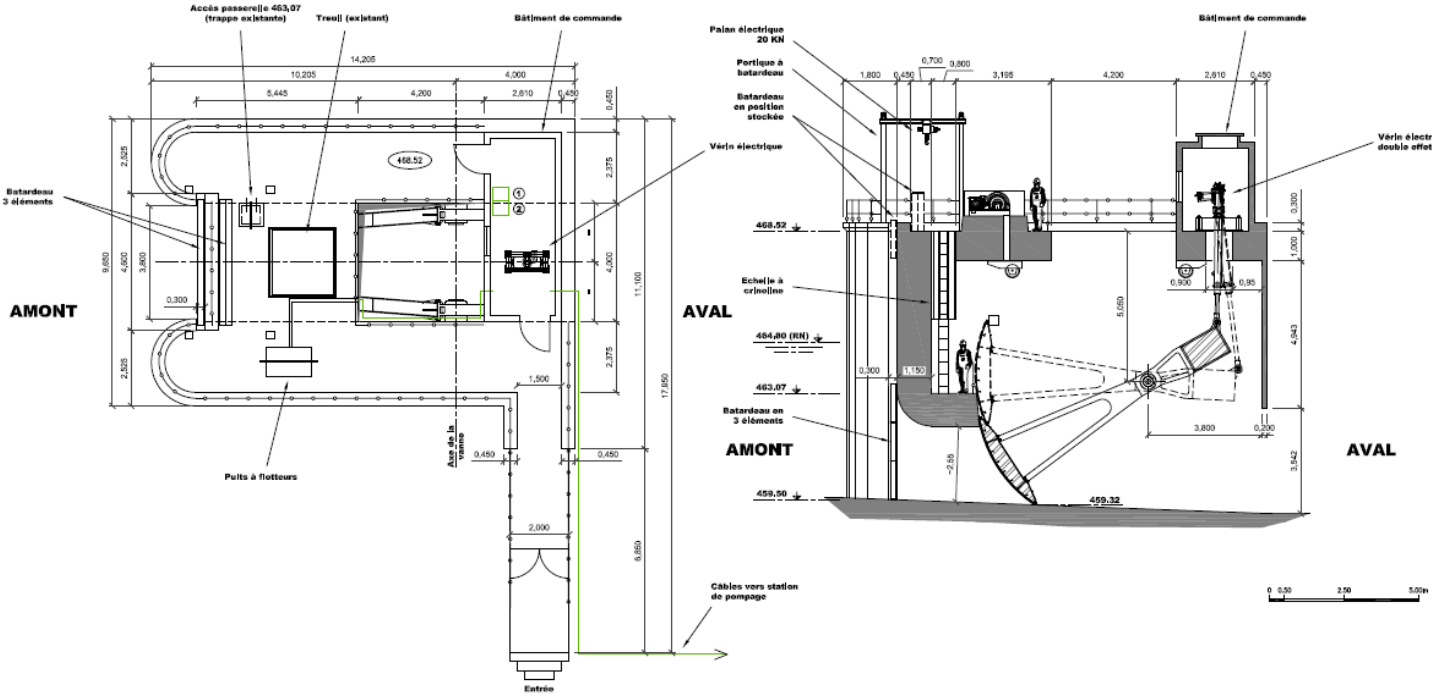
Toute manœuvre automatique (ouverture ou fermeture) de la vanne "segment", requiert donc la présence de la tension 400 V. Pour garantir la présence de l'alimentation électrique, un système d'alimentation sans coupure (onduleur) est prévu dans le bâtiment de commande.

Cet équipement permettra d'assurer le secours de l'alimentation des équipements ci-après suite à la perte tension du réseau Basse Tension :
- motorisation (2,5 kVa en régime permanent ; 7,5 kVa en régime de pointe)
- les projecteurs de 1000 VA
- l'éclairage du local abritant la motorisation (100VA)
- l'armoire d'automatisme et divers (puissance appelée, estimée à 500 VA)

Un secours ultime de l'alimentation pourra être assuré à l'aide d'un groupe électrogène mobile, disponible dans les locaux des services techniques de la Ville de Tarare.

Le temps préconisé pour l'ouverture ou la fermeture de la vanne segment est de 20 minutes dans le but de proposer la meilleure combinaison entre la puissance de l'actionneur d'une part et celle de l'onduleur d'autre part.

La figure ci-dessous présente le plan du projet de rénovation de la vanne de demi-fond et de ses organes connexes :



Graphique 9 : vue en plan et coupe de la vanne confortée

3.2 Exploitation projetée de la vanne

Le mode d'exploitation de l'ouvrage de vidange proposé est le suivant :
- En exploitation normale du barrage hors période de crue, la vanne est mise en mode manuel et la tige du vérin est verrouillée par une béquille de maintien.
- En état de crue, la vanne est déverrouillée pour libérer le vérin et le système de manœuvre est mis en mode automatique. Le mode automatique ne nécessite pas d'intervention de l'exploitant autre que celle nécessaire pour libérer le vérin de ses verrouillages. Le mode de fonctionnement automatique du système est le suivant :

➢ ouverture en 3 paliers initiés par flotteurs :
- auxiliaire "bas" : 1er palier dès que la retenue atteint 465,25 NGF
- auxiliaire "haut" : 2ème palier dès que la retenue atteint 465,30 NGF
- principal : 3ème palier (ouverture totale) dès que la retenue atteint 465,35 NGF (cote de plus hautes Eaux)

➢ fermeture progressive dès que la retenue redescend sous les paliers précédents

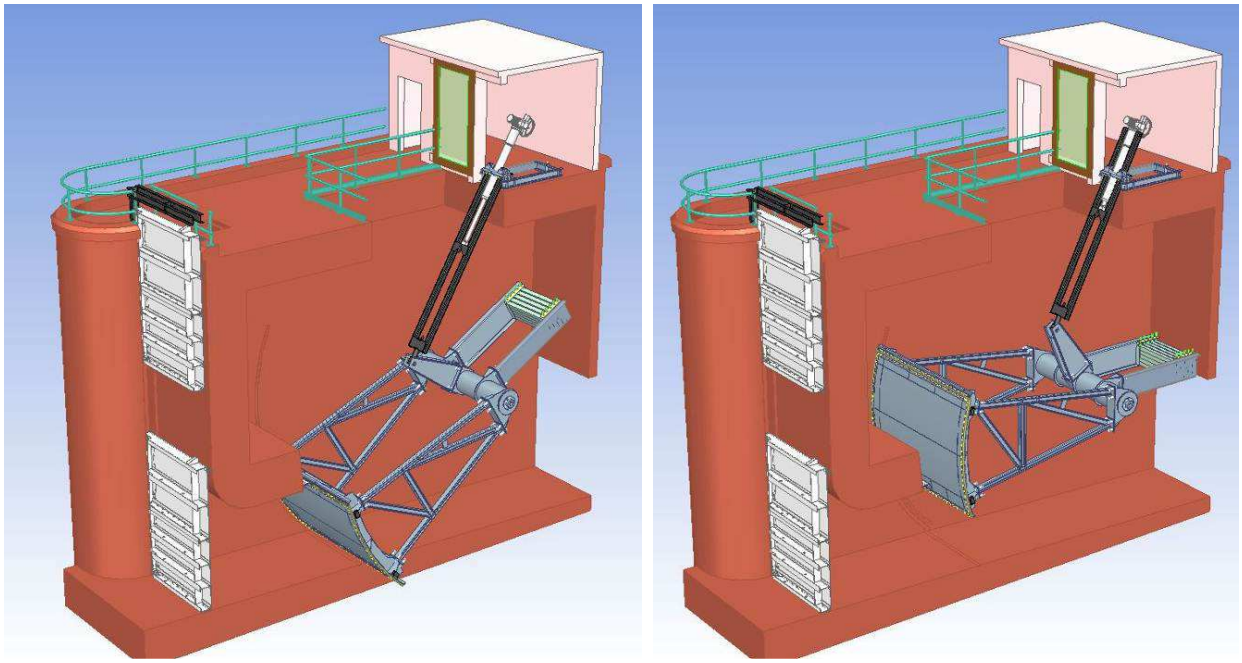
4. VARIANTE TECHNIQUE ET REALISATION DES TRAVAUX

L'entreprise mandataire des travaux a été sélectionnée en janvier 2014. Le programme prévisionnel de l'entreprise prévoyait la fin du chantier en octobre 2014 avec une durée totale de l'opération sur le site de 6,5 mois.

4.1 Variante technique

Au cours des travaux, l'entreprise a proposé une variante technique de la conception de la vanne et de son actionneur :

- le contrepoids est considérablement allégé.
- la position du point d'attache du vérin au génie civil est modifiée en partie haute ;
- la position du point d'attache de la tige du vérin sur la vanne est modifiée ;
- le vérin travaille en traction à l'ouverture de la vanne
- la vanne descend gravitairement à la fermeture de la vanne



Graphique 10 : vue 3D de la variante technique, source : Rouby Industrie

Dans cette configuration, la priorité à l'ouverture par le lest n'est pas conservé ; l'actionneur ne fournit pas d'effort pour fermer la vanne mais contrôle néanmoins la descente de la vanne. Cette variante a été acceptée par la Ville de Tarare et Tractebel Engineering (maitre d'œuvre). La fermeture gravitaire de la vanne permet de supprimer le risque d'ouverture intempestive de la vanne. En cas de crue ultime, l'évacuation de la crue décamilénale par les seuils libres laisse le temps à l'exploitant de mettre en oeuvre les consignes d'exploitation de la vanne (déverouillage du vérin, mise en mode automatique).

En crête, le chassis du vérin est fixé sur un platelage qui transmet les efforts dans le génie civil de la plateforme. Les efforts au niveau des paliers d'articulations sont modifiés par rapport à la situation existante. Les axes existants ne sont pas réutilisés et sont remplacés par un nouveau système d'ancrage dimensionné pour l'effort le plus elevé de la vanne (i.e. en position fermée).

4.2 Equipements installés



Batardeau :

Poids : 2868 kg
Manœuvré par un treuil en crête
Vanne papillon d'équilibrage manoeuvrable à l'aide de brimballes amovibles



Structure mécano-soudées :

Vanne segment : 4,5 tonnes
Contrepoids : 3,8 tonnes
Palier d'articulation scellé dans le béton
Arbre de torsion entre les articulations
Etanchéité : joint oméga à la frontale, joint note de musique pour les étanchéités latérales, joint au couteau sur le seuil





Motorisation :
Vérin electrique de marque *Binder Magnétic*
course utile de l'actionneur : 1040 mm
vitesse : 1,3 mm/s – 50 Hz
Durée de fonctionnement pour une course totale : 13 min environ
Effort de dimensionnement : 15 T
Brimballes reliant le vérin au bras de manœuvre de la vanne

Equipements electriques :
Equipements localisés dans le nouveau local de l'exploitant sur la plateforme en crête
Nouvelle armoire de commande
Transformateur 20kVA Triphasé
Autonomie de l'onduleur 20 kVa : 30min
projecteurs à LED 150 W sur la plateforme

4.3 Problématiques rencontrées au cours du chantier

4.3.1 Amiante

La présence d'amiante sur les pièces d'appui des étanchéités latérales a été constatée au début des travaux. La préparation du chantier a ainsi débuté par une évaluation des risques pour déterminer quelle sous-section de la réglementation était concernée (issue des codes de la santé et/ou du travail) ;
Les activités de décapage ou de découpe de matériels recouverts de peinture amiantée relèvent de la sous-section 4 ; les travaux à Joux ont été instruits selon les prescriptions de cette sous-section. L'entreprise est agréée pour les prestations relevant de la sous-section 4 et a proposé un protocole de nettoyage et decoupe des pièces vis-à-vis du risque d'exposition au plomb et à l'amiante.

4.3.2 Validation de la variante technique

La solution proposée par l'entreprise déroge au cahier des charges du projet de base et n'est pas conforme aux engagements de l'entreprise lors de la mise au point du marché.
Cette variante modifiant le fonctionnement de la vanne (abandon de la priorité à l'ouverture de la vanne), le Maitre d'Ouvrage a sollicité l'avis de la DREAL sur le principe de fonctionnement proposée. La DREAL et son appui technique n'ont pas souhaité se positionner sur le choix de la motorisation.
Pour pouvoir recevoir l'approbation du maître d'œuvre, Tractebel Engineering France a demandé à l'entreprise de justifier de manière détaillée et claire la variante technique. Cette nouvelle solution technique a nécessité de revoir complètement la conception, le dimensionnement et les études d'execution de l'équipement. Ceci a engendré une durée plus importante des phases Etudes et VISA. L'équipement complet a été fourni par l'entreprise en juin 2015.

5. CONCLUSIONS

Les études règlementaires du barrage de Joux (Etude de dangers, revue de sûreté) ont démontré le caractére obsolète du système de manœuvre de la vanne de demi-fond de l'ouvrage.
Cet organe de vidange a donc fait l'objet d'une mise à niveau complète (remplacement du batardeau, remplaceemnt de la vanne segment et de son système de manœuvre, construction d'un local technique pour abriter les équipements électriques) permettant à l'exploitant de disposer d'un équipement répondant aux exigences de sûreté des barrages.
Les études réalisées en phase projet ont permis de définir plusieurs solutions techniques (conservation du treuil électrique existant, motorisation par vérin oléohydraulique ou par vérin électrique). Le choix de la nouvelle motorisation s'est porté sur un vérin de manœuvre électrique pour sa simplicité d'utilisation et requiérant peu de maintenance.
En phase travaux, le projet a nécessité une adaptation relative au fonctionnement de la vanne de demi-fond : suppression de la priorité à l'ouverture de la vanne. Cette modification a été discutée en concertation avec les différents acteurs (Entreprise, maitre de l'ouvrage, service de contrôle) et a eu pour effet d'allonger significativement la durée du chantier de travaux.
L'exploitation de la vanne de demi-fond du barrage de Joux a ainsi été simplifiée par les travaux et la sûreté de l'ouvrage a été augmentée vis-à-vis de l'évacuation des crues.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient M. Jacquemot (Ville de Tarare) et Louis Tricca (société Hydraxat) pour leur appui dans le cadre de l'expertise de la vanne de demi-fond du barrage de Joux.

BIBLIOGRAPHIE

[1] Tractebel Engineering - Coyne et Bellier, L. Tricca, M. Touzeau (2009). rapport d'expertise de la vanne segment à treuil electrique
[2] Tractebel Engineering – T. Bourgouin, L. Bazin (2013). Etude de dangers du barrage de Joux
[3] Tractebel Engineering – T. Bourgouin, (2011). Compte-rendu de l'examen technique complet du barrage de Joux

RENOVATION DES VANNES DES EVACUATEURS DE CRUE DU BARRAGE DE SARRANS

Improve of Sarrans dam spillways gates

Pierre, M., GRENOUILHAT
EDF-CIH 18 avenue Poincaré, 19311 Brive-la-gaillarde
pierre.grenouilhat@edf.fr

MOTS CLÉS

SARRANS, vanne STONEY/WAGON, amiante, réparations mécaniques, joints

RÉSUMÉ

Les vannes des évacuateurs de crue du barrage de Sarrans étaient fortement dégradées et n'avaient pas fait l'objet d'opérations de maintenance depuis de nombreuses années. Suite à l'expertise de leur état réalisée en 2009, une lourde campagne de rénovation a été menée au cours des années 2011 et 2012, et s'est terminée en 2014 par le remplacement des chaines « GALLE ».

ABSTRACT

Gates of Sarrans dam spillways were really degraded and did not have been care about for many years. Following the expertise of their state realized in 2009, big works were done in 2011 and 2012 and ended in 2014 by the replacement of GALLE chains.

1. INTRODUCTION

Les vannes des évacuateurs de crue du barrage de Sarrans étaient classées par le maître d'ouvrage au niveau de criticité A, essentiellement à cause de la présence d'une forte corrosion, à l'impact réglementaire de ces vannes et au contexte particulier de fin de concession de la vallée de la Truyère.

Afin de dresser un diagnostic précis de ces vannes, une expertise approfondie a été menée au début de l'année 2009. Cette expertise a consisté à :

- effectuer in situ une série d'investigations afin de dresser leur état (examens visuels, prises de cotes, mesures d'épaisseurs, prélèvements d'échantillons de métal),
- réaliser une modélisation et un calcul de résistance mécanique (par la méthode des éléments finis) des vannes suivant plusieurs cas de figure (vannes neuves, vannes dégradées) en prenant en compte les constats effectués sur site.

Les conclusions de l'expertise ont montré que la tenue mécanique des vannes était assurée pour une cote d'exploitation de l'aménagement à RN, dans leur état constaté lors de l'expertise. Néanmoins, la poursuite du développement du phénomène de corrosion présent devait être stoppée pour limiter l'impact des diminutions d'épaisseur sur la structure des vannes. En effet une aggravation des pertes d'épaisseur pouvait à terme remettre en cause la tenue mécanique des vannes.

2. DESCRIPTION DE L'AMENAGEMENT

L'aménagement de Sarrans est situé dans le département de l'Aveyron, sur le cours d'eau de la Truyère. Il été mis en service en 1934. En 1981 un suréquipement a été installé. Aujourd'hui, il est composé des ouvrages suivants :

- un barrage poids à profil triangulaire de 105 mètres de haut (altitude de la crête 648 mNGF), avec une longueur de couronnement de 225 mètres.
- un ouvrage d'évacuation des crues situé en rive gauche du barrage, composé de 2 vannes à double corps. Ces évacuateurs de crue peuvent évacués un débit total de 2200 m^3/s à la cote RN (646,80 mNGF).
- un ouvrage de vidange de fond, composé d'un conduit de 5 mètres de diamètre dont la capacité d'évacuation totale est de 210 m^3/s à la cote RN
- 4 conduites forcées situées dans le corps du barrage ou le long du parement aval (Groupe de production G4) dont :
    - 3 conduites forcées de 3 mètres de diamètre datant de la construction de l'ouvrage,
    - 1 conduite de 5 mètres de diamètre installée lors du suréquipement.
- une usine située en pied de barrage composée de 4 groupes de production pour un débit total d'équipement de 240 m^3/s.

3. PRESENTATION DES VANNES

Les 2 évacuateurs de crue du barrage de Sarrans sont situés en rive gauche du barrage, à environ 80 mètres à l'amont de celui-ci.

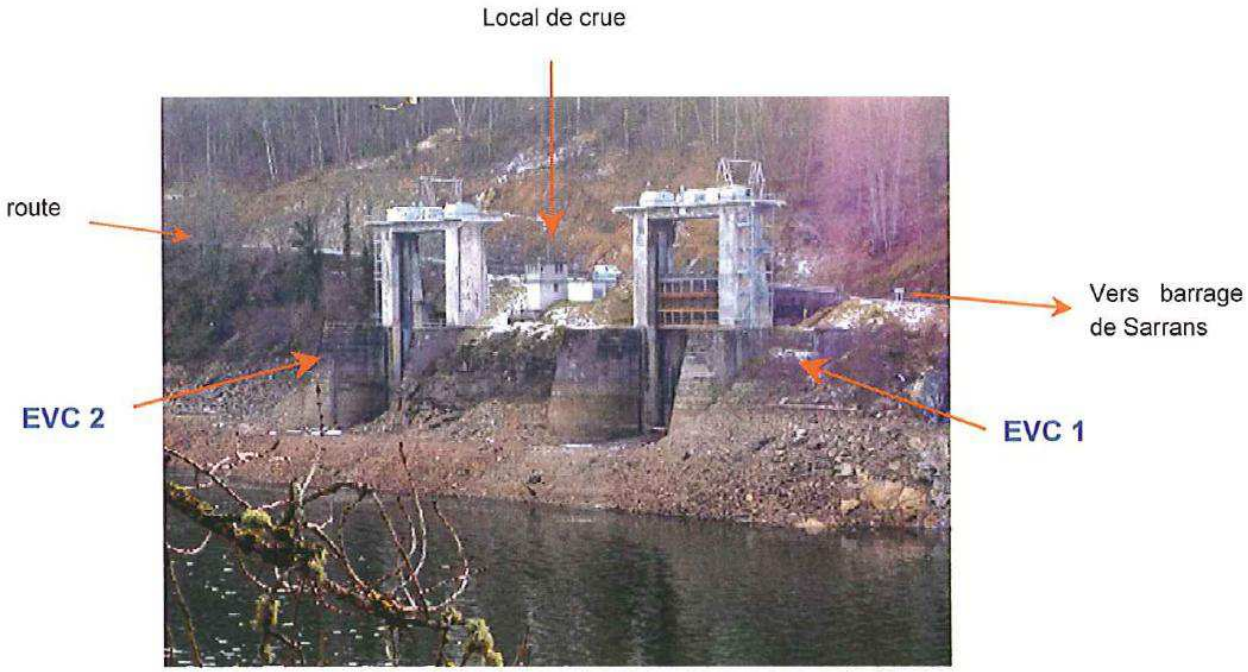


Figure 1 : Photo d'ensemble des 2 évacuateurs de crue

Chaque évacuateur de crue, de conception identique, dispose de 2 vannes indépendantes : une vanne supérieure de type wagon et une vanne inférieure de type STONEY.



Figure 2 : Vue des 2 vannes depuis l'amont

3.1 Vannes inférieures charpentées

Les caractéristiques des 2 vannes inférieures sont les suivantes :

- Dimensions principales (tablier) : largeur 13,30 m, hauteur 8 m
- Poids : 73,8 t
- Cotes de fonctionnement
  - Vanne en position basse (position normale) : Seuil à 634 m NGF
  - Vanne en position haute : Seuil à 647,5 m NGF
- Manœuvre : Treuils et chaines « GALLE » - déplacement de la vanne à 0,5 m par minute

3.1.1 Structure de la vanne

La vanne est composée d'une tôle de bordé d'épaisseur variant de 8 à 10 mm selon que l'on se trouve en partie supérieure, intermédiaire ou inférieure de la vanne.
Cette tôle de bordé est renforcée à l'amont par une structure treillis. Cette dernière est constituée de quatre poutres principales horizontales en forme « d'oméga étiré ». Chaque poutre est réalisée à partir de bandes et profilés métalliques assemblés par rivetage. Ces poutres transmettent les efforts à des longerons horizontaux et verticaux constitués de profilés métalliques de type U et IPN solidaires de la tôle de bordé, par l'intermédiaire de cornières en L. Latéralement, la continuité avec la vanne supérieure et les organes de manœuvre est assurée par deux caissons verticaux réalisant les fonctions de guidage, d'étanchéité et de liaison avec le génie civil.

3.1.2 Roulement et guidage de la vanne

Le roulement et le guidage de la vanne sont assurés :

- À l'aval, d'une part par deux trains de galets STONEY indépendants du tablier (qui se déplacent à mi-vitesse de celle de la vanne par l'intermédiaire d'un mouflage) et d'autre part par 2 galets solidaires du tablier.
- Latéralement, par 8 galets solidaires du tablier.
- A l'amont, par 8 galets solidaires du tablier (contre-guidage).

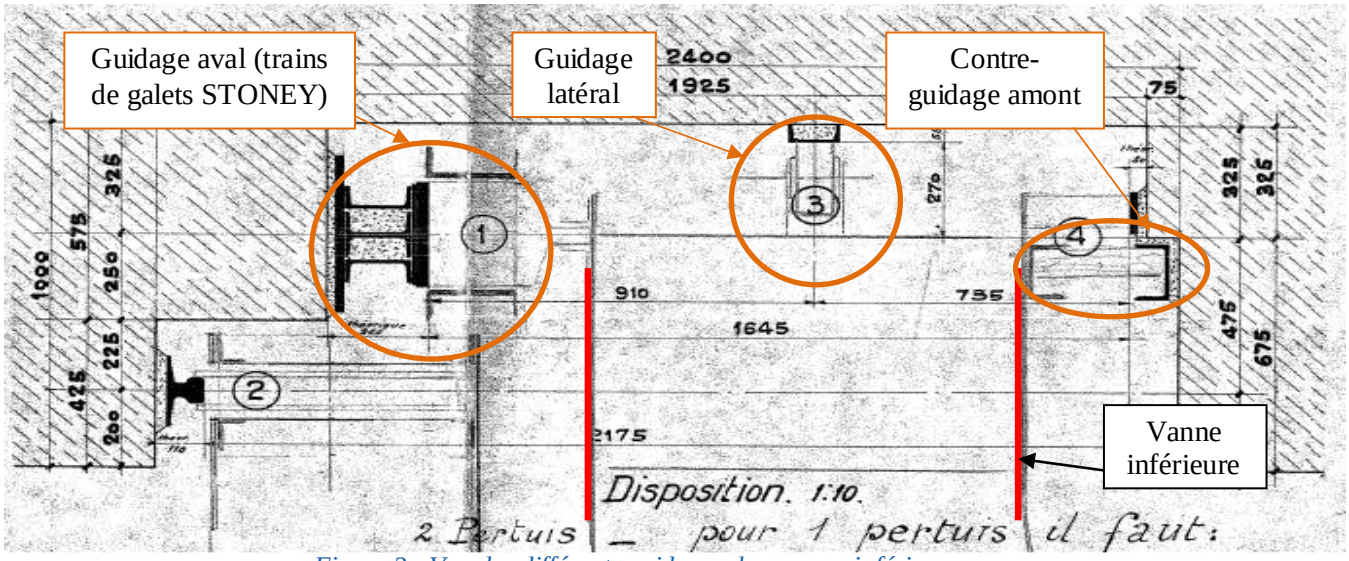


Figure 3 : Vue des différents guidages des vannes inférieures

3.1.3 Étanchéités

- Étanchéité de seuil

L'étanchéité au seuil est faite par des poutres en bois fixées sur un profilé métallique de la structure de la vanne par des boulons et reposant sur la portée d'étanchéité de seuil métallique scellée dans le béton.

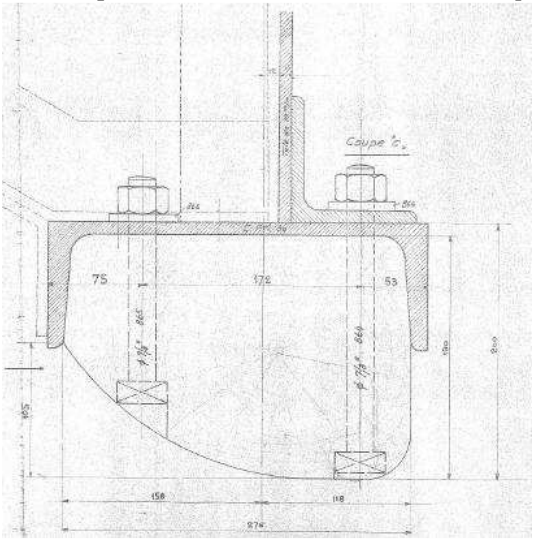


Figure 4 : Coupe de la poutre en bois qui fait l'étanchéité de seuil

- Étanchéités latérales

La pièce d'étanchéité latérale est une poutre en bois qui coulisse verticalement dans un profilé métallique en U. Cette poutre en bois de chêne est montée dans un profilé métallique en U solidaire du tablier de la vanne.



Figure 5 : Vue de l'étanchéité latérale

- Étanchéités frontale et latérale inter-vannes

L'étanchéité frontale et latérale inter-vannes est obtenue par un joint caoutchouc de type « note de musique ».
Un joint racleur constitué d'une lame de caoutchouc plate limite les pénétrations de corps étrangers sur toute la périphérie (déflecteur).
Nota : les étanchéités inter-vannes de chaque évacuateur sont basées sur un principe similaire mais leur conception est néanmoins différente. Sur l'EVC n°1, le joint « note de musique »et le joint racleur sont sur deux supports distincts alors que sur l'EVC n°2, ils se situent sur le même support.

Les photos ci-dessous illustrent les 2 montages :

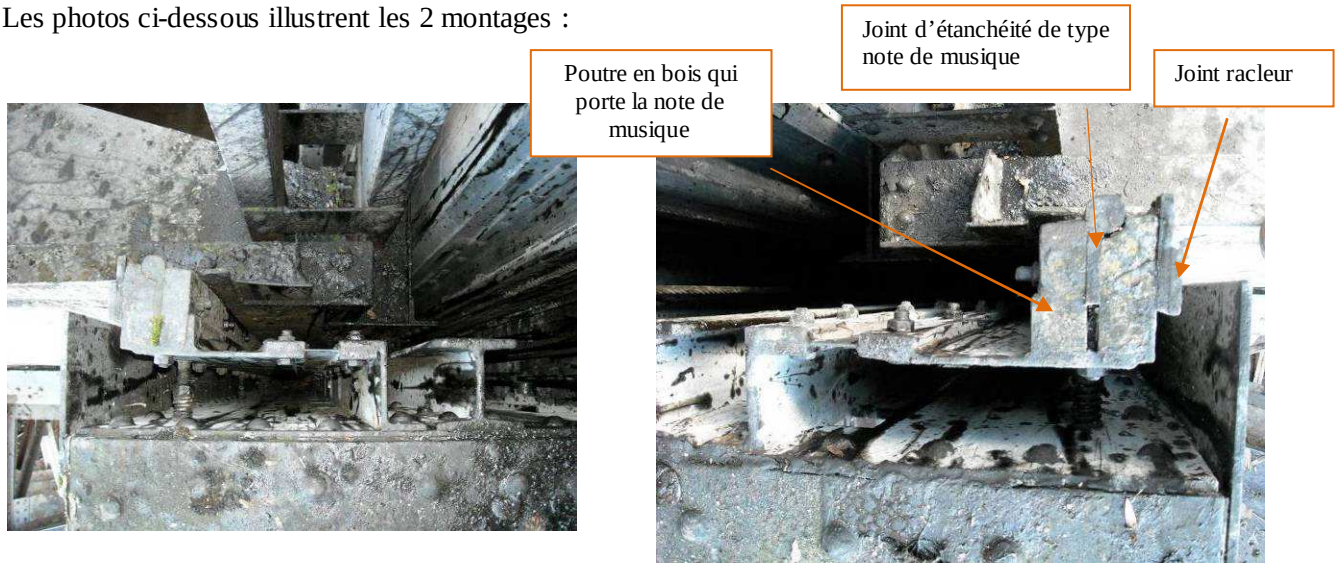


Figure 6 : Vue du système d'étanchéité inter-vanne de l'évacuateur de crue n°2



Figure 7 : Vue de système d'étanchéité inter-vanne de l'évacuateur n°1

3.1.4 Pièces fixes

La structure fixe est composée des chemins de roulement des trains de galets, des chemins de roulement des galets de guidage latéraux, des chemins de roulement des galets de contre-guidage amont (voir ci-avant) et des portées d'étanchéité de seuil et latérale.

- Voies de roulement des trains de galets STONEY

Les trains de galets STONEY roulent sur 2 bandes de roulement (une en rive droite et une en rive gauche) de dimensions 300 mm (largeur) * 30 mm (épaisseur) et de longueur 18100 mm. Ces bandes de roulement s'appuient sur une structure métallique composée de 4 profilés métalliques en U reliés au génie civil.

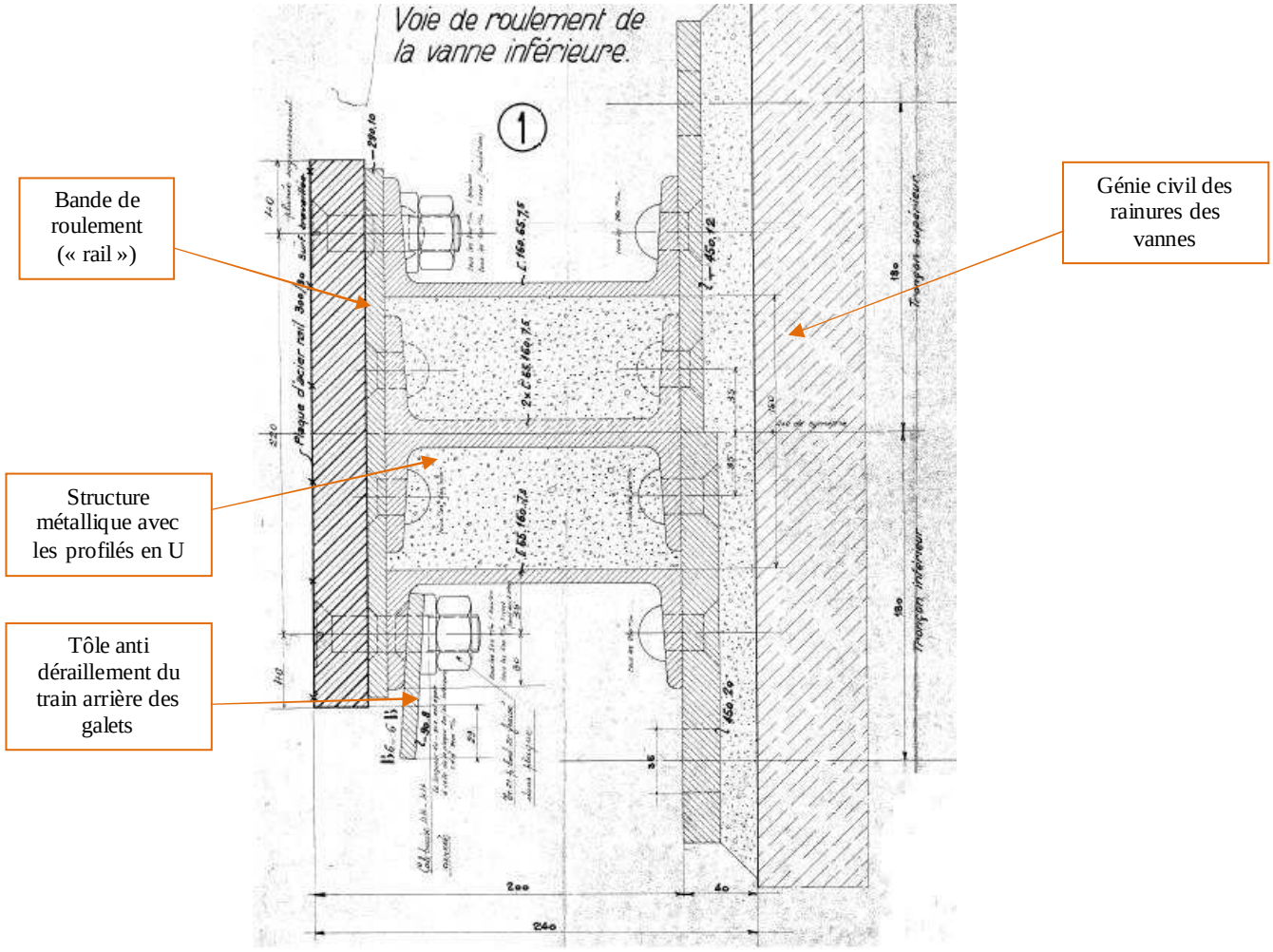


Figure 8 : Vue en coupe du chemin de roulement des trains de galets STONEY

- Voies de roulement des galets de contre-guidage

Les galets de contre-guidage roulent sur 2 bandes de roulement (une en rive droite et une en rive gauche) de dimensions 120 mm (largeur) * 20 mm (épaisseur) et de longueur 24200 mm. Ces rails, solidaires du guidage de l'étanchement vertical, sont soudés sur des plaques d'acier, elles-mêmes boulonnées dans le génie civil des niches des vannes.

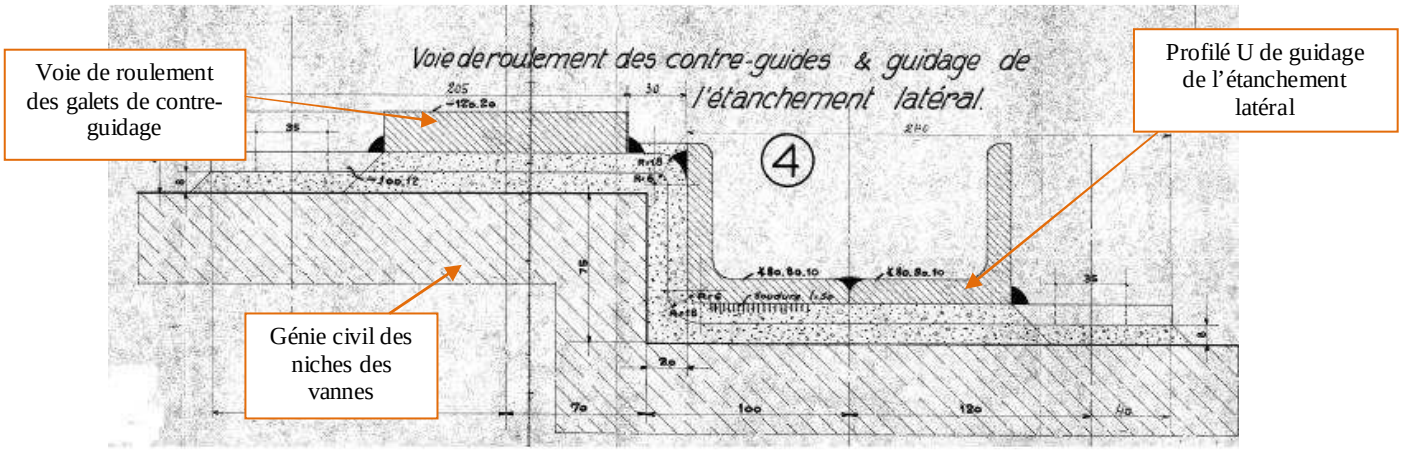


Figure 9 : Coupe de la voie de roulement des galets de contre-guidage

- Voies de roulement des galets de guidage latéraux

Les galets de guidage latéraux roulent sur 2 profilés métalliques en U (un en rive droite et un en rive gauche) de longueur 13500 mm. Ces profilés métalliques en U sont soudés à des cornières elles-mêmes boulonnées au génie civil des niches des vannes.

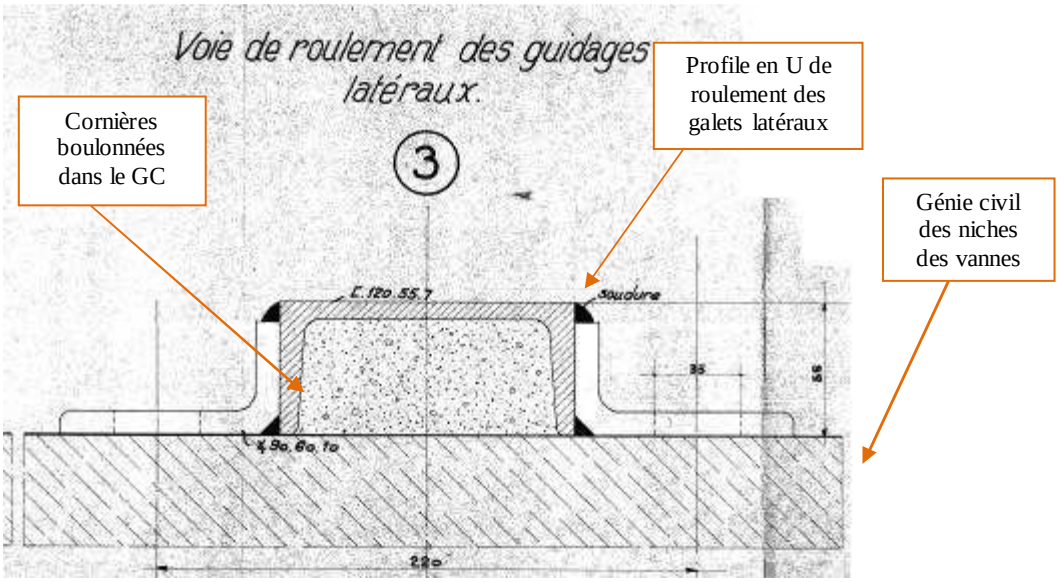


Figure 10 : Coupe de la voie de roulement des galets de guidage latéral

- Portée d'étanchéité latérale

La portée d'étanchéité latérale (voir Figure 9) est un profilé métallique en U (2 profilés en L soudés) 160x80x10 mm d'une longueur 14010 mm.

- Portée d'étanchéité de seuil

La portée d'étanchéité de seuil est une plaque d'acier de dimensions 500 mm (largeur) * 40 mm (épaisseur) qui forme un U au sol.

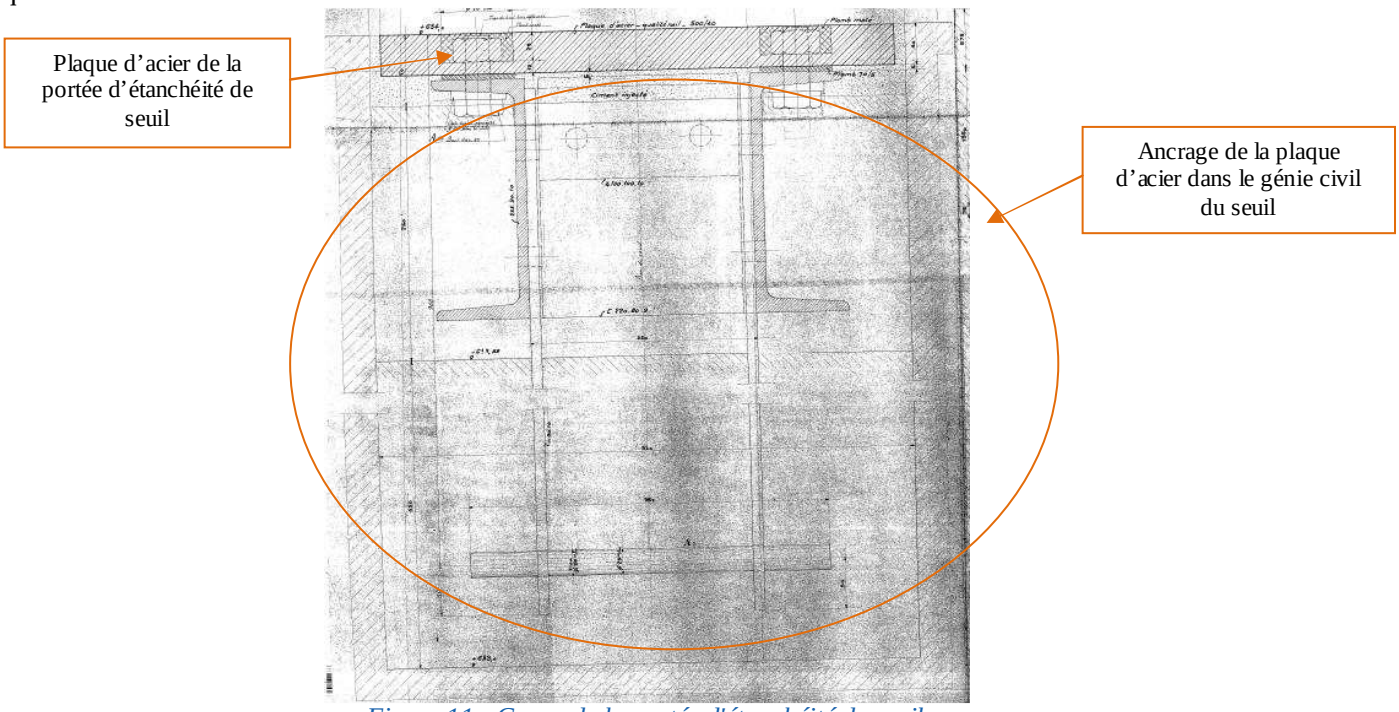


Figure 11 : Coupe de la portée d'étanchéité de seuil

3.1.5 Organes de manœuvre

Les vannes sont manœuvrées par des treuils électriques à chaînes « GALLE ».

Les caractéristiques des chaînes sont les suivantes :

- Longueur / chaîne = 34750 mm
- Masse / chaîne = ~3320 kg
- Pas des chaînes = 130 mm
- Diamètre des axes engrenés = 48 mm
- Nombre de flasques / maillon = 4
- Épaisseur des flasques = 8,5mm
- Charge de levage / chaîne : ~32T
- Vitesse de manœuvre : 0,5 m/min

3.2 Vannes supérieures charpentées

3.2.1 Généralités

Les vannes supérieures sont de type wagon. Les caractéristiques de ces 2 vannes sont les suivantes :

- Dimensions principales (tablier) : largeur 13,30 m, hauteur 5 m (Hauteur d'origine : 4 m, Réhausse : 0,8 m + 0,2 m).
- Poids à l'origine : 23,30 t (Note de calcul statique des vannes) -> avec les rehausses mises en place, on peut considérer que chacune des 2 vannes supérieures pèse aujourd'hui aux environ de 26 t.
- Cotes de fonctionnement :
    - Vanne en position basse : Seuil à 637,2 m NGF,
    - Vanne en position normale : Seuil à 642 m NGF,
    - Vanne en position haute : Seuil à 650,3 m NGF.

3.2.2 Structure de la vanne

La tôle de bordé située à l'amont est constituée de tôles d'épaisseur 7 mm. Cette tôle de bordé est renforcée à l'aval par une structure treillis. Cette dernière est constituée de deux poutres principales horizontales en forme d'arc. Chaque poutre est réalisée à l'aide de bandes et profilés métalliques assemblés par rivetage. Ces poutres transmettent les efforts à des profilés horizontaux et verticaux solidaires de la tôle de bordé, par l'intermédiaire de cornières en L et de profilés reconstitués. La vanne est équipée d'un déversoir et d'une rehausse en partie supérieure.



Figure 12 : Vue de l'aval d'une vanne supérieure



Figure 13 : Vue de la face amont d'une des vannes supérieures

3.2.3 Roulement et guidage de la vanne

Le guidage est réalisé à l'aval par 4 galets en rive gauche et 4 galets en rive droite prenant appui sur un rail de roulement solidaire du béton. Sur chacun des 4 galets en rive droite et en rive gauche, les 2 galets extérieurs disposent de joues qui assurent le guidage latéral « gauche-droite » de la vanne. Le contre-guidage est assuré par 4 galets prenant appui sur un chemin de roulement solidaire de la vanne inférieure.

3.2.4 Pièces fixes

La structure fixe est uniquement constituée par le rail de roulement des galets de guidage aval. Ce rail de roulement est un rail Burbach n°4 d'une longueur de 13 240 mm.

3.2.5 Étanchéités

Les pièces d'étanchéité frontale et latérale sont solidaires de la grande vanne inférieure (voir paragraphe étanchéité sur les grandes vannes).

3.2.6 Organes de manœuvre

Les vannes sont manœuvrées par des treuils électriques à chaînes « GALLE ».
Les caractéristiques des chaînes sont les suivantes :

- Longueur / chaîne = 36838 mm
- Masse / chaîne = 1296 kg
- Pas des chaînes = 78 mm
- Diamètre des axes engrenés = 29 mm
- Nombre de flasques / maillon = 4
- Épaisseur des flasques = 5 mm
- Charge de levage / chaîne : ~12T
- Vitesse de manœuvre : 1 m/min

4. CONCLUSIONS DU DIAGNOSTIC PRELIMINAIRE

L'expertise qui a eu lieu au début de l'année 2009 consistait à :

- Prendre des mesures d'épaisseur sur les éléments de structure des vannes afin de réaliser un calcul de résistance mécanique de la structure des vannes dans leur état actuel. La conclusion de cette note de calcul indiquait que :
    - Les vannes supérieures ne présentaient pas de faiblesse,
    - La tenue mécanique des vannes inférieures dans leur état était vérifiée mais qu'il convenait de stopper la corrosion présente par des traitements adaptés.
- Dresser un bilan complet visuel de l'état des vannes (structure, étanchéités, organes de roulement/guidage) et de leurs pièces fixes. Les conclusions de cette expertise visuelle étaient les suivantes :
    - Concernant les vannes supérieures :
        - les structures étaient globalement en très bon état (aucune perte d'épaisseur significative signalée),

- les chaînes « GALLE » présentaient des axes partiellement grippés,
- les chemins de roulement des galets de guidage étaient dans en bon état.

o Concernant les vannes inférieures :
- les structures treillis présentaient de nombreuses zones corrodées avec des pertes d'épaisseur voire une destruction partielle constatée sur de nombreux éléments de la structure,
- les pièces fixes amont étaient très dégradées,
- les chemins de roulement aval et latéraux présentaient de la corrosion superficielle, principalement dans leur partie inférieure,
- les plats anti-déraillements des trains de galets STONEY étaient ondulés par la corrosion,
- le système d'étanchéité latérale à ressort était fortement corrodé,
- les étanchéités inter-vannes étaient arrachées en de nombreux endroits,
- les chaînes « GALLE » présentaient des axes partiellement grippés.

5. PERIMETRE DES TRAVAUX

A la vue des constats effectués lors du diagnostic préliminaire, le périmètre de travaux suivant a été retenu au stade de la phase APD de l'affaire :

5.1 Vannes inférieures de type STONEY

5.1.1 Structure charpentée

Le périmètre de travaux suivants a été retenu :
- Enlèvement de la protection anticorrosion résiduelle encore présente sur la structure de la vanne (**attention peinture contenant de l'amiante**)
- Réalisation des travaux mécaniques nécessaires suite à l'expertise de l'ensemble de la structure (réparation et/ou remplacement d'éléments de la structure)
- Application d'un nouveau système de peinture anticorrosion HNG 600 (conformément aux spécifications d'EDF) sur l'ensemble de la structure

5.1.2 Matériels de roulement et de guidage

Trains de galets STONEY
Le choix a été fait de remplacer des trains de galets STONEY dégradés par de nouveaux trains de galets de conception identique. Les câbles de manœuvre des trains de galets ainsi que les attaches de ces câbles au génie civil ont également été remplacés.

Divers galets
Le choix a été fait de remplacer a minima les axes et les bagues bronze de chaque galet et selon expertise, de procéder au remplacement complet de certains galets.

5.1.3 Étanchéités

Le périmètre des travaux retenu a été le suivant :
- Les poutres en bois réalisant les étanchéités de seuil ont été changées en 2008, elles n'ont donc pas été remplacées à nouveau. Néanmoins, la boulonnerie de fixation présentait déjà des traces de corrosion, elle a donc été remplacée par de la visserie résistant à la corrosion (acier galvanisée classe 8.8).
- Le dispositif à ressort de l'étanchéité latérale était détruit par la corrosion. Les profilés métalliques en U qui portent l'étanchéité bois étaient également fortement corrodés. Le choix a été de procéder à la dépose complète du système existant et son remplacement par un système à joint caoutchouc de conception nouvelle.
- Les étanchéités inter-vannes étaient ponctuellement arrachées voir manquantes. Le choix a été fait de les déposer puis de les remplacer sur les 2 évacuateurs de crue par des étanchéités de conception identique à celle des étanchéités inter-vannes de l'EVC n°1.

5.1.4 Pièces fixes

Chemins de roulement des trains de galets STONEY
Les chemins de roulement des trains de galets STONEY étaient corrodés. Cette corrosion avait engendré des ondulations au niveau de la tôle anti déraillement de ces trains de galets. Les profilés métalliques en U qui relient le chemin de roulement au génie civil semblaient en bon état. La solution retenue pour ces chemins de roulement a donc été de remplacer les tôles anti-déraillement et les chemins de roulement ainsi qu'un renouvellement du système anticorrosion après décapage de toute la structure composée des profilés métalliques en U.

Chemins de roulement des galets de guidage latéral
Ces chemins de roulement étaient également corrodés. La solution retenue a été de renouveler le système anticorrosion après décapage.

Chemins de roulement des galets de contre-guidage et profilés métalliques en U d'appui des bois d'étanchéité
Ces pièces fixes étaient très corrodées. Elles ont été remplacées sur la hauteur du profilé métallique en U d'appui (14010 mm). Les nouvelles pièces fixes ont été revêtues d'un système de protection anticorrosion de type HNG 600.

5.1.5 Chaînes Galle

Le remplacement des chaînes « GALLE » a été envisagé dans le cadre de l'affaire. L'opération a été reportée en 2014 du fait des difficultés rencontrées lors de la phase de fabrication en atelier et des contraintes de sûreté présentes en fin de chantier.

5.2 Vannes supérieures de type wagon

5.2.1 Structure

L'ensemble de la structure des vannes était globalement en bon état et ne présentait pas de traces importantes de corrosion. Le choix a été fait de ne procéder à aucun travaux sur ces dernières.

5.2.2 Matériels de roulement et de guidage

Comme pour les vannes inférieures, le choix a été fait de remplacer a minima les axes et les bagues bronze de chaque galet et selon expertise, de procéder au remplacement complet de certains galets.

5.2.3 Pièces fixes

Les chemins de roulement des vannes supérieures était globalement en bon état, le choix a été fait de procéder à un neuvage du système anticorrosion.

5.2.4 Chaînes Galle

Voir §5.1.5

6 DEROULEMENT DU CHANTIER

6.1 Conditions d'intervention (ITE)

Les travaux ont débuté au mois d'avril 2011 et se sont terminés au mois de décembre 2012. L'EVC n°1 a été traité en 2011 et l'EVC n°2 en 2012. Pendant toute la durée du chantier, une instruction temporaire d'exploitation (ITE) rédigée conjointement avec la maîtrise d'ouvrage a été mise en place afin de concilier au mieux les 3 contraintes suivantes :

- Être capable de passer une crue millénale à tout instant (contrainte imposée par la DREAL),
- Protéger au mieux le chantier,
- Conserver un niveau de retenue le plus haut possible pour avoir des pertes de production les moins élevées possibles.

Une étude hydraulique rédigée par le CIH a permis d'établir le compromis suivant :

- Une exploitation du plan d'eau à 632 m NGF maximum (soit 2 mètres en dessous du seuil des EVC,
- La mise en place d'un batardeau submersible d'1m20 de haut dans la passe de l'EVC en travaux,
- La nécessité de pouvoir remonter les vannes et évacuer la passe en travaux de toutes les installations de chantier (échafaudages principalement) en moins de 8 heures à tout moment du chantier. Afin de passer la crue millénale, la passe en travaux devait effectivement être entièrement disponible, sans qu'aucun obstacle ne puisse venir empêcher le bon écoulement de l'eau. Pour cela, afin de pouvoir prévenir les entreprises d'un éventuel risque de crue, une surveillance de la météo à 5 jours a été mise en place par la DTG. Un point était fait lors de chaque réunion de chantier (rythme hebdomadaire, le jeudi) sur le risque crue à venir avec mobilisation ou pas du personnel sur site pour une éventuelle intervention.

Ces dispositions permettaient donc de s'assurer du passage de la crue millénale avec laminage de la crue. Le batardeau de 1m20 de haut permettait, avec un gradient de crue millénale et en partant de la cote d'exploitation de 632 m NGF de disposer de 8 heures avant que l'eau ne déborde par dessus ce dernier. Ces 8 heures étaient mises à profit pour démonter l'ensemble des installations de chantier se situant en-dessous de la cote PHE à 647 m NGF.

La photo ci-après montre la configuration décrite ci-avant avec :

- Le batardeau d'1m20 (4 éléments) installé dans les rainures situées à l'amont de la passe,
- Les échafaudages installés pour l'accès à l'ensemble de la vanne,
- Le seuil de l'EVC dénoyé (seuil à 634 m NGF et niveau inférieur ou égale à 632 m NGF durant toute la période de chantier).



Figure 14 : Vue des échafaudages dans une passe et du batardeau amont

6.2 Installations de chantier

Pour la réalisation du chantier, les principales installations de chantier ont été les suivantes :

- Une grue à tour située sur la plateforme au centre des 2 EVC. Cette grue dont le rayon d'action couvrait l'intégralité de la zone de chantier, permettait notamment de réaliser la plupart des manutentions lourdes pour l'approvisionnement du chantier (batardeau, échafaudages, portique de manutention, trains de galets, sableuses, etc. …).



Figure 15 : Vue de la grue à tour au milieu des 2 EVC

- Un portique de manutention au niveau de la plateforme des treuils des EVC. Ce portique servait notamment aux manutentions des pièces situées dans les rainures (trains de galets, galets, système d'étanchéité, chaînes « GALLE », …) inaccessibles avec la grue à tour.



Figure 16 : Vue du portique de manutention

- Un confinement autour des échafaudages pendant les opérations de désamiantage



Figure 17 : Vue d'une partie du confinement

6.3 Bilan du chantier sur l'EVC n°1

Le chantier sur l'EVC a démarré le 5 Avril 2011. L'EVC a été rendu à l'exploitation le 6 Mars 2012, la durée du chantier a donc été de 11 mois. Il a été découpé approximativement selon les étapes suivantes :

- Mise en place des installations de chantier (grue, batardeau, échafaudages, portique) : 1 mois,
- Dépose des étanchéités, organes de roulement et de guidage : 2 semaines,
- Confinement de la zone : 2 semaines,
- Dépose du système anticorrosion de la vanne par sablage (intervention en sous-section 3 selon la réglementation amiante) : 3 mois,
- Nouveau sablage puis application de la couche primaire du nouveau système anticorrosion : 2 semaines,
- Expertise puis réparation mécanique sur la structure de la vanne : 1,5 mois,
- Application des 2^{ième} et 3^{ième} couches du nouveau système anticorrosion sur la vanne : 1,5 mois,
- Travaux sur les pièces fixes (remplacement et/ou traitement anticorrosion) : 1,5 mois,
- Remontage étanchéités, galets, trains de galets : 3 semaines,
- Démontage des échafaudages : 2 semaines.

Les principaux points positifs et négatifs à noter sur cette première réalisation sont les suivants :

- Des difficultés ont été rencontrées :
    - pour le décapage de la peinture amiantée. Le sous-traitant de rang 2 était en effet peu expérimenté sur ce genre de prestations et disposait de peu de moyens matériels et humains pour un chantier d'une telle ampleur. Au final, le délai d'intervention a été multiplié par 2 (3 mois au lieu de 1,5 mois). Le travail effectué était néanmoins de qualité.
    - pour l'application du système anticorrosion. Parmi les nombreux écarts constatés, on note que :
        - Le premier primaire a été exécuté sur un support mal nettoyé et pas dépoussiéré. De nombreuses zones ont été oubliées. Cette couche de primaire a donc du être reprise entièrement,
        - Les réceptions de chaque couche donnaient lieu à de nombreuses remarques, car de nombreuses zones non peintes ont été constatées (derrière/dessous de cornière ou de rivet),
        - Pour toutes les couches, aucune pré-touche au pinceau n'a été effectuée, alors que la géométrie de la vanne nécessitait un soin particulier sur ce point. Cet écart a engendré notamment de nombreuses coulures sur la vanne.

- pour l'approvisionnement des chaînes « GALLE ». Les chaînes « GALLE » n'ont pas pu être remplacées sur cet EVC faute d'avoir pu être fabriquées à temps. Le même type de problème que pour les chaînes de Tuilières (approvisionnement des aciers, maitrise des traitements thermiques, etc. …) est apparu lors des discussions avec le sous-traitant du Titulaire. Ne pouvant se mettre d'accord avec ces derniers, le contrat a été rompu et passé avec un autre sous-traitant. Les chaînes ont donc été fabriquées en 2012 et ont finalement été montées en 2014 lors de la vidange de la retenue.

- Le remplacement des éléments de structure en mauvais état s'est déroulé sans soucis.

Après sablage, l'expertise de la structure de la vanne a permis de déterminer le périmètre de réparations à effectuer sur cette dernière. Ce périmètre a été le suivant :

- Remplacement de la panne Z support du joint inter-vanne
- Remplacement de la plupart des raidisseurs de la tôle de bordé (82 / 96 au total).
- Remplacement des 2 longerons centraux de 14,50 m de long.
- Remplacement de quelques cornières verticales et inclinées.

Il faut noter que cette vanne est de construction riveté. Les analyses matière ayant montré que souder sur ce type d'acier datant de 1930 était impossible, les solutions de réparation ont consisté à remplacer les rivets à chaud par des rivets à froid de type « Huck » ou de la boulonnerie suivant le diamètre ou l'accès (place pour la riveteuse).

Ci-après quelques photos de l'expertise et des réparations.

Figure 18 : Vue d'un raidisseur avant (à gauche) et après (à droite) remplacement





Figure 19 (ci-dessous): Vue des 2 nouveaux longerons centraux après remplacement



6.4 Bilan du chantier sur l'EVC n°2

Le chantier sur l'EVC a démarré le 8 Mars 2012. L'EVC a été rendu à l'exploitation le 1er Décembre 2012. La durée du chantier a donc été de 9 mois. Ce gain de 2 mois par rapport au chantier sur le premier EVC s'explique par notamment :

- l'expérience acquise sur les travaux de l'EVC n°1,
- une optimisation du planning (enchainement des taches, mouvements des vannes, etc. …),
- pas de problème majeur rencontré lors des opérations de désamiantage et peinture, notamment grâce au changement de sous-traitant pour ces opérations.

Il a été découpé approximativement selon les étapes suivantes :

- Mise en place des installations de chantier (grue, batardeau, échafaudages, portique) : 1 mois,
- Dépose des étanchéités, organes de roulement et de guidage : 2 semaines,
- Confinement de la zone : 2 semaines,
- Dépose du système anti corrosion de la vanne par sablage et application de la couche primaire : 2,5 mois,
- Expertise puis réparations mécaniques sur la structure de la vanne : 1 mois,
- Application des 2ième et 3ième couches du traitement anti-corrosion sur la vanne : 2 semaines,
- Travaux sur les pièces fixes (remplacement et/ou traitement anti-corrosion) : 1,5 mois,
- Remontage étanchéités, galets, trains de galets : 3 semaines,
- Démontage des échafaudages : 2 semaines.

Les principaux points à noter par rapport au chantier de l'EVC n°1 :

- Un seul sous-traitant a réalisé les opérations de désamiantage et de peinture contre 2 sous-traitants différents sur l'EVC n°1. Ce sous-traitant disposait de moyens bien plus importants et adéquats notamment pour la partie désamiantage.

Son expérience dans ce type d'opération était également bien meilleure. La qualité du travail ainsi que le respect des délais s'en sont fortement ressentis.



Figure 20 : Vue d'une partie des installations de chantier pour les opérations de désamiantage sur l'EVC2

- Le périmètre des travaux de réparation de la vanne a été quasiment le même que celui de l'EVC2.

7 CONCLUSION / REX

En conclusion, on peut noter le travail qui a été fait sur l'approvisionnement des joints d'étanchéités et sur l'approvisionnement des chaînes Galle suite à cette opération.

7.1 Approvisionnement des joints

En bénéficiant du retour d'expérience récent sur des problématiques de joints (voir historique ci-après), et en continuant d'alimenter ce retour d'expérience en réalisant des tests sur les joints approvisionnés pour Sarrans, nous avons pu notamment définir de nouvelles spécifications pour ces joints dans nos cahiers des charges.

Historique :

Juste avant la réalisation du chantier de Sarrans, plusieurs problèmes de déchirement de joints d'étanchéité neufs ont été constatés (vanne n°6 du barrage de Malause, vanne de fond du barrage de Vaussaire, portes de l'écluse du barrage de La Rance). Face à ces problèmes, il a été décidé de réaliser sur les joints défectueux une série de tests (résistance à la traction, résistance au déchirement pantalon, résistance à l'abrasion, etc. …) permettant de déterminer leur composition chimique et leurs propriétés mécaniques. Des tests similaires ont également été effectués sur les joints déposés disponibles.

Les résultats ont montré que les joints neufs présentaient des caractéristiques mécaniques inférieures aux joints déposés qui avaient passés 40 ans dans l'eau !!!!!

Travail à Sarrans

Fort de ce constat, nous avons, en collaboration avec le Titulaire du marché de Sarrans, fait réalisé des tests sur les joints qui avaient été approvisionnés pour les vannes EvC du barrage de Sarrans ainsi que des tests sur les joints déposés.

Ces tests ont montré cette fois que les nouveaux joints disposaient de caractéristiques plus ou moins identiques aux joints déposés mais également aux anciens joints des vannes du barrage de Malause.

Retour d'expérience :

Ce travail, qui a également été mené en parallèle sur les joints neufs et anciens des vannes EvC du barrage de Grangent, a permis de déterminer les caractéristiques importantes d'un joint et de définir la composition chimique et les propriétés mécaniques minimales qu'il devait avoir pour répondre correctement à nos besoins. Ce travail a été synthétisé et a permis d'améliorer nos spécifications. Un paragraphe concernant les caractéristiques des joints et les essais à réaliser a été ajouté au cahier des charges type pour les vannes charpentées.

Paragraphe inséré dans le cahier des charges type Vannes charpentées :

Il est demandé au Titulaire de faire réaliser des essais de caractérisation sur tous les joints des étanchéités principales de la vanne. Ils comprennent :

- *Une analyse matière*
- *Une mesure de dureté*
- *Un test de résistance à la traction (suivant NF ISO 37)*
- *Un test de déchirement pantalon (suivant NF ISO 34-1)*
- *Un test de résistance à l'abrasion (méthode B suivant NF ISO 4649)*

Les valeurs cibles, pour les trois tests cités ci-dessus et pour du néoprène sont les suivantes :

Résistance à la traction (éprouvette Haltère n°2) - *Contrainte maximale (Mpa)*	***> 9***
Résistance au déchirement pantalon (kN/m)	***> 3***
Résistance à l'abrasion (%)	***> 60***

Les PV de ces essais sont fournis à EDF avant le montage des joints sur la vanne.

7.2 Approvisionnement des chaînes Galle

Suite à la nouvelle problématique apparue sur l'approvisionnement des chaînes Galle (voir ci-avant), qui ressemblait fortement à celle constaté sur les chaines Galle de Tuilières, de nouvelles spécifications plus claires ont été écrites concernant ces approvisionnements par la DTG. Ces spécifications précisent notamment les différences d'approvisionnement pour des chaines Galle à design défini (remplacement des chaines mais conservation des pignons Galle) et pour des chaines Galle à design libre (avec remplacement des pignons Galle ou conception nouvelle).

RENOVATION DES EQUIPEMENTS D'EVACUATION DES CRUES DU BARRAGE DE KARIBA SUR LE ZAMBEZE

Rehabilitation of the spillway equipment of Kariba Dam on Zambezi River

Nathalie ROSIN-CORRE[1] , Sylvain LOPEZ
Tractebel Engineering Tour Part-Dieu, 129 rue Servient, 69326 Lyon cedex 3
nathalie.rosin-corre@gdfsuez.com, sylvain.lopez@gdfsuez.com

Renaud VOGELEISEN, Willy BOUCHET-VIRETTE
Spretec 19 rue des ciments, 38180 Seyssins
renaud.vogeleisen@ spretec.fr, willy.bouchet-virette@spretec.fr

MOTS CLÉS

Vanne de coupure, batardeau, évacuateur de demi-fond, gonflement du béton, alcali-réaction.

RÉSUMÉ

Pour sécuriser l'évacuateur de crues du barrage de Kariba sur le Zambèze, le Maître d'Ouvrage Zambezi River Authority a lancé une opération ambitieuse de réhabilitation présentée ici sous trois aspects : i) effets du gonflement du béton de l'évacuateur sur le génie civil en interface avec les équipements, ii) stratégie de rénovation adoptée visant à rénover la partie amont de l'évacuateur et à assurer la maîtrise des écoulements de l'évacuateur par une nouvelle vanne de coupure en charge en cas de blocage d'une des vannes Caterpillar actuelles, iii) choix techniques effectués lors de la conception des nouveaux équipements de l'évacuateur qui doivent s'adapter aux déformations du génie civil sur les 50 prochaines années d'exploitation et concept original du batardeau de chantier.

ABSTRACT

The Zambezi River Authority, Owner of the Kariba dam on the Zambezi river, has launched an ambitious refurbishment program to enhance the safety of the dam's spillway. Three main aspects of this program are detailed in this paper: i) impacts of concrete swelling on the civil works supporting the spillway equipment, ii) strategy for refurbishing the upstream part of the spillway and controlling the spillway discharges by a new emergency gate in case one of the existing caterpillar gates should jam, iii) technical choices retained when designing the new equipment to make it fit for operation for the next 50 years and original design of the temporary cofferdam.

1. INTRODUCTION

Le barrage de Kariba, situé sur le Zambèze, est un barrage voûte de 128 m de hauteur construit entre 1956 et 1959. Il crée un des plus grands lacs artificiels du monde (181 km^3). Le réservoir alimente deux usines hydroélectriques souterraines situées sur chacune des rives, en Zambie et au Zimbabwe. La capacité de production de ces usines, régulièrement augmentée, atteint à ce jour 1470 MW au total et contribue respectivement à 30% et 40% de la puissance installée de chacun des deux pays.

L'évacuateur comprend six passes vannées fonctionnant sous 35 m de charge pour une capacité totale de 9000 m^3/s (voir Fig.1). Les vannes sont ouvertes avant la période des crues pour assurer un creux de 23,2 km^3 permettant à la crue décamillénale de passer en sécurité. Les équipements de l'évacuateur exploités depuis la mise en eau (1959-1963) comprennent : i) six vannes de type Caterpillar (90t chacune, dimensions 10,7 m x 10,4 m) situées à l'aval des pertuis et manœuvrées par des treuils électriques à câbles depuis une chambre sous la crête ; ii) et un jeu de poutres batardeaux mises en place en eau morte depuis la crête au

[1]Auteur correspondant

moyen d'un portique et d'une poutre-palonnier. Ces équipements et les pièces fixes associées sont d'origine. Ils ont été conçus par le groupement Gibb Coyne Sogei constitué de Sir Alexander Gibb and Partners (Royaume-Uni), André Coyne et Jean Bellier (France) et Société Générale d'Exploitations Industrielles (France). Les vannes ont été fabriquées par Neyrpic à Grenoble.



***Figure 1** : Evacuateur vu d'amont, plan d'eau proche du minimum d'exploitation (à gauche) ; vu d'aval (à droite).*

A l'issue de 50 ans d'exploitation de l'aménagement s'ajoutent à l'usure classique des équipements les effets dommageables des déformations irréversibles du génie civil de l'évacuateur dues au gonflement du béton (alcali-réaction). Les rainures et les plans d'étanchéité des vannes en sont affectés, ce qui augmente significativement le risque de défaillance des équipements. Les principales conséquences en sont des difficultés de manœuvre des vannes et des poutres-batardeaux ainsi que des défauts d'étanchéité. Ce problème qui perdure a déjà conduit dans le passé à des travaux conséquents de réfection des plans d'étanchéité des vannes aval.

Pour sécuriser l'évacuateur de crues, le Maître d'Ouvrage, Zambezi River Authority, a lancé une opération ambitieuse de réhabilitation. Elle est présentée ici sous trois aspects :

- Les effets du gonflement du béton sur le génie civil en interface avec les équipements de l'évacuateur.
- La stratégie de rénovation adoptée qui vise non seulement à rénover la partie amont de l'évacuateur mais aussi à assurer la maîtrise des écoulements de l'évacuateur par une vanne de coupure en charge en cas de blocage d'une des vannes Caterpillar existantes.
- Les choix techniques effectués lors de la conception des nouveaux équipements de l'évacuateur qui doivent s'adapter aux déformations du génie civil lors des 50 prochaines années d'exploitation et le concept original du batardeau de chantier.

Les études ont été menées au stade de faisabilité en 2011 puis d'Avant-Projet Détaillé en 2012-2014.

2. PROBLEMATIQUE DES DEFORMATIONS DE L'EVACUATEUR SOUS L'EFFET DU GONFLEMENT DU BETON

2.1 Historique de l'expression du phénomène

Au milieu des années cinquante, au stade de la conception du barrage, les premiers cas de gonflement affectant des barrages américains (American Falls, Parker, Fontana, …) étaient connus et tous les essais disponibles à l'époque pour tester la compatibilité des agrégats et du ciment avaient été effectués sans détecter aucun risque d'alcali-réaction.

Les mesures locales de déformations dans le béton du barrage et dans les poutres témoins par extensomètres à corde vibrante détectèrent dès le début une évolution irréversible, lente mais constante. Les mesures de nivellement firent également état très tôt d'un exhaussement progressif de la crête de plus de 2 mm/an dans la partie centrale de la voûte (voir Fig. 2) et d'un lent déport des arcs supérieurs de la voûte vers l'amont, de 1 à 2 mm/an selon le niveau du lac et la période d'évacuation des crues. Les analyses en laboratoire de 1989 puis de 1994 confirmèrent le développement de la pathologie.

Les taux de gonflement maximaux ont été de l'ordre de 11 µm/m/an verticalement en partie courante de la voûte et 33 µm/m/an au droit de l'évacuateur car le gonflement se développe davantage là où les contraintes sont les plus faibles. Ces taux sont représentatifs d'un phénomène modéré de gonflement. A titre de comparaison, les taux annuels sont de 60 à 80 µm/m/an au barrage du Chambon (barrage poids, France), 60 µm/m à Belesar (voûte, Espagne) et jusqu'à 110 µm/m au barrage de Bimont (voûte, France). Ceci est corroboré par le fait que le gel expansif tel qu'observé au laboratoire n'est présent qu'en quantités modérées et que la fissuration caractéristique reste superficielle et n'est observée que sur le sommet et la face amont des piles. Les taux de gonflement actuels sont en diminution, en cohérence avec la cinétique observée sur d'autres barrages affectés par l'alcali-réaction et atteignent sur ces dernières années de l'ordre de 15 µm/m/an en vertical et 22 µm/m/an en horizontal au droit de l'évacuateur.

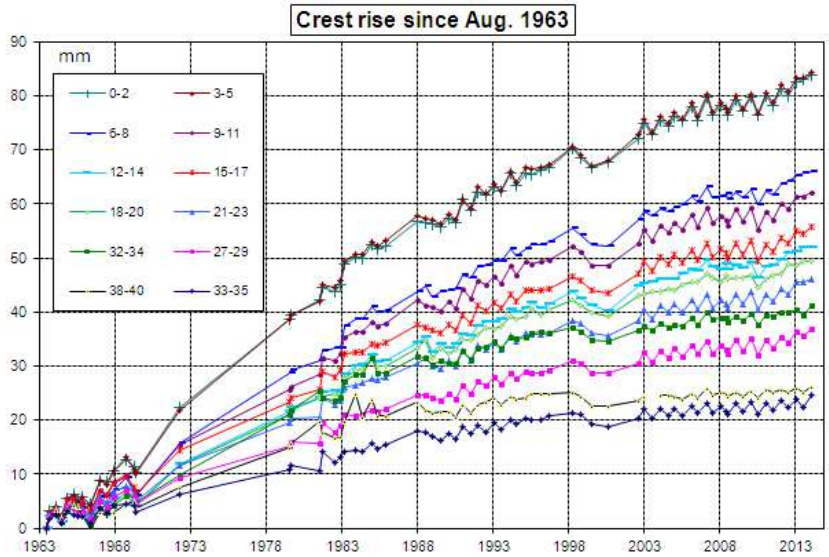


***Figure 2** : Elévation de la crête depuis août 1963 en fonction du temps.*

2.2 Déformation des plans d'étanchéité et des rainures aval

Les vannes aval (normalement fermées) s'ouvrent en remontant et glissent le long d'un plan d'étanchéité vertical de dimensions 10,8 m x 9,5 m (largeur x hauteur). Les étanchéités sont situées à l'amont sur les quatre côtés de la vanne et sont constituées par des joints néoprène en note de musique fixés par des boulons.

Des difficultés à la fermeture et à l'ouverture sont apparues au début des années 80 ([1]). A l'époque, ces difficultés avaient été attribuées à des dépôts de calcite dans le plan d'étanchéité. Gratter ces dépôts et graisser les rails de guidage avait permis de retrouver une opérabilité correcte. Mais la situation se détériora progressivement, l'ouverture des vannes s'accompagnait de vibrations de plus en plus fortes et les treuils forçaient de plus en plus, jusqu'à aboutir au coincement des vannes. Des inspections et des mesures révélèrent que les plans d'étanchéité étaient significativement déformés ce qui générait des frottements de contact anormaux entre les différents éléments (les rails, le béton et les blocs de guidage de la vanne étaient rayés). Les boulons de fixation des joints au linteau de la vanne avaient été cisaillés sous l'effet des efforts de manœuvre très élevés requis pour vaincre le frottement. Les plans présentaient de plus un schéma de fissuration caractéristique du gonflement du béton.

Les travaux réalisés par les équipes du Maître d'Ouvrage en 1994-1995 ont eu pour but de retrouver la planéité du plan d'étanchéité et la largeur théorique des rainures (975mm). La surface des plans d'étanchéité a été entièrement reprise : démolition au marteau piqueur électrique, enlèvement des aciers de peau, bétonnage après test de susceptibilité à l'alcali-réaction, finition parement fin. Les rails de guidage ont été meulés pour s'aligner sur le plan d'étanchéité théorique, quitte à décaler le plan théorique et limiter le meulage pour assurer

La résistance structurelle de la partie résiduelle lorsque les déflections étaient trop importantes. En complément, les plans d'étanchéité sont depuis arrosés d'eau lors des manœuvres et la calcite doit être régulièrement enlevée. Les travaux ont résolu le problème au moins provisoirement car les coincements de vanne et les vibrations n'ont plus été signalés depuis.

2.3 Déformations de la partie amont de l'évacuateur

Les relevés régulièrement faits à l'aide de pendules amovibles depuis 1987 ([5]) permettent de comprendre le schéma général de déformation de la partie amont de l'évacuateur sous l'effet du gonflement, en plus du gonflement de l'ordre de 15 µm/m/an dans la direction verticale (voir Fig. 3) : i) les hauts des piles s'écartent les uns des autres, ii) les hauts des piles s'inclinent vers l'amont, iii) les rainures amont s'élargissent dans leur partie haute (dans la direction amont-aval).

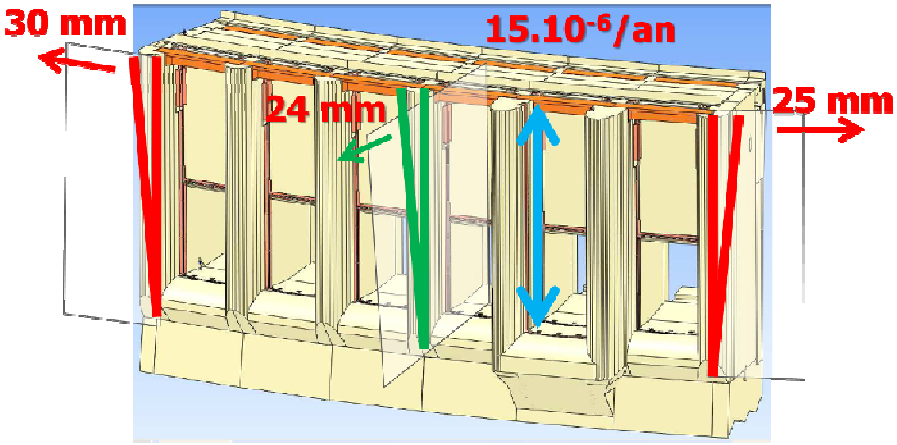


***Figure 3** : Déformations schématiques de l'évacuateur sous l'effet du gonflement du béton (vu de l'amont).*

Le basculement des piles vers l'amont mesuré en 2011 (par rapport au point de jonction de la pile avec le seuil considéré comme fixe) est présenté sur la figure 4. Il atteint en valeur moyenne 24 mm au sommet des piles et jusqu'à 37 mm pour la pile sud de la passe n°4. La figure 5 montre l'inclinaison moyenne rive à rive de l'axe des passes et la perte de géométrie du plan de glissement telles que mesurées en 2011. Les axes des passes d'extrémité se sont écartés de 55 mm en crête. La perte de géométrie est en particulier marquée pour les passes n°1, 4 et 6. Elle va de pair avec une diminution de la largeur des passes et engendre un risque accru de coincement des poutres-batardeaux. Ces mesures sont tout à fait cohérentes avec l'incident rapporté en 2009 du coincement d'une poutre-batardeau dans la passe n° 4 dans cette zone de rétrécissement.

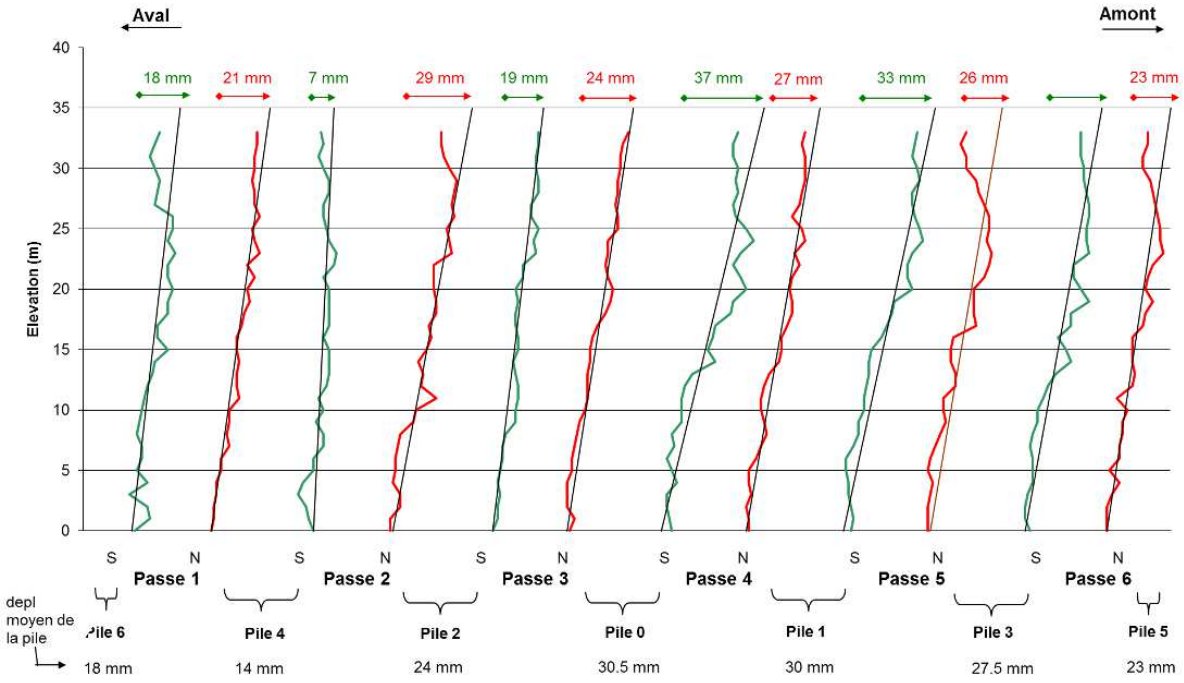


***Figure 4** : Basculement des piles vers l'amont (2011).*

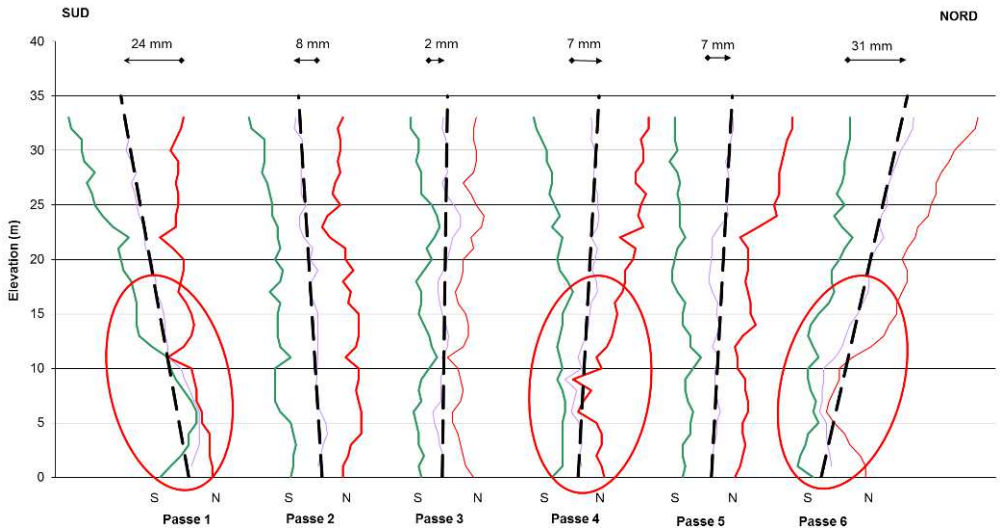


***Figure 5** : Déplacements rive à rive de l'axe des pertuis et perte de géométrie des rainures amont (2011).*

En complément des déformations de la géométrie, une fissuration systématique du génie civil à l'aval des rainures aux jonctions des pièces fixes a été observée lors des inspections de l'intérieur des passes batardées (voir Fig. 6). Ces fissures communiquent avec l'amont et génèrent des fuites. Certaines de ces fuites ont été par le passé étanchées depuis l'amont par des plongeurs avec de la résine époxy. Il a été observé que les réparations perdaient petit à petit leur étanchéité, mettant ainsi en évidence la poursuite du processus de fissuration.



***Figure 6** : Passe batardée vue de l'aval (gauche), détail de la jonction des pièces fixes d'une rainure amont (droite).*

Tout se passe comme si la partie courante était capable d'absorber les déformations alors que les jonctions ne l'étaient pas. L'assemblage des jonctions par boulonnage y crée une section moins résistante en traction et en flexion que la section courante. Les pièces fixes ont été entraînées par le béton adjacent en expansion dans lequel elles sont ancrées, les boulons soumis à des tensions de plus en plus élevées ont fini par se rompre en entraînant le béton de seconde phase non ferraillé.

3. STRATEGIE DE RENOVATION

Les déformations de l'évacuateur sous l'effet du gonflement ont un impact sur sa fonctionnalité (perte de jeu sur les rainures amont et aval, déformation des plans d'étanchéité) et accroissent les risques de coincement des vannes aval et des poutres-batardeaux amont. A ceci s'ajoute l'état vieillissant des pièces fixes amont : les cornières guides sont largement corrodées, ce qui est confirmé par les dépôts de rouille sur les poutres-batardeaux après utilisation, ainsi que les pièces fixes en acier au carbone sous les chemins de roulement en acier inoxydable comme le montre la figure 7 (gauche).Une analyse de la conception d'origine a également montré que le coin de béton sur lequel s'appuie la poutre n'était pas ancré conformément aux règles de dimensionnement actuel et pouvait donc glisser selon le plan de rupture en rouge sur la figure 7 (droite).

Les rainures amont devaient donc être impérativement rénovées pour maintenir la fonction batardage de maintenance.

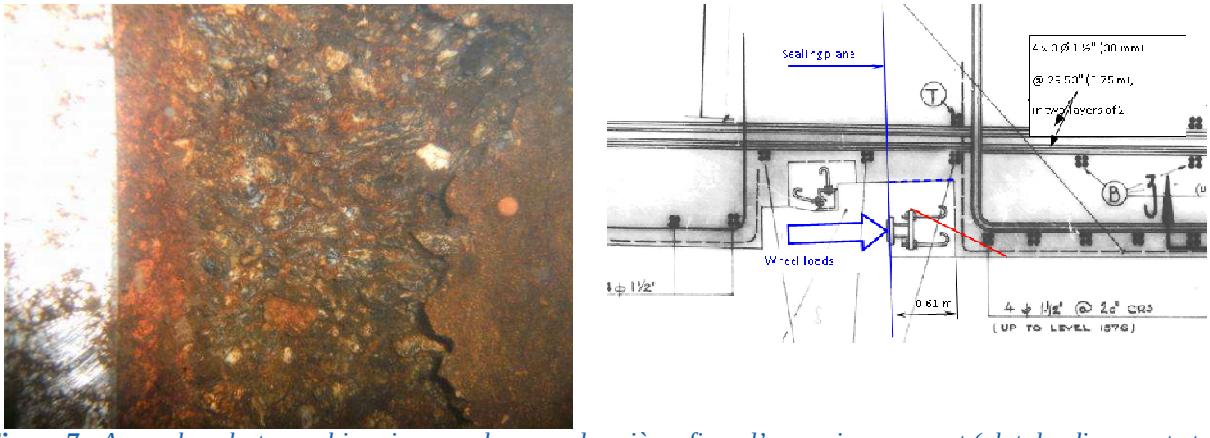


***Figure 7** : A gauche, photographie prise par plongeur des pièces fixes d'une rainure amont (plat de glissement et profilé support à droite de la vue, béton de seconde phase érodé à droite) ; à droite : coupe horizontale de la rainure amont avec plan de glissement du coin.*

L'objectif du projet est ainsi de rénover la partie amont de l'évacuateur afin de pouvoir faire face aux futures opérations de maintenance des vannes Caterpillar.

Une première option aurait ainsi pu être de rénover la fonction de batardage de maintenance : rénover les rainures, réhabiliter ou remplacer les poutres-batardeaux, réhabiliter ou remplacer le portique permettant de manœuvre les poutres batardeaux en eau morte. Mais cette option ne permettait pas de contrôler les débits relâchés en cas de défaillance d'une vanne aval, avec des conséquences majeures. En effet, si une vanne aval se trouvait bloquée dans une position intermédiaire (semi-ouverte ou ouverte), il serait impossible d'empêcher la vidange partielle de la retenue jusqu'à la cote du seuil du pertuis de la vanne bloquée puisque les poutres-batardeaux ne peuvent être installées qu'en eau morte. Le seuil étant situé 20 m sous la cote minimum d'exploitation, les deux usines devraient être arrêtées avec un impact notable sur la couverture des besoins en électricité de la Zambie et du Zimbabwe.

Une seconde option plus ambitieuse visait à disposer d'un équipement capable de couper la totalité du débit d'une passe (1500 m^3/s) si la vanne Caterpillar à l'aval se bloquait, à savoir une vanne de coupure utilisable en urgence (dénommée vanne d'urgence dans la suite du document). C'est cette seconde option qui a été retenue par le Maître d'Ouvrage. Elle inclut la fourniture de nouvelles poutres-batardeaux mises en place dans les rainures rénovées et d'un portique capable de manœuvrer la vanne de coupure en charge ou les poutres batardeaux en remplacement des poutres-batardeaux et du portique actuels ([2]).

Jusqu'à la rénovation des rainures, des mesures sont prises à titre conservatoire pour programmer les opérations de maintenance quand la charge amont est la plus faible, charger les poutres-batardeaux progressivement et limiter les chocs lors des manœuvres (en cas notamment de désaccouplage brutal avec le palonnier) et surveiller l'état des pièces fixes avant chaque utilisation des poutres-batardeaux.

4. JUSTIFICATION DES CHOIX TECHNIQUES

Les principaux choix techniques, réalisés au stade des études d'Avant-Projet Détaillé ([4]), concernent la technologie de l'organe de coupure de débit, la conception des nouvelles pièces fixes et les moyens à mettre en œuvre pour réaliser les travaux.

Les nouveaux équipements doivent non seulement s'intégrer dans l'ouvrage existant, notamment être adaptés à la géométrie de l'évacuateur, appliquer au génie civil des charges admissibles qui tiennent compte de l'état du béton en place, mais aussi s'accommoder aux déformations du génie civil à venir sous l'effet de la poursuite du phénomène de gonflement du béton.

En sus de ces exigences, des contraintes spécifiques au site de Kariba ont dû être intégrées telles que i) l'impossibilité d'abaisser le niveau d'eau de la retenue durant les travaux, ii) l'obligation de maintenir des passes de l'évacuateur disponibles pendant les travaux pour évacuer la crue de chantier, iii) les contraintes d'acheminement des équipements hydromécaniques sur le site, et donc la nécessité de réaliser des ensembles transportables par la route et iv) la capacité limitée des engins de manutention à disposition en Zambie ou au Zimbabwe.

4.1 Vanne d'urgence

Pour satisfaire le souhait du Maître d'Ouvrage de disposer d'un équipement capable de fermer en charge une passe de l'évacuateur en cas de problème sur l'une des six vannes aval, le projet de rénovation de l'évacuateur intègre la possibilité de manœuvrer une vanne d'urgence dans les rainures à l'amont des passes (voir Fig. 8, gauche). Ceci permet de reprendre le contrôle des débits lâchés à l'aval en cas de blocage d'une vanne Caterpillar en position ouverte ou semi-ouverte.

4.1.1 Vanne wagon

Le choix du type de vanne a été dicté par plusieurs considérations : i) La vanne doit être démontable en plusieurs éléments de faible hauteur et de masse raisonnable afin d'être facilement transférable d'un pertuis à l'autre ou à son point d'entreposage en rive, ii) La vanne doit être suffisamment souple dans le sens amont/aval pour accepter les défauts de la voie de roulement générés par le gonflement du béton : défaut de planéité, torsion, désafleur … , iii) La vanne doit être d'une conception robuste et d'un entretien facile, iv) la vanne doit pouvoir couper le débit sous l'action de son propre poids et sans apport d'énergie extérieure.

Une vanne wagon a ainsi été retenue préférablement à une vanne Stoney ou Caterpillar. La vanne, équipée d'un bordé aval de dimensions 14,1m x 11,4m (hauteur x largeur), est constituée de 6 éléments maintenus entre eux / liaisonnés par des barres d'assemblage. Chaque élément est formé de deux tronçons reliés entre eux par le bordé à l'amont et des bretelles à l'aval. Les têtiers sont eux discontinus (voir Fig. 8 droite). Cette conception permet de garantir des conditions d'appui satisfaisantes de chaque galet sur la voie de roulement. La vanne est assemblée en une quarantaine d'heures.

La probabilité que deux vannes aval soient défaillantes en même temps ayant été jugée faible, une seule vanne est prévue pour les six pertuis dans un souci d'optimisation des coûts. Le stockage des éléments de la vanne est envisagé sur l'une des rives plutôt qu'en partie courante de la crête du barrage pour limiter l'encombrement de la crête et ne pas entreposer la vanne dans l'eau au-dessus des pertuis comme les poutres-batardeaux qui occupent déjà cet espace.

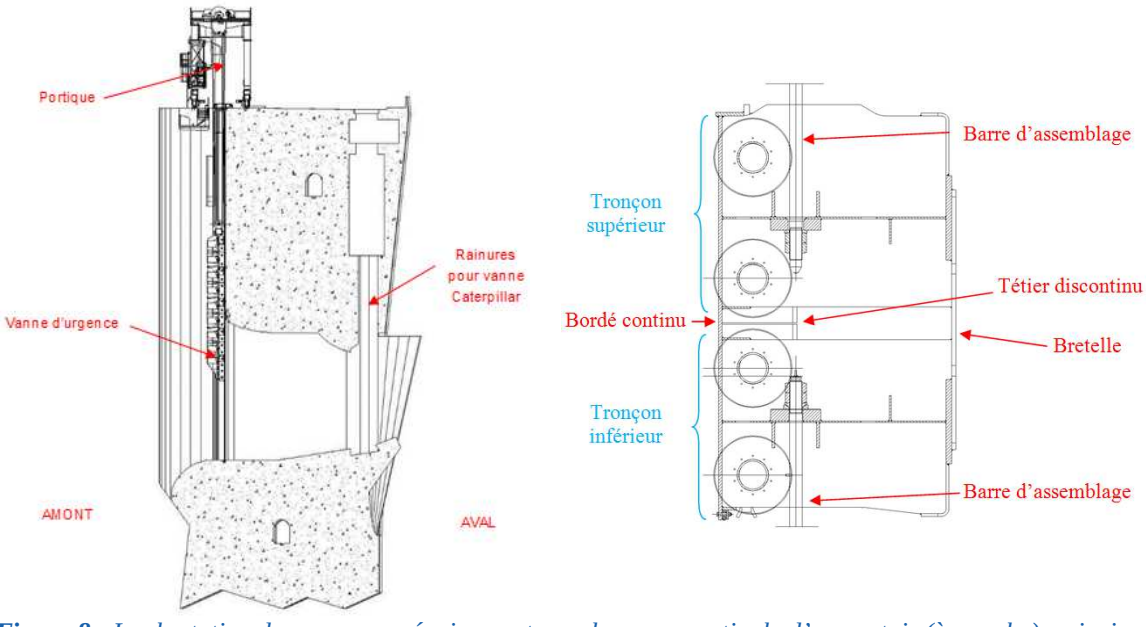


***Figure 8** : Implantation des nouveaux équipements sur la coupe verticale d'un pertuis (à gauche), principe d'assemblage des éléments de vanne (à droite).*

4.1.2 Portique de manœuvre

La capacité réduite de levage du portique d'origine (20 t) et son état vieillissant conduisent à le remplacer par un nouveau portique circulant en crête du barrage sur de (nouveaux) rails de roulement. Cet équipement permet de transférer les éléments de vanne et les poutres-batardeaux d'une passe à l'autre, d'assembler la vanne au-dessus du pertuis à fermer et de la manœuvrer en charge, de descendre une à une les poutres-batardeaux en fond de pertuis (et de les remonter) en eau morte. La capacité nominale de levage est d'environ 440 t. La taille du portique a été optimisée, celui-ci ne manipulant que des éléments de vanne de hauteur réduite au-dessus des passes. Il est équipé de deux motorisations et de deux palonniers différents, adaptés aux efforts et aux vitesses de manœuvre de la vanne et des poutres-batardeaux. La vanne est descendue en une demi-journée pour limiter les impacts négatifs (problématique d'aération et efforts sur le génie civil).

4.2 Gestion des interfaces génie civil/mécanique

Le processus de gonflement du béton est un phénomène complexe qui n'est pas encore totalement compris. Si des mesures préventives efficaces peuvent être prises dans le choix de constituants du béton pour que les nouveaux bétons ne gonflent pas, on ne sait pas à ce jour mettre un terme au processus en cours de gonflement du béton de l'évacuateur. Dans ces conditions, les nouvelles pièces fixes qui permettent de mettre en place le jeu de poutres-batardeaux ou la vanne d'urgence doivent être conçues et dimensionnées pour accepter les déformations du génie civil sous l'effet du gonflement anticipées sur leur durée d'exploitation de 50 ans (de l'ordre de 0,75mm/m en vertical). La conception tire également les leçons du retour d'expérience acquis durant les 50 années d'exploitation des pièces fixes d'origine.

Retour d'expérience sur les pièces fixes existantes

L'analyse de la conception des pièces fixes croisée avec les résultats des inspections à sec ou en eau des passes a mis en avant :

- l'absence de renforcement entre le béton de seconde phase et le béton de première phase à l'arrière des plats d'appui des rainures, qui peut conduire le coin de béton chargé et le rail à glisser sous la charge hydraulique. Notons que ce point a été introduit dans les règles de dimensionnement du béton armé après la conception du barrage à la suite d'incidents.
- le nombre important de jonctions entre les pièces fixes, systématiquement accompagnées de fissure dans le béton et des fuites dans les pertuis batardés, et la faiblesse structurelle des assemblages boulonnés,
- le manque de jeu entre les poutres-batardeaux et les rainures, l'absence de dispositif de réglage derrière les poutres-batardeaux, les surfaces d'appui non continues et la corrosion des pièces fixes qui ont pu contribuer au coincement des poutres-batardeaux.

4.2.2 Conception des nouvelles pièces fixes

La place disponible dans le béton de première phase (jusqu'au ferraillage structurel) et la géométrie des nouvelles pièces fixes conduisent à des dimensions intérieures des nouvelles rainures similaires à celles existantes (voir Fig. 9).

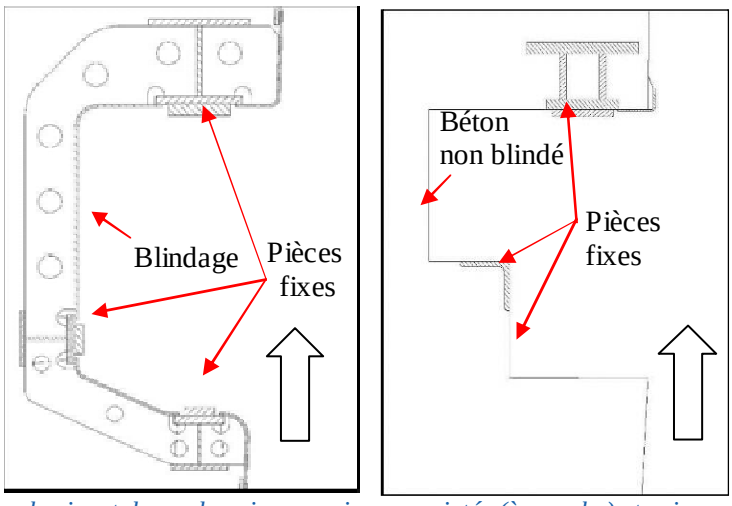


***Figure 9** : Coupe horizontale sur la rainure, rainure projetée (à gauche) et rainure existante (à droite).*

Un acier inoxydable plutôt qu'un acier au carbone peint s'est imposé pour assurer une meilleure longévité des pièces fixes. Les plats d'appui des galets sont envisagés en acier inoxydable de type martensitique Virgo 39 afin qu'ils ne se matent pas lors de la manœuvre de la vanne en charge.

Les pièces fixes sont ancrées dans le (nouveau) béton de seconde phase par des connecteurs en U en partie courante et des platines aux extrémités. Le béton de seconde phase est ferraillé pour résister aux charges appliquées (y compris empêcher le glissement du coin de béton) et contrôler la fissuration générée par la poursuite du gonflement du béton existant (voir Fig. 10).

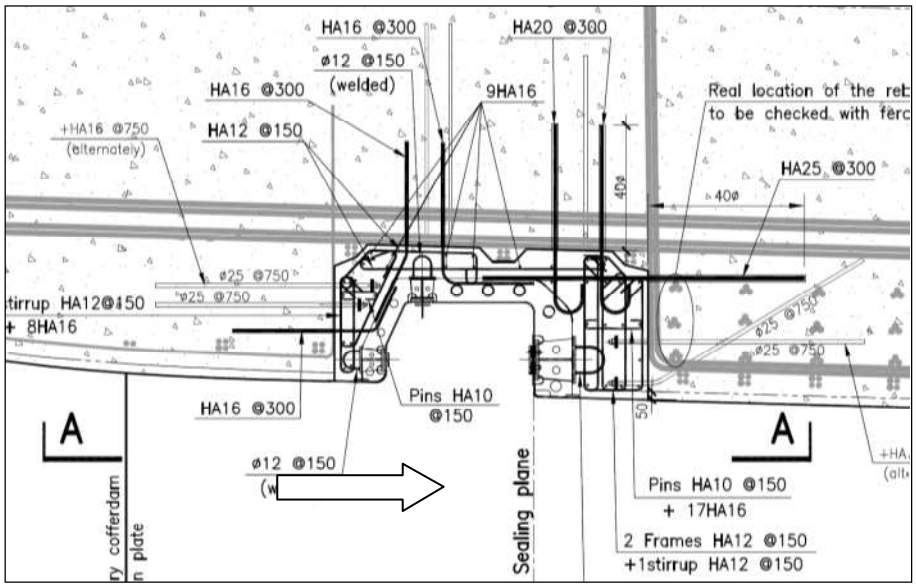


***Figure 10** : Coupe horizontale de la rainure.*

Suite au retour d'expérience sur les pièces fixes d'origine, il a été décidé de supprimer les jonctions entre éléments sur la hauteur du pertuis. Les connexions par boulonnage des pièces fixes latérales avec les pièces fixes de seuil et de linteau sont réalisées avec des matériaux plus ductiles (type boulonnerie inox A2) pour qu'ils se déforment sans casser sous l'effet des déformations imposées par le gonflement. Des jonctions sont prévues au-dessus du pertuis, là où les fissures qui pourraient naître ne seraient pas en communication avec la passe batardée et n'engendreraient donc pas les fuites observées actuellement dans la hauteur du pertuis.

Les poutres-batardeaux et la vanne d'urgence sont conçues pour accepter une réduction du jeu dans la rainure d'environ 10 mm dans les directions amont/aval et rive à rive. Les patins des poutres-batardeaux sont munis de cales amovibles. Le contre-guidage de la vanne est monté sur ressort et ses guidages latéraux sont fixés avec des trous oblongs. Les abouts des plats d'appui sont finis en baïonnette de manière à assurer une continuité d'appui et empêcher les roues de se bloquer (voir Fig. 11).

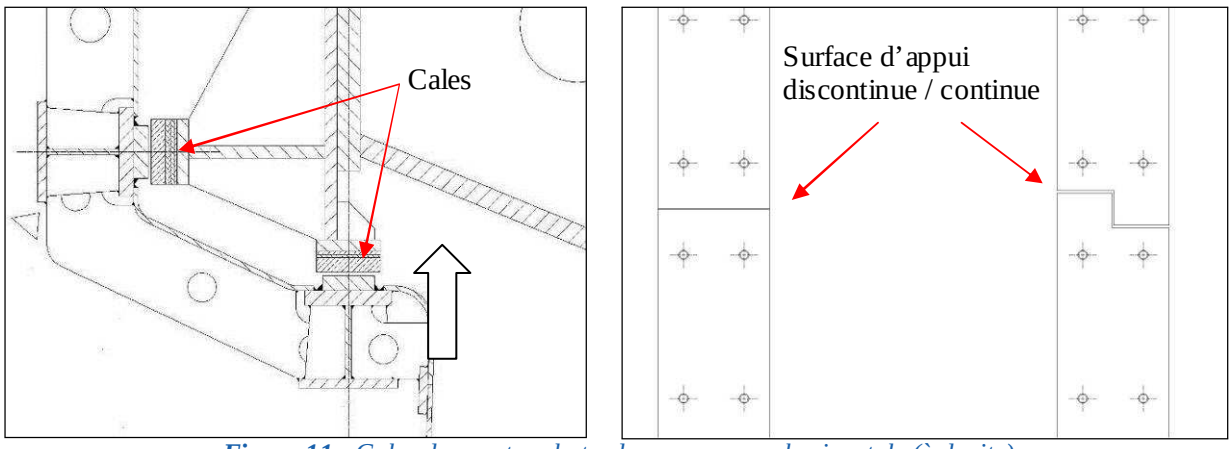


***Figure 11** : Cales des poutres-batardeaux en coupe horizontale (à droite), détail d'about des plats d'appui vu d'amont (à gauche).*

Le plat d'appui principal et les rails de guidage et de contre-guidage sont reliés par un blindage pour protéger le béton dans une zone potentielle de turbulence, en particulier dans la partie aval de la rainure, et empêcher l'eau en pression de pénétrer dans les fissures qui pourraient se former dans le béton. Le blindage sert aussi de coffrage pendant le coulage du béton de seconde phase de la rainure et contribue au réglage des pièces fixes qui se fait ici côté pertuis et non depuis l'arrière des rainures. Pour une question de continuité et d'homogénéité, il a été décidé de continuer le blindage des rainures au-delà de la zone du pertuis jusqu'à la crête du barrage.

Les travaux de rénovation n'empêcheront toutefois pas le béton d'origine au centre des piles de se fissurer sous l'effet du gonflement. Des inspections régulières pour détecter des fissures dans le béton et dans le blindage devront être régulièrement organisées pour déclencher les campagnes d'injection qui seraient nécessaires.

4.3 Batardeau de chantier

4.3.1 Contexte des travaux

Comme il n'est pas possible d'abaisser le niveau du réservoir de 35 m jusqu'au seuil des vannes pour rénover les pièces fixes à l'amont des pertuis, les travaux doivent être réalisés derrière un batardeau de chantier ou en travaux subaquatiques. Afin de mieux maîtriser les conditions dans lesquelles s'effectuent les travaux de remplacement des pièces fixes dans la partie amont des pertuis et compte tenu de leur volume, la seconde option a été écartée au profit d'un batardage successif de chacun des six pertuis. Travailler en sécurité sur une passe supposera de ne pas ouvrir les passes adjacentes à la passe batardée. Dans ces conditions, si deux passes sont batardées, seules deux passes au plus sont disponibles pour évacuer les crues pendant le chantier. Or la crue de chantier (de période de retour au minimum 50 ans) nécessite d'ouvrir trois passes sur les six ([3]). La solution retenue est celle d'un batardeau de chantier capable d'étancher un pertuis d'environ 35 m x 14 m (hauteur x largeur) et de reprendre une pression hydrostatique de 52 900 kN.

4.3.2 Contraintes

Le batardeau de chantier doit s'adapter au profil du parement amont du barrage. Sa géométrie voûtée, la présence de piles perpendiculaires, la protubérance des piles adjacentes au pertuis n°2 rendent la tâche très complexe (voir Fig. 12).

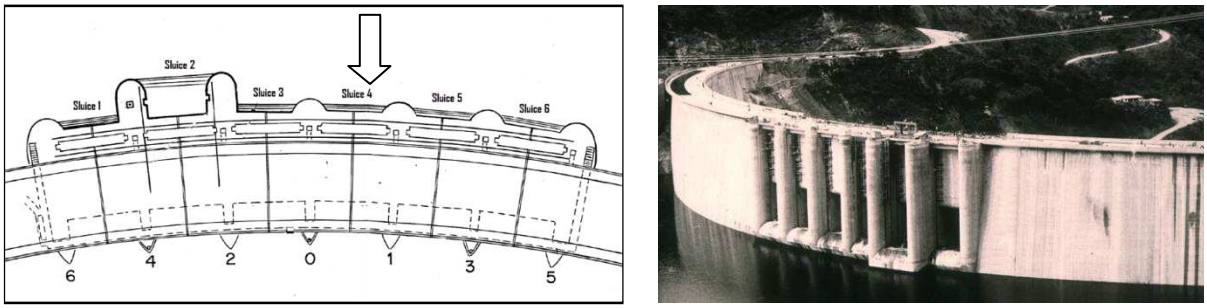


***Figure 12** : Evacuateur vu de dessus (à gauche), vu d'amont en cours de remplissage (à droite).*

La conception du batardeau de chantier doit également tenir compte de la capacité (ou non) de certaines zones du parement à encaisser la charge hydraulique du batardeau. Par exemple, les plans des piles montrent qu'elles sont faiblement ferraillées dans leur partie amont puisqu'elles ont dans cette zone une fonction de guidage hydraulique plus qu'une fonction structurelle.

La géométrie réelle des six passes n'est pas strictement identique. Par ailleurs, le génie civil du parement a été déformé sous l'effet du gonflement du béton. Les appuis du batardeau et ses étanchéités doivent donc tolérer une certaine variabilité géométrique et de qualité de surface du béton des zones d'appui (pour ce dernier point, des travaux préparatoires par plongeurs visant à assurer une qualité minimale sont prévus).

4.3.3 Solution retenue

L'analyse de la géométrie du barrage et des zones ferraillées du génie civil a fait émerger l'idée de ne pas s'appuyer sur les piles mais plutôt sur des zones massives du barrage, au-dessus du linteau et en dessous du seuil. Cette solution permet, avec un unique batardeau, de mettre à sec successivement cinq passes sur six.

La sixième, la passe n°2, est batardée classiquement en utilisant le deuxième jeu de rainure à batardeau situé en amont du jeu à rénover (initialement prévu pour être utilisé en déversoir et préalablement renforcé).

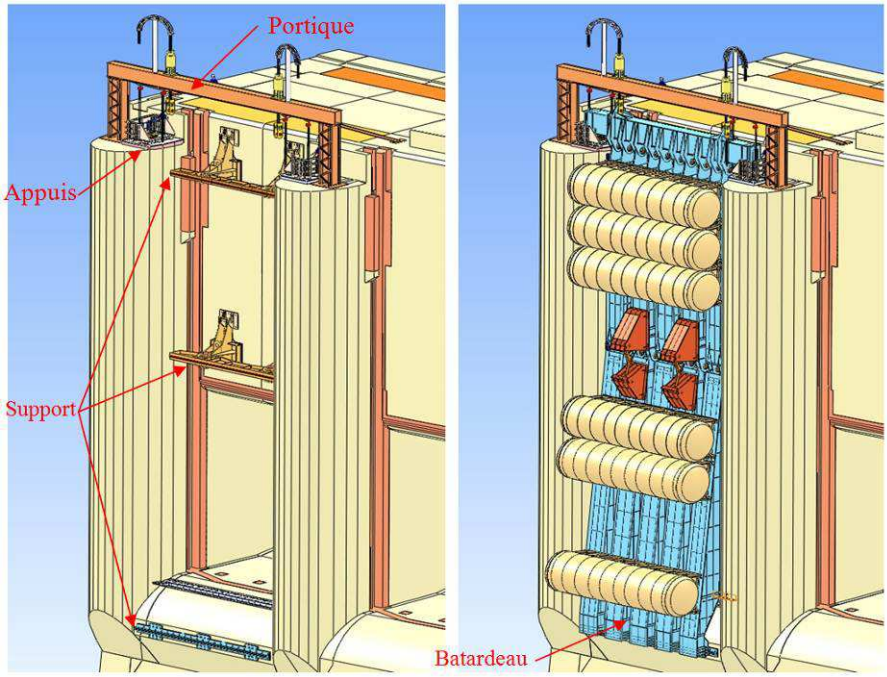


***Figure 13** : Supports et appuis du batardeau de chantier (à gauche), vue du batardeau de chantier installé (à droite).*

Le principe est illustré par la figure 13. Dans un premier temps, trois poutres supports sont fixées au génie civil sous l'eau au-dessus et au-dessous du pertuis, deux appuis et un portique sont installés sur la crête au sommet des piles (préalablement renforcées). Un batardeau formé de caissons verticaux assemblés sur la berge est ensuite acheminé par flottaison jusqu'au pertuis. A l'aide du portique, le haut du batardeau est positionné sur ses appuis. Il est finalement pivoté jusqu'à venir en appui sur les supports. Par la suite, les étanchéités sont installées entre la structure acier et le génie civil. La poussée hydraulique est alors reprise par les supports, le poids propre de la structure étant repris en crête sur les appuis.

4.3.4 Alternative envisagée

Une solution alternative a également été envisagée pour batarder une passe au moyen de poutres-batardeaux. Les éléments de bouchure sont mis en place à l'aide d'une grue de fort tonnage, glissés dans des rainures métalliques rapportées préalablement fixées sur les piles. Cette option est plus conventionnelle que la solution présentée ci-avant mais elle nécessite des travaux plus conséquents aux interfaces avec le génie-civil, tels que la création des rainures sur toute la hauteur des piles, à réaliser par une entreprise spécialisée en travaux subaquatiques. Elle présente d'autres inconvénients propres à la configuration et à la géométrie des piles du barrage de Kariba. En premier lieu, les charges hydrostatiques s'appliquent à des piles qui présentent une fissuration caractéristique du gonflement du béton et qui ne sont pas ferraillées pour reprendre les efforts de cisaillement. De plus, les piles du pertuis n°2 sont protubérantes, ce qui conduit à une plus grande complexité du batardeau des pertuis adjacents. Finalement, cette solution n'a pas été développée jusqu'au stade d'avant-projet.

4.4 Processus de contrôle externe

Compte tenu des enjeux du projet et de la nature inédite de certaines parties du projet (batardage de chantier, rénovation de pièces fixes sous déformations imposées) et de l'intérêt majeur des intervenants dans la réussite de l'opération, le projet a fait l'objet d'un processus de contrôle externe renforcé.

A ce titre, le projet a été examiné une première fois par un panel d'experts internationaux mandaté par le Maître d'Ouvrage en fin d'année 2012. Les discussions techniques approfondies avec les experts ont porté sur la justification des choix techniques retenus ou sur des solutions alternatives. Ainsi le choix d'une vanne wagon plutôt que Caterpillar a été confirmé, le dimensionnement des roulements de la vanne a été affiné, la

capacité des pièces fixes à tolérer le gonflement anticipé sur les cinquante prochaines années a été détaillée, le mode d'assemblage et le choix des matériaux des rails de roulement a été précisé. Des solutions alternatives ont été explorées : un batardeau de chantier formé de poutres-batardeaux glissées dans des rainures rapportées (présentée ci-avant), portique de manœuvre de la vanne et des poutres-batardeaux de maintenance avec mouflage visant à optimiser la charge du portique.

Le projet a ensuite été présenté en détail aux experts des organismes de financement en 2013-2014. Les échanges ont porté notamment sur la planification générale de l'opération et le principe de rénovation d'une passe par an à l'abri d'un batardeau de chantier.

Le processus de contrôle a ainsi contribué à améliorer le projet en amenant les concepteurs à apporter des compléments de justification et des éclairages techniques qui ont été intégrés à la dernière révision de l'avant-projet.

5. CONCLUSIONS

La rénovation des équipements d'évacuation des crues du barrage de Kariba sur le Zambèze comprend, outre la réhabilitation des pièces fixes et le remplacement des poutres-batardeaux d'origine, la fourniture et l'installation d'une vanne d'urgence capable de couper un débit de 1500m^3/s sous une charge de 35 m et d'un portique de forte capacité pour la manœuvrer. Le béton du barrage étant durablement affecté par un phénomène de gonflement (alcali-réaction), les nouveaux équipements et les nouvelles pièces fixes sont conçus pour s'adapter à des déformations anticipées sur une durée d'exploitation projetée de 50 ans.

Cette opération implique la mise en œuvre d'un batardeau de chantier exceptionnel pour remplacer les pièces fixes dans des conditions maîtrisées.

Les travaux amélioreront notablement la sûreté de l'évacuateur :
- dans le cadre des opérations programmées d'inspection et de maintenance des vannes aval, des rainures aval et des pertuis, puisque de nouvelles poutres-batardeaux seront mises en place dans des rainures réhabilitées par un nouveau portique dans de meilleures conditions de sécurité,
- en cas de défaillance d'une vanne à l'aval des pertuis, puisque la vanne de coupure permettra de couper le débit et de mettre à sec le pertuis pour réparer sans que la retenue atteigne un niveau trop bas inacceptable pour la production hydroélectrique.

RÉFÉRENCES ET CITATIONS

[1] Tsokodayi, C.M., Mazvidza, D.Z., & Gurukumba, K. (1996). Securing spillways at the Kariba Dam. International Water Power & Dam Construction, January, 17-20.
[2] Munodawafa, M.C., Mazvidza, D.Z., Rosin-Corre, N., & Cloitre, L (2013). Safety enhancement of Kariba dam's spillway: Implementation of an emergency gate. Africa 2013 on Water Storage and Hydropower Development for Africa.
[3] Clave, O., Noret, C., & Rosin-Corre, N. (2013). Sécurisation de l'évacuation des crues au barrage de Kariba et gestion de la retenue. Colloque du Comité Français des Barrages Réservoirs, Modernisation des barrages, 4-5 décembre 2013, Chambéry.
[4] Emergency Gate and New Gantry. Detailed Design Report (Avant-Projet Détaillé), rev C, January 2015.
[5] Stopbeams Grooves Report, March 2011.

RENOVATION DE L'EVACUATEUR DE CRUES ET DES ORGANES DE MANŒUVRE DU BARRAGE DE PONT-ET-MASENE

Renovation of the Pont-et-Massène spillway and operating device

Olivier LAPEYRE, Benjamin RAYMOND
ISL Ingénierie, Immeuble Le Discover, 84 boulevard Marius Vivier Merle, 69485 Lyon Cedex 03
lapeyre@isl.fr, raymond@isl.fr

Antoine CHARDONNAL
Voies Navigables de France – DTCB, 13 avenue Albert Premier, CS 36229, 21062 Dijon Cedex
antoine.chardonnal@vnf.fr

MOTS CLÉS

Clapet, vanne wagon, vanne plate sous carter, vanne de garde, organe de sûreté

RÉSUMÉ

Rénovation de l'évacuateur de crues et des organes de manœuvre du barrage de Pont-et-Massène
Le barrage de Pont-et-Massène, barrage poids maçonné de 22 m de hauteur construit au 19ème siècle et situé en Côte d'Or est géré par VNF (DTCB). Il fait l'objet, suite à sa révision spéciale engagée en 2012, de travaux de réhabilitation visant à améliorer sa capacité d'évacuation des crues et ses conditions de stabilité. Ces travaux visent également à fiabiliser et améliorer les équipements mécaniques existants afin d'en garantir le fonctionnement quelle que soit la situation et faciliter l'exploitation de l'ouvrage. Les travaux de rénovation concernent aussi bien les ouvrages liés à la sûreté du barrage (évacuateur de crues et vannes de vidange de fond) que ceux liés à son exploitation (équipements au droit de la tour de prise d'eau, de la galerie de dérivation et des vannes robinets). Au total 24 vannes seront mises en œuvre.
Le rapport présente succinctement l'état initial des structures et leur niveau de vétusté, puis les critères de conception retenus dans le dimensionnement des nouveaux équipements des organes de sûreté et des organes d'exploitation afin d'avoir des organes avec une fiabilité plus importante. Il présente également une réflexion menée visant à déterminer le risque engendré par une défaillance d'un clapet notamment en cas d'un abaissement intempestif et des conséquences pour l'aval. Enfin il traite des difficultés rencontrées liées au choix initial des vannes et les propositions de modification ou d'adaptation qui en découlées.

ABSTRACT

The Pont-et-Massène dam is a 22m high, gravity-type dam in masonry, built in the 19th century. It is located in the region of Cote d'Or and is managed by VNF (DTCB). Following a special revision which began in 2012, the dam is now under rehabilitation work aiming to improve its flood discharge capacity and stability conditions. The works also aim at improving and increasing the reliability of all mechanical equipment on the dam, so as to guarantee it's functioning in all situations and increase operating facility. Renovation work is being carried out on both safety structures (spillway and bottom outlet) and operating organs (organs situated in the intake tower, in the river diversion tunnel and gate valves). In total 24 gates will be put in use.
The report briefly presents the initial state of the structures as well as the criteria chosen for the design of new safety and operating equipment so as to increase its reliability. The report also contains a study of the risks involved in the failure of one the flap gates, especially in the case of its sudden lowering, and in particular with regards to consequences downstream. Lastly it deals with the difficulties encountered in the choice of the gates, and the changes and adjustments which were proposed as a result.

1. PRESENTATION DU CONTEXTE ET DU BARRAGE

1.1 Contexte général

Voies Navigables de France est un Établissement Public Administratif dont les missions principales sont la gestion, l'exploitation et le développement des différentes voies d'eau.

La DT Centre-Bourgogne est l'une des 7 directions territoriales découpant le territoire français et assurant l'exploitation des canaux du Centre, du Nivernais, de Roanne à Digoin, de Briare, du Loing, du Latéral à la Loire et de Bourgogne, ainsi que de la Seille navigable.

Par sa situation géographique au croisement des têtes des 3 grands bassins versants français (Seine-Normandie, Loire-Atlantique et Rhône-Méditerranée), certains des canaux de la DTCB présentent un système d'alimentation particulier, dit à « bief de partage », dont le canal de Bourgogne est une illustration. Pour assurer l'alimentation de ce dernier pendant les périodes de forts étiages des rivières des départements de la Côte d'Or et de l'Yonne, 5 barrages-réservoirs ont été construits au début du XIXe siècle autour de Pouilly-en-Auxois (Chazilly, Grosbois-en-Montagne, Panthier, Cercey et le Tillot) complété dans les années 1880 par le barrage-réservoir de Pont-et-Massène afin de créer un potentiel de stockage de plus de 20 millions de m3 pour l'alimentation du canal.

Ce réseau des voies d'eau de Centre Bourgogne est majoritairement fréquenté par les plaisanciers (plaisance locative et privée). On constate un regain du fret fluvial sur les canaux du Loing et de Briare.

1.2 Le barrage de Pont-et-Massène

Construit entre 1878 et 1882 pour l'alimentation du canal de Bourgogne, le barrage de Pont-et-Massène est implanté sur la rivière l'Armançon au nord de l'Auxois. Il est situé au Sud Est de Semur-en-Auxois, sur la commune de Pont-et-Massène, dans le département des Côtes d'Or (21).

Le barrage de Pont-et-Massène est un barrage poids maçonné curviligne de moellons de granulite liées avec du mortier de chaux hydraulique avec 8 contreforts aval de hauteur 22 m et de longueur 150,9 m. Sa fondation est composée de granulite purgée du rocher altéré. Des vues d'ensemble de l'ouvrage sont fournies dans le graphique 1.




Graphique 1 : Vues du barrage

Ses principales caractéristiques sont les suivantes :

- largeur en crête : 3,2 m (intérieur des parapets),
- largeur maximale au niveau du terrain naturel : 13,5 m (hors contrefort)
- fruit du parement amont : 0,057,
- rayon de courbure du parement aval : 27 à 30 m,
- altitude moyenne de la crête : 296,32 m NGF (parapet non compris) et 297,32 m NGF y compris parapet.

1.3 Les équipements du barrage et leurs modifications

1.3.1 L'évacuateur de crues

Les caractéristiques principales de l'ouvrage existant et de l'ouvrage projeté (phase conception) dans le cadre des travaux de réhabilitation sont synthétisées dans le tableau 1 ci-dessous :

Ouvrage existant :	**Ouvrage projeté :**
Situé en rive droite du barrage	Situé en rive droite du barrage
Seuil libre calé à la cote 294,32 m NGF	Seuil libre calé à la cote 291,35 m NGF
Largeur :29,4 m	Largeur :30,0 m
Equipé de 2 clapets abattables de 1,1 m de hauteur	Equipé de 2 clapets automatisés de 7 m de largeur et 4,05 m de hauteur manœuvrés chacun par un vérin hydraulique central situé à l'aval du tablier, ainsi que de 3 hausses fusibles semi-labyrinthes de 4,05 m de hauteur et de largeur 4,96 m.
Capacité d'évacuation à la cote 296,32 m NGF : 133 m^3/s	Capacité d'évacuation à la cote 296,32 m NGF : 478 m^3/s (clapets abaissés et hausses fusibles basculées)
Coursier constitué de 4 paliers de dimensions variables, taillés dans le terrain naturel et recouvert de béton et/ou maçonneries.	Coursier constitué de 4 paliers de dimensions variables, taillés dans le substratum rocheux et recouvert de béton armé ancré et drainé.
	

***Tableau 1** : Comparatif de l'évacuateur de crues existant et celui projeté*

Le diagnostic réalisé dans le cadre du projet de réhabilitation mettait en évidence que les clapets étaient dans un bon état, mais non-fonctionnels. En particulier, le contrepoids utile à leur manœuvre était désolidarisé du système mécanique. Les clapets étaient laissés ouverts en permanence (fonctionnement en seuil libre).

Les études hydrologiques récentes ont par ailleurs montré que l'évacuateur permettait de faire passer une crue environ centennale sous les plus hautes eaux (PHE). Bien qu'aucune submersion du barrage n'ait été historiquement relevée, une crue importante en 2013 a conduit les autorités à évacuer la population en aval.

1.3.2 Les vidanges de fond

Les caractéristiques principales de l'ouvrage existant et de l'ouvrage projeté (phase conception) dans le cadre des travaux de réhabilitation sont synthétisées dans le tableau 2 ci-après :

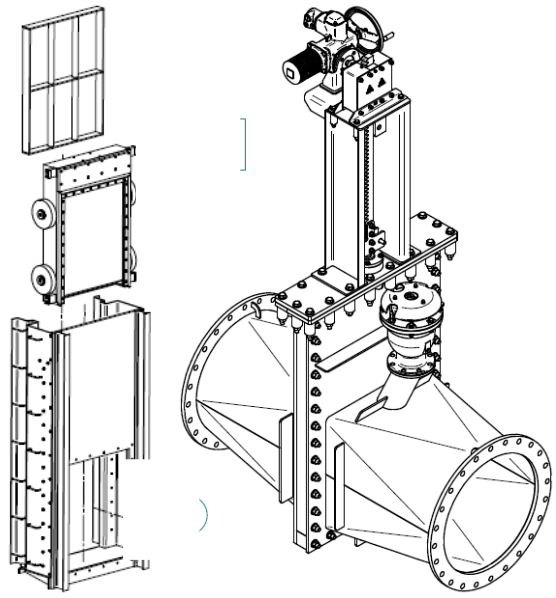
Ouvrage existant :	**Ouvrage projeté :**
2 pertuis maçonnés de section variable (min : 1,2 x 1,0 m)	2 conduites en acier DN800
Vannes amont : vannes murales à glissières calées à la cote 274,32 m NGF	Vannes amont (garde) : vannes wagons (tablier lxh = 1,01 m x 1,45m) calées à la cote 274,32 m NGF
Système de manœuvre : manuel par brimbales et vis sans fin uniquement à partir de la cote 278,82 m NGF	Système de manœuvre : automatique et manuel par brimbales et autovérin depuis la crête (296,32 m NGF)
Vanne aval : aucune	Vannes aval (réglage) : vannes papillons (DN800) remplacées durant les travaux par des vannes plates sous carter (pelle lxh = 0,875m x 0,845 m)
Système de manœuvre : sans objet	Système de manœuvre : initialement centrale hydraulique remplacée par un motoréducteur AUMA et transmission par cric/crémaillère localisé dans le local de chambre aval (automatique et manuel)
Capacité d'évacuation par vanne à la cote 295,40 m NGF : 14,6 m^3/s	Capacité d'évacuation par vanne à la cote 295,40 m NGF : 8 m^3/s (respectant les recommandations BETCGB)
 	  

***Tableau 2** : Comparatif des organes de vidange existants et ceux projetés [2]*

Le diagnostic réalisé dans le cadre du projet de réhabilitation mettait en évidence que les 2 vannes de vidange étaient fortement envasées. La vanne de gauche n'avait d'ailleurs pas été utilisée lors des deux dernières vidanges de 2004 et 1994. La vanne de droite avait été manœuvrée lors des dernières vidanges, mais son exploration par plongeur avait montré que sa conduite était obstruée par des arbres et branchages. Les vannes wagon (à l'amont) qui équipaient ces galeries n'étaient manœuvrables qu'à retenue basse (cote du redan, 278,82 m NGF) ce qui limitait considérablement le niveau de sûreté de l'ouvrage (non fonctionnel en retenue normale).

1.3.3 Les vannes robinets

Les caractéristiques principales de l'ouvrage existant et de l'ouvrage projeté (phase conception) dans le cadre des travaux de réhabilitation sont synthétisées dans le tableau 3 ci-dessous :

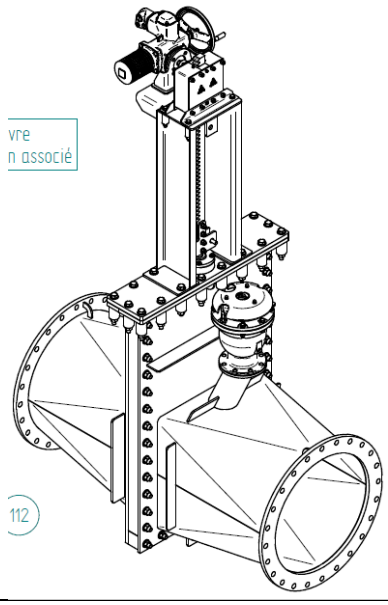
Ouvrage existant :	**Ouvrage projeté :**
5 conduites rivetées en fonte (DN800) calées à la cote 276,49 m NGF	5 conduites en acier DN700 calées à la cote 276,49 m NGF
Vannes amont : vannes à opercules (DN800)	Vannes amont (garde) : vannes papillons (DN700) remplacées durant les travaux par des vannes plates sous carter (pelle lxh= 0,775m x 0,745 m)
Système de manœuvre : manuel depuis le local robinet (pied aval) par volant de grand diamètre, mais non fonctionnel	Système de manœuvre : automatique et manuel par motoréducteur AUMA et transmission par cric/crémaillère localisé dans le local des robinets-vannes (pied aval)
Vanne aval : vannes papillon (DN700) en bronze	Vannes aval (réglage) : vannes guillotines (DN700) remplacées durant les travaux par des vannes plates sous carter (pelle lxh= 0,775m x 0,745 m)
Système de manœuvre : automatique et manuel par vérin hydraulique depuis le local robinet (pied aval)	Système de manœuvre : automatique et manuel par motoréducteur AUMA et transmission par cric/crémaillère localisé dans le local des robinets-vannes (pied aval)
Capacité d'évacuation par vanne à la cote 295,40 m NGF : 4,4 m^3/s	Capacité d'évacuation par vanne à la cote 295,40 m NGF : 6m^3/s
 	

***Tableau 3** : Comparatif des vannes existantes dites robinet et celles projetées [2]*

Le diagnostic réalisé dans le cadre du projet de réhabilitation mettait en évidence que les 5 robinets-vannes étaient fonctionnels. Toutefois, seules les vannes papillons étaient utilisables, même si elles présentaient des fuites. Les vannes « historiques » équipant ces robinets-vannes étaient hors d'usage. Toutes ces vannes sont situées à l'aval, dans la chambre des robinets-vannes.

1.3.4 Les vannes de la tour de prise d'eau

Les caractéristiques principales de l'ouvrage existant et de l'ouvrage projeté (phase conception) dans le cadre des travaux de réhabilitation sont synthétisées dans le tableau 4 ci-dessous :

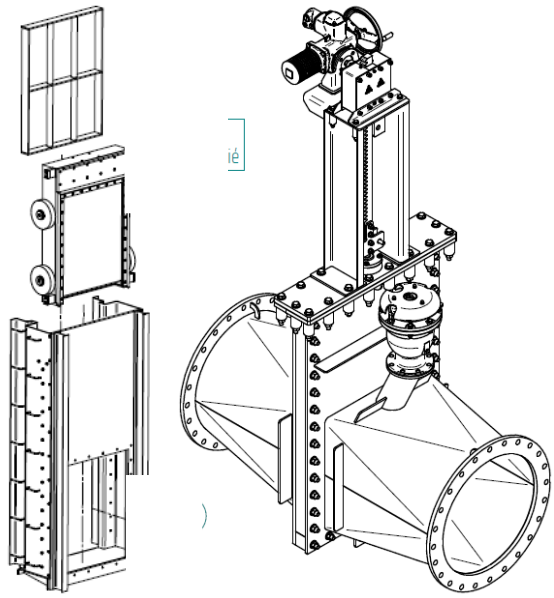
Ouvrage existant :	**Ouvrage projeté :**
3 niveaux de prises étagées comportant chacun 3 pertuis maçonnés (0,9 x 0,7 m) se déversant dans le fût maçonné de la tour de prise d'eau (cotes : 289,87 / 285 ,44 / 280,90 m NGF)	3 niveaux de prises étagées comportant chacun 1 seule conduite en acier de diamètre DN700 reliée à un collecteur vertical principal en acier DN1000 situé à l'intérieur du puits de la tour de prise
Vannes amont : 3 vannes murales à glissières (0,7 x 1 m) par niveau	Vannes amont (garde) : 1 vanne wagon (tablier lxh = 0,81m x0,86 m) par niveau
Système de manœuvre : manuel par brimbales et vis sans fin déporté sur chaque seuil supérieur	Système de manœuvre : automatique et manuel par brimbales et autovérin depuis la crête (296,32 m NGF)
Vanne aval : aucune	Vannes aval (réglage) : 1 vanne guillotine (DN700) par niveau remplacée durant les travaux par une vanne plate sous carter (pelle hxl = 0,775m x 0,745 m) située à l'intérieur du puits sur des paliers
Système de manœuvre : sans objet	Système de manœuvre : automatique et manuel par motoréducteur AUMA et transmission par cric/crémaillère implanté à chaque étage sur la plateforme de manœuvre
Capacité d'évacuation par vanne à la cote 295,40 m NGF respectivement : 4,4 / 5,9 / 7,1 m^3/s	Capacité d'évacuation par vanne à la cote 295,40 m NGF respectivement : 3,6 / 4,9 / 5,9 m^3/s
 	

***Tableau 4** : Comparatif des équipements de la tour de prise d'eau et ceux projetés [2]*

Le diagnostic réalisé dans le cadre du projet de réhabilitation mettait en évidence que les prises d'eau étaient fonctionnelles, mais manœuvrables uniquement manuellement, lorsque la retenue était suffisamment basse pour accéder aux paliers de manœuvre. Certains équipements hydromécaniques présentaient des traces de rouilles, mais l'ensemble ne présentait pas de dysfonctionnement notable.

1.3.5 Les vannes de la dérivation provisoire

Les caractéristiques principales de l'ouvrage existant et de l'ouvrage projeté (phase conception) dans le cadre des travaux de réhabilitation sont synthétisées dans le tableau 5 ci-après :

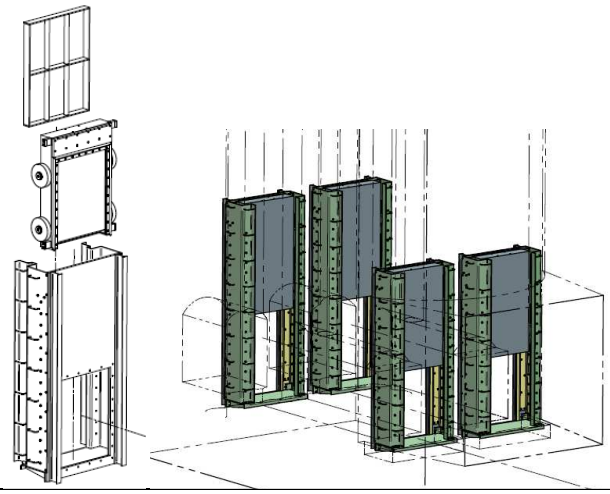
Ouvrage existant :	**Ouvrage projeté :**
2 pertuis maçonnés de 1 x 1,2 m	2 pertuis maçonnés de 1 x 1,2 m
Vannes amont : vannes plates 1 x 1,2 m	Vannes amont (garde) : vannes wagons (tablier lxh = 0,9m x 1,52 m)
Système de manœuvre : manuel et automatique par brimbales et vérin hydraulique depuis la crête	Système de manœuvre : automatique et manuel par brimbales et autovérin depuis la crête (296,32 m NGF)
Vanne aval : aucune	Vannes aval (réglage) : vannes wagons (tablier lxh = 0,9m x 1,7 m)
Système de manœuvre : sans objet	Système de manœuvre : automatique et manuel par brimbales et autovérin depuis la crête (296,32 m NGF)
Capacité d'évacuation par vanne à la cote 295,40 m NGF : 9,5 m^3/s	Capacité d'évacuation par vanne à la cote 295,40 m NGF : 9,5 m^3/s
	

***Tableau 5** : Comparatif des vannes de la galerie de dérivation provisoire et celles projetées [2]*

Le diagnostic réalisé dans le cadre du projet de réhabilitation mettait en évidence que les vannes plates qui équipaient la galerie étaient fonctionnelles, mais présentaient des fuites importantes.

1.3.6 Synthèse

L'ensemble des organes de manœuvre disponibles sur l'ouvrage, bien que globalement fonctionnels, présentait un niveau de vétusté élevé (corrosion, fuites, dysfonctionnement) et un niveau de sûreté faible : une seule vanne par pertuis, manœuvre limitée selon la cote de retenue (vannes de vidange et vannes de la tour de prise d'eau), seuil ne permettant pas d'évacuer des crues au-delà de la crue centennale.

De plus certains équipements étaient difficiles à manœuvrés : à titre d'exemple, pour permettre l'ouverture des vannes de la prise d'eau des paliers intermédiaires de 10 cm il était nécessaire de faire 130 tours.

Enfin, le barrage de Pont-et-Massène avait la particularité d'être surdimensionné en terme d'équipement car pas moins de 18 pertuis (2 vannes de fond, 5 vannes robinets, 2 vannes de galerie de dérivation et 9 vannes étagées) et 23 vannes permettaient de restituer le débit à l'aval de l'ouvrage.

2. CRITERES DE CONCEPTION RETENUS POUR LE DIMENSIONNEMENT

2.1 Augmentation du niveau de sûreté des équipements

Les organes dits de sûreté (vidange de fond et évacuateur de crues) ont évidemment été fiabilisés dans le cadre de la réhabilitation de l'ouvrage. Néanmoins, les autres organes ont également été fiabilisés :

2.1.1 Evacuateur de crues

Le choix du type d'évacuateur de crues avait fait l'objet d'une analyse multicritère visant à assurer un fonctionnement optimal de l'ouvrage tout en limitant les effets potentiels à l'aval y compris en cas de défaillance (ouverture accidentelle d'un clapet, basculement des hausses pour des crues importantes uniquement, etc…) dont les résultats ont été présentés au dernier congrés CIGB [1]. Cette analyse a permis de proposer un ouvrage mixte, composé de hausses fusibles sur environ 15 m de largeur et de clapets sur environ 15 m de largeur.

Les deux clapets sont conçus afin de permettre le passage des crues sans encombre même en l'absence d'énergie (mise en sécurité de l'ouvrage sur détection crue), tout en assurant la sécurité des personnes notamment vis-à-vis de l'évolution du niveau aval. Les principaux critères retenus ont alors été les suivants :

- la vitesse d'abaissement doit être au moins de 1 cm/min pour permettre le passage des crues,
- en situation de dysfonctionnement de l'automate, il n'y a pas de besoin impératif d'abaisser les clapets : si les deux clapets sont fermés, la cote maximale atteinte est la cote de danger,
- afin d'éviter des manœuvres intempestives des clapets hors crue, une redondance des sondes de mesures de niveau amont est prévue et il n'y a pas de manœuvre automatique des clapets en cas de discordance des deux capteurs,
- la gestion de commande s'effectue par cran afin de maîtriser la manœuvre des clapets (liée directement aux capteurs de position des vérins) et le dispositif de pilotage des clapets est conçu de telle sorte à limiter le débit sortant à 60 m^3/s/h, y compris en cas d'indicent sur le circuit hydraulique conduisant à un affaissement des clapets,
- les contrôles habituels sont mis en œuvre (contrôle par dépassement de cran et contrôle par temps d'ouverture trop long) ; en cas de défaut, les manœuvres automatiques sont suspendues,
- l'ouverture complète des clapets par l'automate seul est impossible, une intervention humaine est obligatoirement nécessaire pour abaisser le clapet au-delà de la cote 293,50 m NGF afin de limiter le débit aval à 70 m^3/s.

Les clapets possèdent enfin les sécurités habituelles : asservissement à la cote amont (mesurée par une sonde redondée), possibilité des manœuvres automatique ou motorisée sur ordre ou manuelle, l'alimentation se fait sur le réseau ou avec une alimentation secourue par groupe électrogène.

2.1.2 Vannes de vidange de fond

La sûreté de ces organes a été améliorée par :

- la conservation des deux pertuis de vidange nécessaire afin de vider la retenue dans des délais raisonnables,
- la mise en œuvre d'une vanne de réglage aval à l'intérieur d'une chambre de manœuvre créée en pied de barrage, la vanne amont, remplacée, faisant quant à elle office de vanne de garde,
- la possibilité de manœuvrer la vanne amont depuis la crête grâce à la réalisation d'un puits en béton armé,
- la motorisation des deux vannes (autovérin à l'amont et motoréducteur à l'aval),
- la possibilité de manœuvre manuelle depuis une armoire de commande locale ou directement au niveau du système de manœuvre (pompe à main ou volant),
- la possibilité de fermeture gravitaire des vannes de gardes sans apport d'énergie, en maîtrisant la vitesse de fermeture via un limitateur de débit sur le circuit hydraulique, y compris en charge.



Graphique 2 : Puits de vidange de fond et chambre de manœuvre aval (travaux en cours)

2.1.3 Les autres organes

- La réhabilitation des équipements a permis également d'améliorer la fiabilité des organes utilisés pour l'exploitation du barrage avec systématiquement :
- la mise en œuvre d'une vanne de réglage aval couplée avec une vanne de garde amont,
- la possibilité de manœuvrer les vannes de garde amont depuis la crête (vannes de la dérivation provisoire et de la tour de prise d'eau grâce à la réalisation d'une plateforme métallique) ou depuis le local aval (vannes robinet),
- la motorisation des deux vannes (autovérin pour les vannes wagons amont de la tour de prise d'eau et l'ensemble des vannes de la dérivation provisoire / motoréducteur pour les vannes plates sous carter aval de la tour de prise d'eau et l'ensemble des vannes robinet),
- la possibilité de manœuvre manuelle depuis une armoire de commande locale ou directement au niveau du système de manœuvre (volant ou manivelle),
- la possibilité de fermeture gravitaire des vannes de garde de type wagons sans apport d'énergie, en maîtrisant la vitesse de fermeture via un limitateur de débit sur le circuit hydraulique, y compris en charge.

2.2 Limitation des équipements au profit de leur robustesse

Compte tenu du nombre élevé d'organes de manœuvre, certains équipements ont été supprimés. Du fait de la difficulté technique de permettre la manœuvre des vannes de garde depuis la crête et l'exiguïté du fût de la tour de prise d'eau pour la mise en place des conduites et des vannes de réglages aval, il a été décidé de limiter à une seule vanne par étage le nouveau dispositif de régulation de la retenue de la tour de prise d'eau.

Le reste des équipements, notamment les 5 conduites des vannes robinet, a été conservé.

3. REFLEXIONS ET ADAPTATIONS DU PROJET

Les présents chapitres traitent des réflexions complémentaires qui ont été menées lors de la conception et/ou lors des études d'exécution avec le Maître d'ouvrage et parfois avec l'entreprise titulaire du marché de travaux (ROUBY Industrie).

3.1 Réflexions sur les conséquences d'un abaissement des clapets

3.1.1 Hypothèses

Une étude complémentaire visant à étudier les conséquences à l'aval en fonction du débit relâché par un clapet a été réalisée sur la base des études et des données déjà existantes. Deux cas de figures ont été analysés :

- Un abaissement intempestif provoqué par une mauvaise information du circuit de contrôle-commande ou par un défaut dans l'alimentation hydraulique du clapet. Dans ce cas le débit relâché est de l'ordre de 70 m^3/s avec une vitesse d'abaissement du clapet bornée à un gradient de 1m^3/s/min.
- Une rupture mécanique d'un clapet sous la retenue normale. Dans ce cas, le débit relâché instantanément atteint 100 m^3/s.

3.1.2 Conséquences à l'aval

Une approche simplifiée a permis d'identifier les conséquences possibles à l'aval en cas de relâchement d'un débit instantané de 100 m^3/s par rupture d'un clapet. Les conséquences sur l'environnement aval (habitations) ont pu être établies en recoupant celles liées aux crues historiques (1998 et 2013 notamment) du même ordre de grandeur faisant apparaître que les inondations pour les crues de référence (autour de 100 m^3/s) ne concernent que quelques habitations, notamment sur la commune de Semur-en-Auxois. Le retour d'expérience des crues passées semble montrer que les étages habités ne sont pas touchés.

Un calcul du temps d'arrivée de l'onde a été réalisé en considérant les deux cas de figure de défaillance des clapets :

- Dans le cas d'un abaissement intempestif du clapet, un calcul en régime permanent a été réalisé en considérant un canal trapézoïdal peu profond de longueur 6,5 km et de pente 3,5 pour mille. Les résultats sont synthétisés dans le tableau 6.
- Dans le cas d'une rupture mécanique du clapet, un calcul a été réalisé en considérant une propagation de type « intumescence » car dans ce cas, la propagation de la vague est plus rapide (passage de 0 à 100 m^3/s à l'amont du canal trapézoïdal correspondant à une élévation de 1,2 m du niveau d'eau). Le calcul a été réalisé par la méthode des caractéristiques permettant d'obtenir la vitesse de propagation du ressaut formé par ce front et synthétisé dans le tableau 6.

3.2.2 Synthèse

Le tableau ci-dessous résume les résultats obtenus par l'étude simplifiée réalisée dans le cadre du projet de réhabilitation du barrage et visant à déterminer les conséquences à l'aval suite à une défaillance des clapets de l'évacuateur de crue selon deux types d'évènement :

Evénement	Débit max relâché	Vitesse de propagation de l'onde et temps d'arrivée à Semur	Vitesse de montée de l'eau	Dangerosité
Ouverture intempestive	70 m^3/s	1,7 m/s ; 1h	Montée progressive : en moyenne 2 cm/min	Relativement peu dangereux : peu ou pas de débordements ; montée progressive
Rupture mécanique	100 m^3/s	4 m/s ; < 1/2h	Effet de vague type « mascaret »	Relativement peu dangereux pour l'habitat (pas d'étage habité inondé). Dangereux pour les personnes fréquentant la rivière ou les abords.

***Tableau 6** : Synthèse des conséquences suite à une défaillance d'un clapet*

L'ouverture intempestive génère des risques, mais des risques limités par les critères de fonctionnement (pas d'ouverture automatique au-delà de 50% d'ouverture ; vitesse d'abaissement lente).
La rupture brutale d'un clapet créée des risques plus forts pour les personnes qui fréquentent la rivière (pêcheurs) et les abords immédiats. Il a été dès lors préconisé un dimensionnement sécuritaire des pièces mécaniques de ces vannes (prise en compte des coefficients de sécurité usuels) ; dans ce cas, le risque de rupture peut être considéré comme suffisamment faible pour être accepté.

3.2 Les contraintes de conception des vannes-robinetteries à hautes vitesses

3.2.1 Généralités

La rénovation des équipements du barrage et particulièrement les vidanges de fond et de demi-fond (robinets-vannes) est directement liée aux critères de choix des vannes-robinetterie qui permettront l'exploitation de ces circuits. Leurs caractéristiques (débitance, diamètre des conduites,…) sont telles que les vitesses d'écoulement sont relativement élevées en conditions de charge normale à haute, celles-ci peuvent atteindre environ 16m/s.

Ce paramètre est une contrainte forte en terme de robinetterie, puisqu'à ces régimes d'écoulement, les vannes adaptées ne sont plus des vannes standards (pour des vitesses de fluide < 5m/s), mais des vannes de conception spécifique dite à haute-vitesse, permettant de garantir la pérennité de l'équipement face aux sollicitations induites par ce régime de fonctionnement. Ainsi ces vannes hautes-vitesses présentent des dispositions constructives permettant d'éviter l'apparition de phénomènes destructifs (abrasion, vibration, cavitation,…), comme par exemple dans le cas d'une vanne papillon :

- un obturateur (papillon) renforcé et profilé hydrodynamiquement afin de limiter son incidence dans le flux (perturbations de l'écoulement aval, vibrations, cavitation,…),
- le renforcement et la protection des dispositifs d'étanchéité.

De plus, le délai de fourniture de vannes dites à « haute-vitesse » est de l'ordre de 12 mois, contre 4 à 6 mois pour des vannes standards.

Dans le choix du type de vanne, plusieurs critères interviennent, et notamment :

- régulation / tout ou rien,
- les conditions de fonctionnement (fermeture gravitaire sans énergie,…),
- la qualité des eaux et la probabilité de passage de déchets/flottants (passage intégral en position ouverte,…),
- …etc

En plus des facteurs de sûreté et de prix éventuels, ces critères permettre de cibler le type d'équipement adapté à la fonction et aux conditions (exploitation, implantation, maintenance,…) du site où sera installée la vanne. Parmi les types de vanne-robinetterie, on peut notamment citer :

- Vanne papillon
- Vanne opercule ou guillotine ou vanne plate coulissante sous-carter (vanne bureau)
- Vanne wagon sous-carter
- Vanne jet-creux
- Vanne pointeau
- Vanne ogive
- Vanne à robinet sphérique
- … etc

3.2.2 Difficultés rencontrées sur le barrage de Pont-et-Massène

Le paragraphe 1.3 rappelle les différentes vannes qui étaient prévue dans le marché de travaux et celles qui ont finalement été retenues. Le facteur déterminant dans la modification des équipements a été le délai de fourniture des vannes initialement prévues incompatible avec le planning général de l'opération nécessitant la réalisation de l'ensemble des travaux, génie civil compris, en moins de 12 mois. De plus, les fabricants des vannes papillon et guillotines consultés émettaient des réserves quant à la pérennité de ce type de vanne dans le cas d'un fonctionnement en vanne de demi-fond avec un risque élevé de présence d'embâcles, couplé à des vitesses d'écoulement importantes.

Le délai de réalisation des travaux étant primordial compte tenu de l'hydrologie du site et du risque de crue en cas de dépassement, le projet a été modifié en concertation avec le Maître d'ouvrage et l'entreprise en charge des travaux.

Les principales modifications ou adaptations du marché ont concerné :
- la vanne de réglage des vidanges de fond, prévue initialement de type papillon manœuvrée par un vérin hydraulique avec un contrepoids pour permettre une fermeture gravitaire, a été modifiée par une vanne plate sous carter manœuvrée par un cric à crémaillère et un motoréducteur,
- la vanne de garde amont des vannes robinet, prévue initialement de type papillon manœuvrée par un motoréducteur, a été modifiée par une vanne plate sous carter manœuvrée par un cric à crémaillère et un motoréducteur,
- les vannes de réglage aval des vannes robinets et de la tour de prise d'eau, prévues initialement de type guillotine (opercule) manœuvrées par un motoréducteur, ont été adaptées avec des vannes de type plate sous carter, de section carrée, guidées sur toute la hauteur de la pelle avec des jeux réduits et manœuvrées par un ensemble motoréducteur et cric à crémaillère.

Ces modifications ont donc concerné 15 des 24 vannes prévues d'être remplacées dans le cadre du marché de travaux.

Les avantages et les inconvénients liés à ces modifications et adaptations du projet sont précisés ci-dessous :
- le délai de fabrication est raccourci passant d'environ 12 mois à 5 mois,
- ce type de vanne permet de garantir le passage intégral de l'écoulement en position ouverte à 100% (permet d'éviter le coincement de déchets) à l'inverse des vannes de type papillon,
- la section de passage carrée permet de réduire les vitesses d'écoulement au droit de la pelle,
- l'étanchéité métal/métal remplace une étanchéité avec joints (type néoprène) qui sont exposés à l'abrasion par les hautes vitesses,
- l'entretien de ce type d'organe est réduit : cela concerne principalement le presse-étoupe (toutefois ses joints ne seront pas soumis à l'abrasion), et les plats de glissement en bronze sur la pelle qui disposeront tout de même de plusieurs mm d'usure et qui auront de ce fait une durée de vie conséquente (au moins 5 à 10 ans) suivant leur mode d'exploitation (temps de fonctionnement en régulation et fréquence des manœuvres),
- en revanche, ce type d'organe ne peut se fermer gravitairement, ce qui était prévu pour les vannes papillons des vidanges de fond ; mais cette fonction est déjà remplie par la vanne de garde de type wagon.

3.2.3 Dispositions constructives complémentaires

La conception de vanne plate sous carter est relativement simple et robuste, ce qui permet d'optimiser la fiabilité, la pérennité et la maintenabilité de la vanne. Toutefois, un soin particulier lors de la réalisation (conception, fabrication, montage) est à apporter à :
- La planéité de l'interface d'appui (glissement et étanchéité) entre la pelle et le corps. Les pièces en contact (bronze/inox) doivent être de ce fait usinées après soudage pour les plats inox montés sur le demi-carter aval.
- La qualité du montage du presse-étoupe qui sert de guidage et d'étanchéité au niveau de la tige de manœuvre est à soigner.
- La qualité des dispositifs d'étanchéité entre demi-carter est également à soigner : gorges doivent être usinées suivant les tolérances dimensionnelles et de montage des joints toriques de même que l'usinage des portées d'étanchéité.

  Ces dispositions doivent permettre de garantir notamment le bon plaquage de la pelle sur les plats d'appui (étanchéité), et son guidage précis avec des jeux fonctionnels réduits (3mm) qui permettent de limiter les éventuels phénomènes de vibration de la vanne en position d'ouverture partielle sous de fortes charges.

De plus, les faces d'appui et d'assemblage des 2 demi-carters seront usinées afin d'obtenir un état de surface et une rugosité en adéquation avec l'étanchéité totale recherchée et montées à la graisse (type suif). Le reste des parties de la vanne (hors pelle en abramax et les plats inox ou bronze), sera protégé par application d'un revêtement peinture suivant le référentiel ACQPA.

Enfin, chaque vanne sera muni d'un système d'aération, de type reniflard, qui permettra notamment l'apport et l'entraînement d'air au niveau de la veine fluide (écoulement) afin d'empêcher l'apparition de zones de sous-pression (perturbations hydrodynamique dues à la pelle dans le flux), et ainsi d'éviter les phénomènes de cavitation et de vibration qui peuvent engendrer une dégradation des pièces (érosion, choc et abrasion).

4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Dans le cadre de la réhabilitation du barrage de Pont-et-Massène, le remplacement de l'ensemble des équipements du barrage a permis d'améliorer leur fiabilité (fonctionnement, pérennité et exploitation).

Cela a été le cas pour l'évacuateur de crues qui a été équipé d'un système mixte composé de hausses fusibles et de clapets dont la conception s'est voulue être la garante du meilleur compromis entre l'efficacité (garantie d'évacuation des plus fortes crues) et la limitation de l'impact à l'aval pour les plus petites crues et/ou les défaillances et manœuvres intempestives. On notera que ces ouvrages seront mis en œuvre en fin d'année 2015.

Cela a également été le cas pour les vannes. Les travaux sont actuellement en cours avec une pose des premières vannes courant juillet 2015, mais on rappelle les modifications des organes, particulièrement la majeure partie des vannes de réglage aval initialement prévues de type papillons ou guillotine et remplacées par des vannes plates sous carter. Ce choix s'est surtout fait par rapport au planning, qui rendait la fourniture des équipements prévus au marché impossible dans le délai, mais également en considérant que ces équipements étaient une alternative à ceux proposés tout aussi fiable, voire plus robuste, plus pérenne (suppression des joints) et sans doute plus simple pour leur entretien futur : équipement plus « rustique ».

REMERCIEMENTS

Nous souhaitons particulièrement remercier Voies Navigables de France (DTCB) pour sa participation active dans la réflexion sur le choix des équipements à retenir.
Nous souhaitons également remercier l'entreprise ROUBY Industrie, en charge des travaux de remplacement des organes, qui a été moteur dans la concertation et force de proposition tout au long du chantier.

RÉFÉRENCES ET CITATIONS

[1] Bail, A., Carlier, T., Lapeyre, O., & Tardieu, A. (2015). *Augmentation de la capacité d'évacuation des crues de plusieurs barrages moyens – Choix des équipements*. 25ème Congrès des Grands Barrages (CIGB), Stavanger.

[2] Nomballais, J-J., Sancher, B., & Pesin, N. (2015). *Etudes d'exécution du barrage de Pont-et-Massène*.

LE BARRAGE DU LIEGEOT : UN EXEMPLE DE COMPLETE REMISE A NEUF DES EQUIPEMENTS D'UN BARRAGE MOBILE SOIXANTENAIRE

Liegeot dam: an example of complete refurbishment of a sixty years old mobile weir

Denis CARLIER, Philippe SCHALKWIJK, Maxime VESIN
BRL ingénierie – BP 4001 - 30001 Nîmes Cedex - France
Courriel: denis.carlier@brl.fr, philippe.schalkwijk@brl.fr, maxime.vesin@brl.fr
+33(0) 4 66 87 50 00, Fax : +33 (0)4 66 84 25 63, brli@brl.fr

Eric LECOMTE, Johannes EVIN
ISM – BET Mécanique et Structure – Z.A. de Lanserre – 15 rue de la fuye - 49610 Juigne-sur-Loire
elecomte@ism-ing.fr, jevin@ism-ing.fr
Téléphone : (33) 2 41 45 70 00, Fax : (33) 2 41 45 71 45, Courriel : isming@ism-engineering.com

MOTS CLÉS

Barrage mobile, barrage de navigation, Moselle canalisée, vanne segment, vanne clapet, vanne segment avec clapet embarqué, réhabilitation, rénovation, travaux en rivière, contraintes hydrologiques en travaux.

RÉSUMÉ

Le barrage du Liegeot : un exemple de complète remise à neuf des équipements d'un barrage mobile soixantenaire
Le barrage du Liegeot sur la Moselle canalisée fait partie du parc des plusieurs dizaines de barrages de navigation qui ont bénéficié des grands investissements de l'après-guerre jusque dans les années 1970, puis sont presque tombés en désuétude jusqu'en 1990, année de la création des Voies Navigables de France qui a permis de relancer les investissements liés au transport fluvial. Une première caractéristique de ces barrages est leur âge : 40 à 80 ans, ce qui, pour les équipements hydromécaniques, est un âge très respectable. Une deuxième caractéristique tient à la diversité de leurs équipements de bouchure mobile : vannes segment, clapets, vannes cylindres, vannes levantes, y compris vannes combinées levantes et clapets embarqués.
Dans cette panoplie de barrages de navigation mosellans, le barrage du Liegeot est sans conteste celui dont les équipements mobiles sont les plus inadaptés, tant son système de vannes levantes et abaissantes pourtant ingénieux dans son principe, souffre d'un fonctionnement mécanique insatisfaisant voire défectueux allié à de graves difficultés d'entretien du fait que toutes les pièces d'usure sont constamment sous l'eau. Cette situation, associée à des réelles difficultés de batardage, a rendu l'ouvrage quasiment in-entretenable, et, de fait, dangereux. L'article qui suit relate un cas de rénovation complète du système de bouchures mobiles d'un barrage de navigation pour lequel le concepteur s'est attaché à combiner les avantages d'une refonte complète du système de bouchures mobiles avec le maintien des éléments porteurs du génie civil – radier piles et culées –générant ainsi de substantielles économies en regard d'une solution de reconstruction complète.

ABSTRACT

The Liegeot dam on the canalised Moselle is one of the numerous navigation dams that were built due to the large post-war investments until the 1970s. These dams fell then almost into disuse until 1990, date of creation of Voies Navigables de France, which helped to boost investments related to fluvial transport. A first characteristic of these dams is their age: 40-80 years, which is rather old regarding the hydromechanical equipment. A second characteristic concerns the diversity of their mobile equipment type: radial gates, flap gates, cylinder gates, vertical lift gates, including combined vertical lift or radial gates and flap valves. Among all Moselle navigation dams, the Liegeot dam is undoubtedly the one which mobile devices are the most unsuitable. Indeed, its up and down lift gates system, however ingenious, suffers from inadequate or faulty mechanical operation worsened by some severe maintenance problems due to the fact that all the equipments parts are always under water. These circumstances, combined with the current difficulties of emptying the sluice by stop-logs, have led for the Liegeot dam to a serious critical situation. The following article describes an example of a complete renovation of the navigation dam mobile weir system, for which the designer has sought to combine the advantages of a complete overhaul of mobile gates with the preservation of the main parts of the supporting structure – foundation slab, piers and abutments -, allowing some substantial savings compared to a complete reconstruction solution.

1. LE BARRAGE DU LIEGEOT DANS LE CONTEXTE DU RESEAU NAVIGABLE DU NORD-EST FRANÇAIS

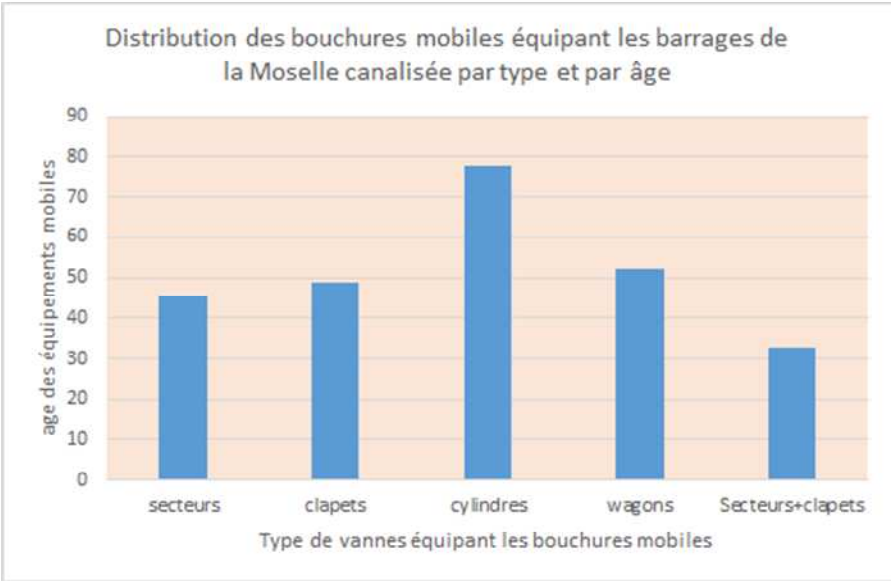
Dans le contexte du réseau fluvial de navigation européen, et dans l'attente de la réalisation de la liaison Seine Nord Europe, la Moselle constitue avec le bassin de la Seine à l'Ouest et le Rhin à l'Est une des trois portes d'entrée du trafic fluvial européen sur le réseau français à grand gabarit. Elle dessert notamment le port de commerce de Nancy – Frouard-Clévant situé en embranchement sur la Moselle à grand gabarit.



Figure 1 : Itinéraire de la Moselle canalisée

L'itinéraire de la Moselle canalisée est constitué de 17 biefs de navigation compris entre l'écluse d'Apach à la frontière avec l'Allemagne au Nord et l'écluse de Neuves-Maisons au sud. Il se prolonge par le triple embranchement du canal de la Marne au Rhin coté Est, du canal des Vosges au sud et – coté Ouest – de la liaison vers le centre et l'Ouest via Toul, Bar-le-Duc et Vitry-le-François. Une douzaine de barrages maintiennent le niveau, soit en rivière soit dans des dérivations (canal artificiel à grand gabarit), créant au passage autant de chutes qui ont permis l'installation d'usines d'hydroélectricité.

Cette douzaine de barrages mobiles de l'itinéraire construits entre 1932 et 1978 et dont le Liegeot fait partie ont la double spécificité d'avoir plus de 50 ans en moyenne – ce qui pour la vantellerie constitue un âge respectable – et de constituer un échantillonnage remarquable des différentes typologies de bouchures mobiles rencontrées couramment sur ces ouvrages. Ces typologies d'équipements (vannes wagons, vannes secteurs, vannes segments, vannes cylindres, clapets, équipements combinés ou mixtes sur un même ouvrage) combinées à leur âge moyen aboutit au diagramme suivant :



Graphique 1 : *Distribution des bouchures mobiles équipant les barrages de la Moselle canalisée par type et par âge*

Ainsi, les fameuses vannes cylindres équipant les barrages les plus anciens (et reconstruits par l'Allemagne dans les années 20 à 30 au titre des dommages de guerre) apparaissent comme les vantelleries « vétérans » de près de 80 ans d'âge, tandis que les vannes segments avec clapets embarqués constituent les « benjamines » des types de bouchures mobile avec un âge moyen d'environ 30 ans.

2. FOCUS SUR L'ETAT ACTUEL DU BARRAGE DU LIEGEOT , ET LES PRINCIPALES DIFFICULTEES QUE POSE SON EXPLOITATION

2.1 Principales fonctionnalités du barrage actuel

Rappelons que les vantelleries du barrage du Liegeot sont constituées de 3 vannes wagons montantes et abaissantes de 33m de portée. Chacune d'elle est équipée d'un bordé amont formant clapet solidaire de la structure porteuse de la vanne wagon et qui, ainsi, favorise l'écoulement par surverse.



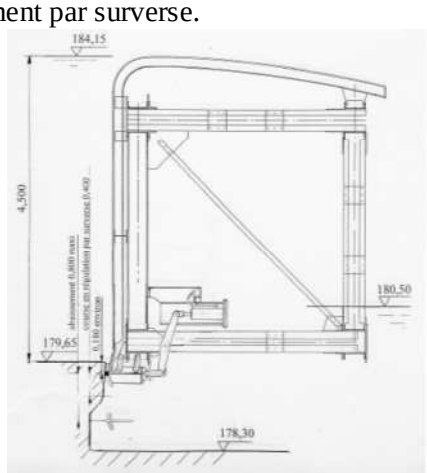


Photo 1 : *Vue aval de la passe centrale avec vanne wagon*

Ainsi, pour la régulation des débits courants par surverse, les vannes wagons sont descendues en s'escamotant à l'aval d'un seuil fixe d'une dénivelée maximale de 80cm. En abaissant les 3 passes du barrage, l'Exploitant peut de cette façon gérer des débits courants par surverse jusqu'à 160 m3/s passant par le seul barrage, équivalent à un débit de la Moselle de 300m3/s en tenant compte du débit pouvant transiter par la microcentrale qui le jouxte, soit au final de l'ordre de 340 jours par an.
Lorsque les débits augmentent encore, il faut alors enclencher un mouvement inverse de soulèvement des vannes aux fins de les faire fonctionner en sousverse, ce soulèvement se terminant par leur escamotage complet en position haute. Les organes de manœuvre sont de type électromécanique – chaine Galle et motoréducteurs mus par des moteurs asynchrones -, à raison de 2 actionneurs par vanne.
Lorsque le débit de rivière atteint 700 m3/s, les 3 vannes complètement escamotées vers le haut ne permettent plus de gérer la constance du niveau amont, le barrage est alors totalement effacé.

2.2 Les principales insuffisances et pathologies des vannes actuelles

Le premier défaut de ces vannes réside dans le fait que la débitance d'une vanne n'est pas une fonction continument croissante du paramètre « déplacement ». En effet, lorsque l'Exploitant doit augmenter la débitance d'une vanne parce que les conditions hydrologiques l'imposent alors que celle-ci est déjà abaissée au maximum en surverse, la cinématique impose de repasser par le point mort d'étanchéité parfaite avant de pouvoir débuter l'ouverture par sousverse. L'Exploitant est ainsi obligé –pour augmenter la débitance d'une vanne – de repasser par un point de débitance nulle avant de pouvoir effectivement bénéficier de l'augmentation de débitance désirée, ce qui est paradoxal et pas très sécurisant pour l'exploitant.

Le deuxième défaut, beaucoup plus gênant, réside dans le fait que le système d'étanchéité du seuil – pour ingénieux qu'il soit, est globalement peu efficace et, en outre, pratiquement inaccessible pour toute opération de réparations et maintenance sauf à entreprendre une mise à sec préalable par batardage complet de la passe. Fait aggravant, même dans les conditions d'une mise à sec de la passe par batardage, le système d'étanchéité de seuil de vanne a été conçu d'une manière telle qu'aucune réparation n'a pu à ce jour être qualifiée d'efficace et pérenne.

Le troisième défaut de ce système de bouchure vient du fait qu'en définitive, toutes les pièces d'usure : joints, boogies, galets, etc… sont constamment sous l'eau et ne peuvent donc être accessibles pour des entretiens qu'après batardage et mise à sec de la passe complète. Ce défaut est majeur : en effet, si on peut comprendre et admettre que pour une opération de gros entretien ou de renouvellement, une mise à sec préalable par batardage de la passe soit nécessaire, cette condition devient inacceptable si elle doit s'appliquer aussi à des opérations de maintenance courante de type : graissage, réglage d'un joint, remise en peinture partielle, etc… Or force est de constater qu'avec ce type de vannes où – pour résumer – tout est tout le temps sous l'eau -, pratiquement aucune opération d'entretien n'est envisageable sans mise à sec préalable de la passe.

Le quatrième défaut important est d'ordre structurel, à savoir qu'une vanne wagon de 33m de largeur (L) et 4,50m de hauteur (H) présente un rapport d'élancement H/L tellement faible que le guidage de cette vanne dans ses rainures est entièrement dépendant du bon fonctionnement des actionneurs. Il en résulte que le moindre défaut de synchronisme de ceux-ci peut générer une manœuvre dissymétrique entre les extrémités gauche et droite de la vanne, et ainsi provoquer un déraillement ou un blocage du système.

Last but not least, la structure des vannes constituée d'un système de poutres treillis mécanosoudées forme au final une structure « idéale » d'encagement dans laquelle les embâcles s'accumulent sans jamais pouvoir en sortir, comme on peut le voir sur la photo ci-contre. C'est ainsi qu'il a été récupéré pas moins de 14 tonnes de bois en embâcles au cours de la seule année 2010 !



Photo 2 : Embâcles dans la vanne wagon

Au global donc, les difficultés croissantes et récurrentes que l'Exploitant rencontre pour maintenir son ouvrage dans un état satisfaisant de fonctionnement et de sécurité ajouté au stress que peut générer la conduite d'opérations de maintenance aussi périlleuses qu'incertaines lui ont fait maugréer et abhorrer définitivement ce type de vanne et adopter comme seul conseil au maitre d'œuvre « *proposez tout ce que vous voulez pour la réhabilitation de l'ouvrage, mais épargnez-nous de grâce une réhabilitation à l'identique* ».

3. DU CHOIX DE LA VANTELLERIE LA MIEUX ADAPTEE AUX FONCTIONNALITES DE L'OUVRAGE ET AUX BESOINS DE L'EXPLOITANT

3.1 Solutions de vantellerie envisagées

Au stade des études préliminaires (PRE), les solutions de bouchures mobiles envisagées aux fins de balayer le champ du possible ont été les suivantes :

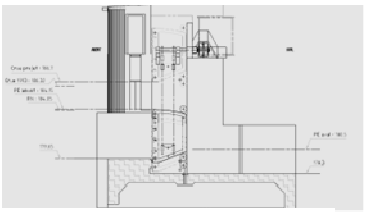
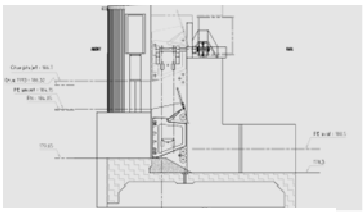
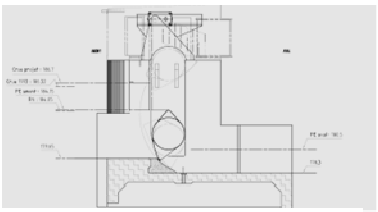
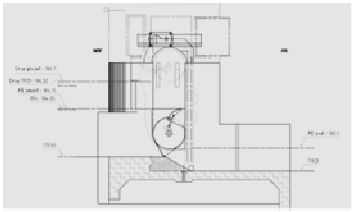
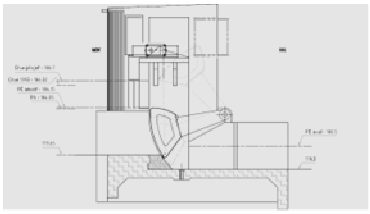
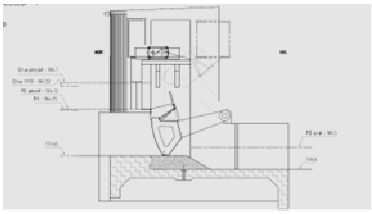
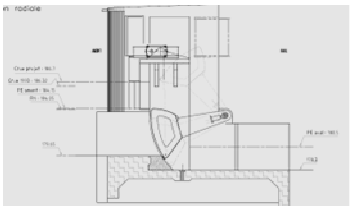
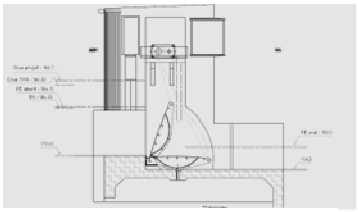
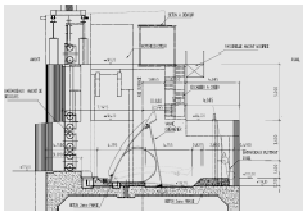
 *1. Wagon levante-abaissante*	 *2. Levante avec clapet*	 *3. Cylindre levante abaissante*
 *4. Cylindre avec clapet*	 *5. Segment levante-abaissante*	 *6. Segment avec clapet*
 *7. Segment levante-abaissante avec déplacement radial*	 *8. Clapet*	 *9. Clapet Obermeyer*

***Tableau 1 :** Différents types de vannes envisagées au stade des études préliminaires (PRE)*

Une analyse multicritère basée sur des critères de pondération suivants :
- Entretien – maintenance pour 30 points
- Sécurité – fiabilité pour 20 points
- Adaptabilité aux travaux de gros entretien pour 20 points
- Coûts d'investissement pour 20 points
- Performances hydrauliques pour 10 points

… a permis de mettre en évidence les 3 solutions les mieux notées suivantes: en première position, la solution 8 – *vanne-clapet traditionnelle* – en deuxième position la solution 6 – *Vanne segment et clapet associé*, et en troisième position la solution 9 – *Clapet de type Obermeyer*.

La vanne de type 8 – *vanne clapet traditionnelle* – bénéficiant notamment d'un bon retour d'expérience - s'est retrouvée très bien placée dans le cas d'une reconstruction neuve, mais en revanche pratiquement à exclure dans l'hypothèse d'une réhabilitation à cause de son manque d'adaptabilité au génie civil existant.

La vanne de type 6 - *Segment avec clapet* permet d'assurer une étanchéité très sûre par couteau, demande un entretien limité, et relève d'une technique éprouvée. En revanche cet équipement est un peu plus cher et nécessite un organe de manœuvre embarqué pour manœuvrer le clapet.

La vanne de type 9 – *Clapet Obermeyer* peut facilement être adaptée au génie civil existant et requiert peu d'entretien. En revanche le risque d'effacement de la vanne en cas de crevaison de la baudruche – entrainant une perte du bief – ne peut pas complètement être écarté. De plus, à une exception près, il n'existe pas en Europe de vanne Obermeyer pour des retenues supérieures à 3 m. Or la retenue au Liegeot est de 4,85 m.

3.2 La solution retenue

Ayant démontré par ailleurs qu'une solution de réhabilitation lourde réutilisant l'essentiel de la structure génie civil – permettait d'économiser une dizaine de millions d'euros par rapport à toute solution de reconstruction ex nihilo pour un service rendu et une nouvelle durée de vie du même ordre, le choix du maître d'ouvrage s'est en définitive porté sur la vanne segment avec clapet qui se distingue de toutes les autres par les avantages suivants :

a) Les efforts de poussée dus à la charge hydraulique ne se transmettant ni aux organes de manœuvre, ni à aucun autre mécanisme, mais directement à la structure béton par l'intermédiaire de l'axe vanne vers lequel ces efforts convergent, il n'y a donc ni effort de flexion, ni aucun effort de frottement additionnels autres que ceux inhérents aux joints latéraux de la vanne ; en d'autres termes, les efforts de manœuvre sont en première approche indépendants de la charge hydraulique ; il est à noter qu'aucun autre type de bouchure ne possède cet avantage, (sauf peut-être le cylindre) ;

b) Corrélativement à ce qui précède, les efforts de manœuvre sont donc très notablement inférieurs à ceux de la vanne wagon, et a fortiori inférieurs à ceux du clapet; moins d'efforts signifiant ici non seulement un moindre coût d'investissement de l'organe moteur et moins d'énergie dépensée pour les manœuvres, mais aussi et surtout moins d'usure, et donc un moindre coût d'entretien et de maintenance ;

c) En troisième lieu, il faut noter que les joints de seuil comme les joints latéraux sont embarqués sur la vanne et se trouvent donc dans une configuration optimale de simplicité et d'efficacité du point de vue de leur montage, de leur mode de fonctionnement et de leur entretien; ils travaillent mieux, s'usent moins et, de surcroît, leur remplacement ne nécessite pas de travaux complexes pour la raison citée ci-après.

d) Le quatrième élément positif, et non le moindre, est qu'aucune pièce d'usure ne se trouve en situation immergée ; en d'autres termes, les interventions d'inspection et d'entretien pourront être exécutées à l'air libre et dans des conditions d'accès relativement faciles dès lors que la vanne sera maintenue en position levée; il s'ensuit un autre avantage très important, explicité ci-après:

e) Il n'existe pratiquement aucun cas de figure ni aucune configuration d'entretien ou d'intervention lourde sur la vanne ou ses organes de manœuvre nécessitant un batardage complet de la passe – amont et aval avec mise à sec du pertuis - ; la conséquence directe étant qu'avec ce type de vannes, le nombre d'opérations de batardage complète des passes sera très grandement réduit.

f) Dernier élément positif : ce type de vanne permet un très bon cheminement des transports solides au travers du barrage en cas de crue.

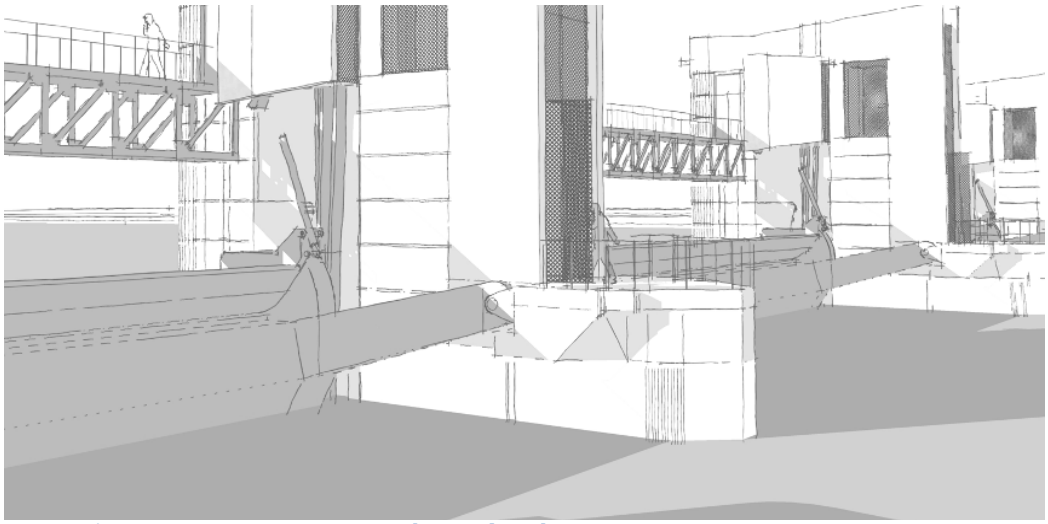


Figure 2 : *Vannes segment + clapets dans leur environnement - Esquisse FBG 234*

3.3 La vanne-segment proprement dite

La vanne segment proprement dite sera constituée principalement d'un caisson de 34 m de longueur, 3,5 m de hauteur utile et relié aux piles par deux bras de 4,7 m. Le caisson possède de bonnes propriétés en torsion et flexion. Les propriétés de flexion sont définies au regard de la sensibilité aux remous aval tandis que la torsion est conditionnée par le cas exceptionnel de perte d'une chaîne.

Les bras latéraux sont encastrés dans la poutre principale et rotulés au niveau des articulations. Le système est donc hyperstatique et seule la flexibilité relative des bras permet de réduire les efforts axiaux générés aux pivots par les dilatations et les charges hydrauliques.

Le segment possède une étanchéité de seuil et une étanchéité latérale. L'étanchéité de seuil est constituée d'un joint couteau néoprène. L'étanchéité latérale est constituée d'un joint cornière embarqué sur le segment. Il frotte tangentiellement sur une pièce fixe en inox.
Des treuils de manœuvre logés dans les cabines des piles et culées assurent le levage du segment. Il y a deux treuils par vanne, un sur chaque rive. Pour chaque côté le levage du segment s'effectue au moyen d'une chaîne Galle et d'un pignon fou monté sur le segment au moyen d'une fusée. Ce dernier permet le moufflage de la chaîne Galle.

3.4 La vanne clapet associée

Le clapet de surverse de 29 m x 1 m utile est en fait réalisé par deux demi-clapets de 14,5 m.
Chaque demi-clapet ne possède que deux paliers, l'un dit de commande et l'autre dit intermédiaire. Ceci a été rendu possible par :

- Le déplacement du palier intermédiaire de l'extrémité vers le 2/3 environ.
- L'abandon du ventre de poisson pour un profil plus rectangulaire et donc plus rigide.

Les joints de clapet sont composés de :

- une étanchéité horizontale de seuil comportant une cornière de caoutchouc fixée sur le seuil du barrage et s'appuyant sur une tôle cylindrique soudée à la partie basse du clapet et recouvrant les appareils d'articulation.
- deux étanchéités latérales comportant une cornière de caoutchouc se déplaçant dans un plan strictement vertical et venant s'appuyer sur une plaque de PEHD.
- entre les clapets : l'un des clapets est équipé d'une étanchéité latérale tandis que l'autre est constituée d'une surface de frottement avec pente d'accostage

Chaque demi-clapet est maintenu par un vérin électromécanique de 1500 mm de course. La synchronisation entre les deux clapets est réalisée par automate.

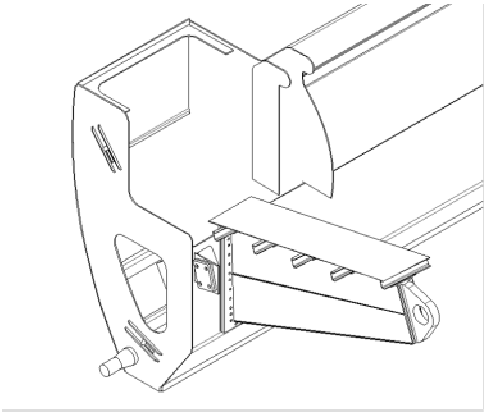


Figure 3 : Vanne segment et son bras

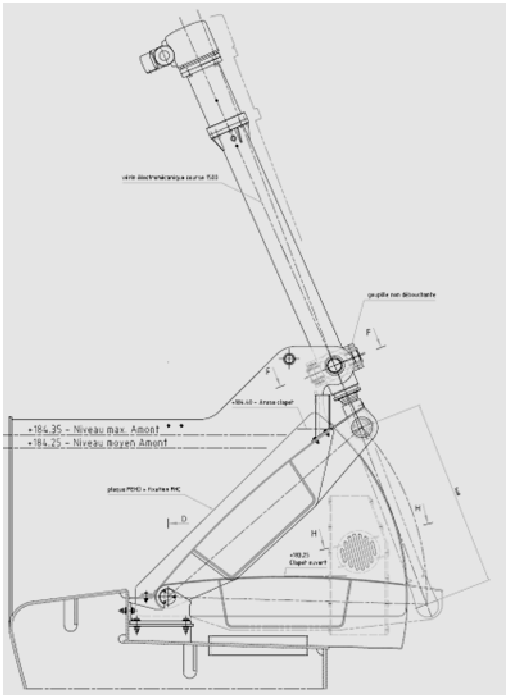


Figure 4 : Coupe transversale du clapet

3.5 Les adaptations du génie civil

3.5.1 Le radier

Le nouveau seuil est décalé d'environ 3m vers l'aval par rapport à l'ancien. C'est pourquoi le niveau haut du radier sera prolongé d'environ 5 m vers l'aval. Une section de béton d'environ b x h = 5m x 1,35m sera donc coulée sur toute la largeur de la passe. Cette section comportera des dents de manière à dissiper une partie de l'énergie de la chute. Dans cette section sera scellé le seuil métallique de la nouvelle vanne.
Le batardage aval étant prévu au moyen d'une bouchure flottante, un nouveau seuil doit être réalisé en partie aval du radier. Ce nouveau seuil comportera lui aussi des dents de dissipation de l'énergie de la chute.

3.5.2 Comblement des rainures verticales de vannes wagon

Les rainures verticales de la vanne wagon actuelle seront partiellement comblées. Dans cette partie sera scellée la pièce fixe d'étanchéité de la future vanne segment.

3.5.3 Le chevêtre support de paliers de vannes

Il s'agit d'une poutre en béton armé très massive de 5,3m de longueur pour chaque pile. Elle présente des encorbellements de 1,10m de part et d'autre de la pile. Chaque encorbellement reçoit un palier de vanne sur sa face amont. Ce chevêtre reposant sur un béton existant qui est peu voire pas armé à cet endroit, des renforts sont donc nécessaires, décrits ci-après :

- **Un chevalet composé de poutres en béton armé** engravées dans le corps de la pile aval. Il s'agit de quatre poutres de section p x l = 0,40m x 0,70m qui relient le chevêtre à la base de la pile, deux sont verticales et les deux autres obliques. Ces poutres sont reliées à des longrines de section b x h = 1,20m x 0,50m disposées dans le sens amont-aval sur le radier des passes, le long de la pile. Ce chevalet est dimensionné pour assurer la double fonction suivante :
  - Stabiliser la pile sous les efforts verticaux et horizontaux rive-gauche rive droite transmis par les paliers de vannes ;
  - Stabiliser la pile sous l'effet de la torsion induite par l'effort horizontal amont-aval d'une seule vanne pendant la phase provisoire durant laquelle une passe sera réhabilitée et l'autre pas. Le chevalet devra donc être complètement réalisé avant mise en service de la première vanne.

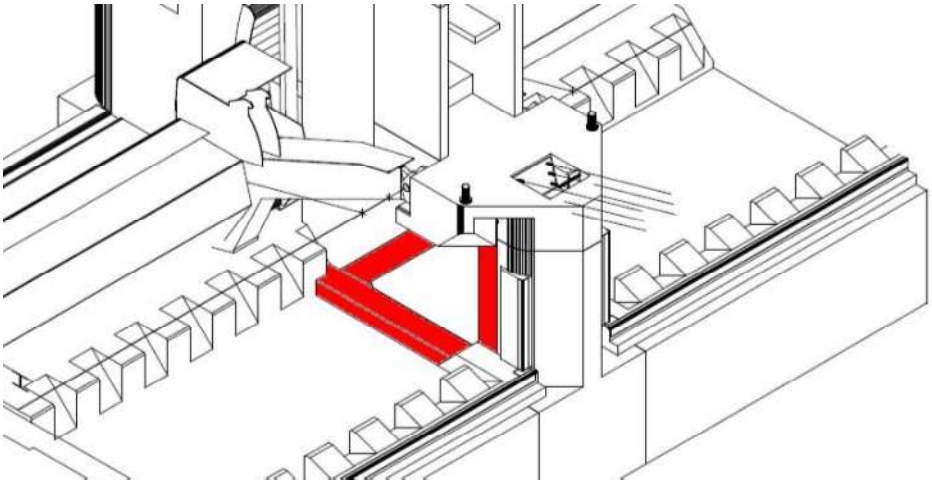


Figure 5 : Chevalet

- **Deux files de 5 micropieux**. Les micropieux sont disposés au droit du chevêtre des paliers de vannes (3 par file) ainsi qu'à l'aplomb des treuils (2 par file). Les têtes sont noyées dans les deux longrines en pied de pile. Les micropieux au droit du chevêtre assurent la stabilité de la fondation sous l'effet des efforts horizontaux et verticaux emmenés par les paliers de vannes. Les micropieux à l'aplomb des treuils sont destinés à reprendre les efforts verticaux exercés sur les treuils par les chaines Galle : jusqu'à 150t par chaine en situation accidentelle.
- **Deux ensembles de 3 barres précontraintes**. Ces barres sont ancrées au cœur de la pile, à l'amont et en pied des rainures des vannes wagon existantes. Les têtes d'ancrage sont disposées sur la face aval du

chevêtre. Ces barres sont destinées à transmettre les efforts horizontaux exercés sur le chevêtre au génie civil des rainures de vannes wagon, lesquelles sont les seuls éléments en béton de la pile suffisamment armés pour supporter les efforts hydrauliques appliqués aux vannes. Les barres sont inclinées de 16° par rapport à l'horizontale. Il s'agit de barres à haute résistance de diamètre 50mm permettant de reprendre chacune une charge de service de l'ordre de 100t. Ces barres seront mises en œuvre en deux phases :

- La première année : l'ensemble situé du côté de la première passe à réhabiliter,
- La deuxième année : l'ensemble situé du côté de la deuxième passe à réhabiliter.

A l'aval comme à l'amont du chevêtre, la plateforme existante est comblée au béton armé de manière à obtenir une plateforme aval horizontale.

3.5.4 Les cabines de treuils

Les cabines existant en haut des piles sont démolies et entièrement reconstruites. Elles sont élargies de manière à permettre une circulation aisée autour des treuils.
Une cage d'escalier est construite en aval de chaque cabine pour permettre l'accès à la plateforme aval.

Le modèle 3D d'une nouvelle pile représenté ci-contre donne une idée de la relative complexité de cette réhabilitation, dont le génie civil doit s'adapter en profondeur à la nouvelle configuration des vantelleries, laquelle génère entre autres transformations une complète redéfinition du mode de transmission des efforts issus des vannes vers le génie civil de l'ouvrage.

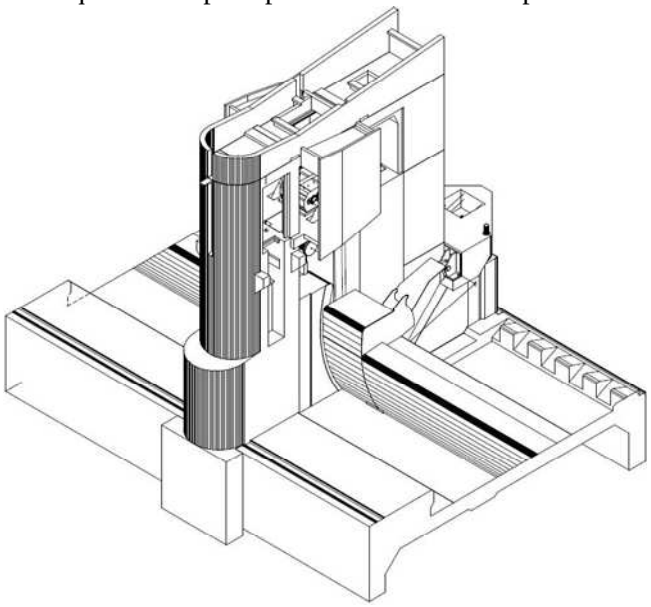


Figure 6 : Vue des nouvelles cabines de treuil

4. LES PERFORMANCES ATTENDUES DES NOUVELLES VANTELLERIES

On retrouvera avec les nouvelles vantelleries exactement le même mode de gestion hydraulique qu'actuellement, chacune des deux fonctions de base – régulation des débits courants d'une part et effacement à la crue d'autre part - étant dorénavant assurée par des vannes spécifiquement dédiées et adaptées à chacune d'elles.

4.1 Gestion des débits courants et régulation du bief par les clapets embarqués

Dans la nouvelle configuration, les débits courants seront entièrement gérés et régulés par surverse des clapets embarqués.

4.1.1 Déversement par surverse

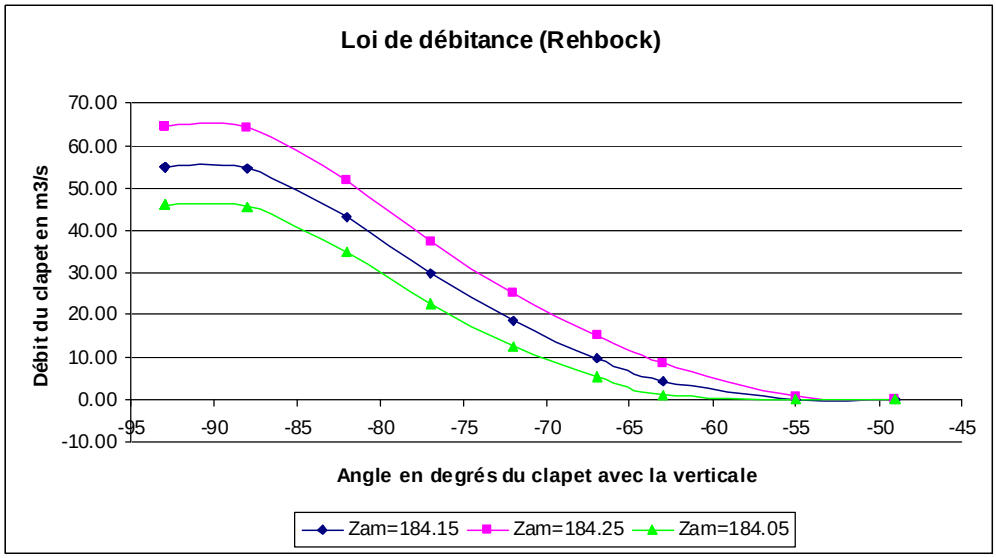
Lorsque la vanne secteur est fermée, la cote de l'axe de rotation du clapet est 183.1 m IGN69, celle de l'extrados du clapet en position abaissé est 183.25m IGN69. La partie utile du clapet, c'est-à-dire la partie faisant obstacle à l'écoulement mesure 1.90 m. Sur chaque vanne secteur sont disposée deux demi-clapets de longueur 14.5 m chacun, soit au total 29m de longueur déversante.
Le débit transitant en surverse au-dessus du clapet est régi par la formule classique de la forme :

$$Q = \mu S\sqrt{2gh} \quad \textbf{(1)}$$

Formule dans laquelle S est la section de la lame d'eau au-dessus du clapet, h la charge hydraulique et μ le coefficient de débit.

Parmi les lois couramment utilisées pour déterminer le coefficient de débit d'un seuil mince, nous avons opté pour les lois de SIAS et Rehbock pour le pré-dimensionnement hydraulique du clapet, lesquelles fournissent d'ailleurs des résultats sensiblement identiques dans leur domaine d'application respectif.
La configuration du clapet embarqué a été choisie en sorte que celui-ci soit constamment et franchement incliné dans le sens de l'écoulement, rappelant ainsi la configuration des vannes actuelles dont la forme est au demeurant très hydraulique. Ces formules permettent en définitive de tenir compte de l'orientation du clapet pour la détermination du débit de surverse.

Ainsi, pour un niveau amont imposé, la débitance attendue du clapet peut être calculée à partir de l'angle α que fait le clapet avec la verticale. Elle est donnée dans le graphe ci-dessous en fonction de cet angle α (compté négativement si le clapet est dans le sens de l'écoulement) :



Graphique 2 : *Loi de débitance (Rehbock)*

Ainsi, pour la RN fixée à 184.15 m IGN69, valeur cible de la plage de régulation, un clapet permettra de déverser de 0 à 55 m3/s . Corrélativement, cette plage est estimée à 0 à 65 m3/s pour une cote de régulation fixée à 184.25 m IGN69,

On voit par là que l'ensemble des trois clapets équipant le nouveau barrage permettront de réguler le niveau du bief amont de la Moselle à 184.15 m IGN69 pour des débits transitant par le barrage de 0 à 165 m3/s , ce qui correspond à des débits dans la Moselle de 0 à 315 m3/s compte tenu des 150 m3/s pouvant transiter par la microcentrale.

Il est en définitive montré que la gestion du nouveau barrage en surverse pourra être garantie 93% du temps, soit de l'ordre de 340 jours par an, performance au moins équivalente à celle qui prévaut avec le barrage actuel.

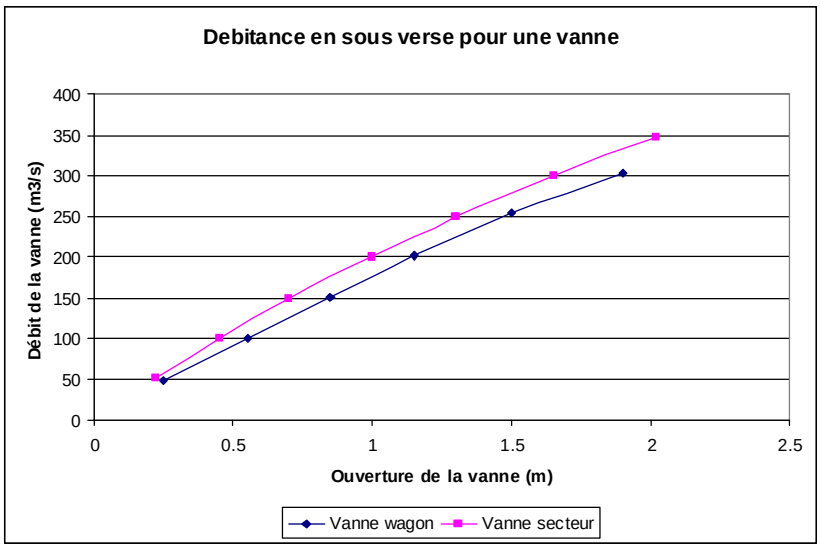
4.1.2 Déversement par sousverse

Le débit transitant en sousverse à travers une vanne segment est régi par une formule du même type que celle applicable à la vanne wagon de la forme:

$$Q = \mu S\sqrt{2gh} \qquad \textbf{(2)}$$

Formule dans laquelle S est la section mouillée dégagée par la vanne et h la dénivelée hydrostatique entre l'amont et l'aval.

Le coefficient de débit μ peut être déterminé par différentes méthodes, notamment à partir de l'abaque 181 du « l'hydraulique générale » de Lencastre. Tous calculs faits, on constate que la vanne secteur est tout aussi performante que la vanne wagon, voire un peu mieux. En effet, pour une même ouverture et dans les mêmes conditions, le débit transitant à travers la vanne secteur sera légèrement supérieur à celui transitant par une vanne wagon comme le montre le graphe suivant :



Graphique 3 : *Débitance en sous verse pour une vanne*

4.2 Les nouvelles conditions d'effacement du barrage en crue

Les modélisations hydrauliques du barrage actuel sur TELEMAC 2D ont montré que le débit n'est pas uniformément réparti entre les trois passes. Pour le débit d'effacement de 710 m3/s , les débits transitant par chacune des trois passes sont les suivants :

Passe Gauche	Passe Centrale	Passe Droite
215-220 m3/s	265-270 m3/s	220-225 m3/s

Tableau 2 : *Répartition des débits entre les trois passes*

Cette répartition montre que la passe centrale débite 15% à 20% de plus que les passes de rives et que, à quelques pour cent près, les 2 passes de rive laissent passer un débit équivalent.
Cette modélisation a également permis de retrouver par le calcul le débit d'effacement du barrage estimé à 710 m3/s .
La géométrie des passes restant inchangée, cette situation ne sera pas sensiblement modifiée après réhabilitation.

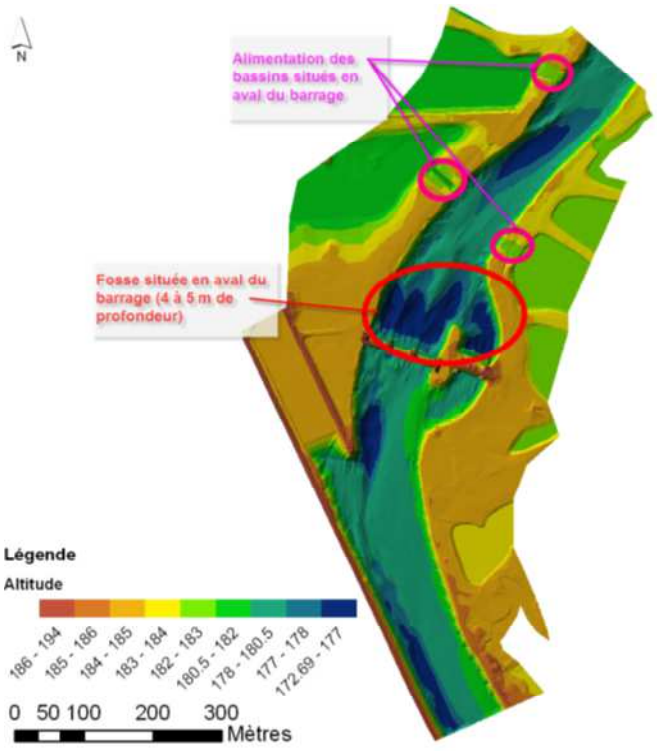


Figure 7 : *Bathymétrie utilisée pour la modélisation hydraulique*

4.3 Les nouvelles conditions de gestion des vannes

Si le mode de gestion des vannes du barrage actuel est aujourd'hui encore très contraint du fait de l'état de vétusté des vannes (une des 3 vannes est considérée aujourd'hui comme peu manipulable), le remplacement complet de l'ensemble des vantellerie permettra de retrouver un mode de gestion plus conforme aux règles habituelles, et en particulier plus conforme aux règles de gestion environnementales et durable, comme par exemple :

En période d'étiage, priorité donnée à la restitution des débits par les passes de rive pour faciliter la vie halieutique.

A l'inverse, en périodes de hautes eaux, priorité donnée à la restitution des débits par la passe centrale pour ménager les berges.

Le tableau suivant donne une idée de ce que pourront être les nouvelles règles de gestion des vannes, de l'étiage au débit d'effacement :

débit transitant par le barrage (m3/s)			<=50	70	120	165	240	315	428	540	625	710
	ouverture des vannes en cm	clapet	clapet relevé	clapet relevé	80°	85°						
		segment	abaissé	abaissé	abaissé	abaissé	50	60	90	100	110	125
		clapet	0	0	40	55						
vanne 1 passe centrale	débit (m3/s)	segment					132	154	216	234	252	276
	ouverture des vannes en cm	clapet	75°	78°	80°	85°	90°					
		segment	abaissé	abaissé	abaissé	abaissé	abaissé	35	45	70	90	110
		clapet	25	35	40	50	55					
vanne 2 rive gauche	débit	segment						83	104	153	187	219
	ouverture des vannes en cm	clapet	75°	78°	80°	85°	90°					
		segment	abaissé	abaissé	abaissé	abaissé	abaissé	35	45	70	90	110
		clapet	25	35	40	50	55					
vanne 3 rive droite	débit	segment						83	104	153	187	219

Tableau 3 : Gestion des vannes

5. L'ORGANISATION GENERALE DU CHANTIER

Deux entreprises cotraitantes réalisent les travaux : Bouygues Travaux Publics Régions France (mandataire) et Joseph Paris SA, et sont en charge du génie civil et de l'hydromécanique respectivement. Chacun des 2 domaines d'activité précités représente de l'ordre de 50% du montant total de l'opération, évalué à 14 millions d'euros.
Comme c'est souvent le cas sur les projets de barrage mobile, deux entreprises aux méthodes de travail, objectifs et cultures différentes doivent travailler ensemble à chaque étape de la réalisation de l'ouvrage afin de garantir sa qualité et sa durabilité, ainsi que la tenue des délais.

Les travaux en cours sur le barrage du Liegeot recèlent entre autres la particularité de ne concerner qu'une seule passe à la fois, les deux autres devant impérativement être laissées en état d'exploitation normale.

Il résulte de cet état de fait que le schéma classique de l'acte de construire ne fait plus seulement intervenir le triptyque maitre d'ouvrage – maitrise d'œuvre - entreprises puisqu'un quatrième intervenant en la personne de l'exploitant joue un rôle déterminant pour rappeler notamment les niveaux d'exigences requis par les contraintes de l'exploitation, lesquelles sont par nature variables et aléatoires puisqu'elles dépendent des conditions hydrologiques d'une part, et de l'ensemble des autres contraintes liées à la navigation d'autre part.

5.1 Saisonnalités et phasage des travaux résultant des conditions hydrologiques

Il a été déterminé au stade de la conception une période de chantier hydrologiquement favorable de six mois, de début avril à fin septembre. Le phasage qui en découle consiste à ne réaliser qu'une passe par an, ce qui permet de réguler le débit sur les deux autres passes. Cette courte période de six mois, récurrente dans les travaux fluviaux, ne laisse aucune marge de manœuvre quant à la gestion des délais, tant sur la réalisation des travaux que sur l'approvisionnement des équipements.
Les trois tranches de six mois de travaux se déroulent comme suit :

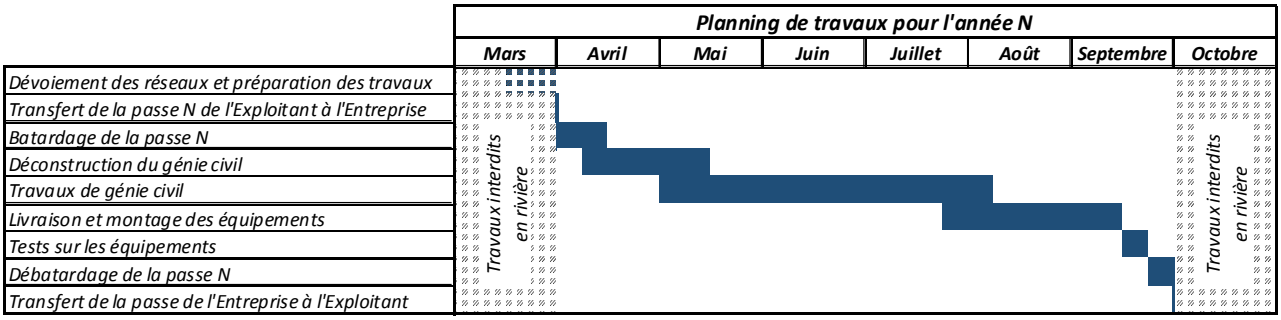


Figure 8 : *Planning synthétique de la remise à neuf d'une passe*

5.2 Moyens terrestres et fluviaux et matériel de levage

Le choix des moyens d'accès pour la réalisation des travaux ont été volontairement laissés libre aux Entreprises. Celles-ci ont opté pour une estacade sur pieux en amont immédiat du barrage afin de minimiser l'emploi de moyens fluviaux. Ces derniers ont tout de même été nécessaires pour la réalisation de cette estacade et le seront également pour la mise en œuvre des ducs d'Albe (tubes de diamètre 2000 mm destinés à protéger le barrage d'un choc de bateau venant de l'amont).



Photo 3 : *Levage du batardeau de chantier amont sur l'estacade réalisée par BYTPRF*

Très contrainte par le timing des opérations, l'Entreprise a choisi des moyens de levage exclusivement mobiles. Une grue automotrice télescopique d'une capacité de 400 t est utilisée pour la pose des batardeaux et des équipements lourds comme la vantellerie ou la passerelle. Pour les travaux courants, l'Entreprise utilise des grues à chenilles de type treillis 50 t. Enfin, une grue à chenilles de type treillis 110 t montée sur un ponton flottant est utilisée pour lever les ducs d'Albe et leur matériel de battage particulièrement lourds.



Photo 4 : *Vue générale de la première passe en début de travaux*

5.3 Interface entre les différents acteurs

Enfin, si l'Exploitant et le Maître de l'ouvrage - qui appartiennent à une même entité (Vois Navigables de France) – s'accordent sur l'objectif qualitatif, leurs points de vue peuvent être spécifiques, n'étant pas guidés par les mêmes enjeux.

Au final, le Maître d'œuvre se trouve à l'interface de tous ces acteurs et doit satisfaire les attentes des uns sans compromettre les impératifs des autres tout en restant arcbouté sur trois objectifs cardinaux communs à tous : la qualité de l'ouvrage fini, le respect des délais et le respect des coûts.

6. LES SUJETIONS D'EXPLOITATION PENDANT LA REALISATION DES TRAVAUX

6.1 Nécessité de maintien en exploitation des passes conservées durant la durée des travaux

Conséquence directe du choix de la réutilisation partielle du génie civil de l'ouvrage, les nouvelles passes doivent être construites à proximité immédiate des passes en exploitation. Cette proximité est à son paroxysme au niveau des piles où la moitié du génie civil et des équipements doit être déconstruite puis reconstruite, pendant que les anciens organes de manœuvre situés sur l'autre moitié continuent de réguler le plan d'eau.

6.2 Bilan des contraintes résultant du maintien du service pendant les travaux

D'une manière générale, tous les travaux effectués à proximité d'une structure existante impliquent des contraintes supplémentaires d'accès, de mise en œuvre et de protection de l'existant. Sur le chantier du Liegeot, les principales contraintes dues au maintien en exploitation de deux passes durant les travaux se concentrent au niveau des piles. En effet, elles sont à l'interface de deux passes et leur conception exiguë rend la dissociation des organes de manœuvre complexe. Ainsi, durant la première année de travaux, les organes de la deuxième passe doivent être protégés et maintenus en état de marche, tandis que les travaux de génie civil et d'électromécanique de la première passe doivent être réalisés dans un espace très restreint.
Durant la deuxième année de travaux, ce sont les nouveaux organes de manœuvre et le nouveau génie civil de la pile qui doivent être protégés pendant la réalisation des travaux relatifs à la deuxième passe et à ses organes de manœuvre, là encore dans un volume particulièrement petit.
A toutes ces contraintes au niveau de la superstructure s'ajoute une contrainte d'ordre structurel. La pile étant soumise à des efforts dissymétriques tant pendant les travaux qu'entre deux années de travaux (efforts de vanne et poussée hydrostatique différents d'un côté et de l'autre de la pile), sa stabilité ne serait plus garantie si des renforcements spécifiques (sous forme de micropieux verticaux et inclinés, de barres précontraintes scellées dans le béton existant) n'avaient pas été prévues pour assurer les différentes conditions d'équilibre de la pile (EQU) ou sa défaillance interne (STR).

6.3 Principe retenu d'une réception partielle des travaux par passes à l'issue de chaque saison hydrologique

Le marché de travaux est composé d'une tranche ferme (passe n°1) et de 2 tranches conditionnelles correspondant à la rénovation des passes n°2 et n°3. Ainsi, chaque passe est traitée dans un cadre contractuel autonome. Lorsque les travaux d'une tranche commencent, la passe concernée est batardée et l'Entreprise en prend complète possession jusqu'à finalisation des travaux, cette prise de possession étant contractualisée par constat. La passe en travaux n'est finalement restituée à l'Exploitant qu'après réception complète. On peut donc dire que le marché de rénovation est découpé en autant de « sous-marchés » que de passes à rénover.
Pendant les travaux, l'Entreprise est ainsi presque « chez elle » dans la passe en travaux tandis que l'Exploitant reste « chez lui » pour la gestion des deux autres passes. **Ainsi, chaque acteur reste responsable de la partie d'ouvrage sur laquelle il travaille.**
Seul l'accès à ces parties d'ouvrage est commun aux différents acteurs.



***Photo 5:** Déconstruction de la vanne existante après que l'Entreprise ait pris possession de la passe*

6.4 Aspects contrôle-commande

La sûreté de fonctionnement est un point clé de la conception. Des évènements redoutés très variés sont pris en compte, parmi ceux-ci : outre les défaillances, on notera les incendies, un ordre intempestif d'ouverture, un niveau d'eau anormal, etc… En outre, l'Exploitant souhaite une mise en cohérence complète des contrôles commandes des treize ouvrages qu'il opère sur la Moselle.

La commande possède une organisation hiérarchisée avec un chef d'orchestre pour l'ensemble du barrage - l'armoire barrage - ; c'est elle qui répartit les débits à évacuer entre les passes disponibles et concentre tous les paramètres du barrage pour les mettre à disposition de la supervision.
En fonctionnement automatique, l'armoire barrage envoie ses ordres de fonctionnement à l'armoire locale. Il en existe autant que de passes. Elle permet de gérer localement les plus importantes sécurités (surcourse, crantage,…). Les armoires locales peuvent fonctionner de manière autonome ; en outre elles peuvent être alimentées par deux sources d'énergie et deux circuits d'alimentation électrique séparés physiquement.

La segmentation du chantier dans le temps et dans l'espace en autant de périodes distinctes que de configurations pendant lesquelles 2 passes à minima sur trois doivent rester opérationnelles pendant les phases actives de travaux s'applique de plein fouet au chantier des équipements électriques et de contrôle-commande.

L'ancien contrôle commande se trouvant dans la pile concernée par la dernière tranche de travaux, celui-ci sera conservé pendant les deux premières tranches. Le nouveau contrôle commande est installé dès la première tranche de travaux. Il prendra alors en charge la régulation de niveaux du bief tandis que les anciennes passes sont commandées manuellement. L'architecture électrique permet, à chaque phase, la connexion d'une nouvelle passe au nouveau contrôle-commande tandis que cette même passe est inhibée de l'ancien système. Ainsi, le phasage de travaux a contribué à l'implantation des différentes armoires en vue de simplifier la gestion de la commande pendant les phases de travaux.

6.5 Quelques aspects relatifs à la gestion des déchets de chantier

Le chantier du Liegeot comporte une importante part de démolition qui génère des déchets inertes, ainsi que des déchets industriels banals et dangereux. La gestion des déchets a été prévue par le titulaire du marché dès le stade de l'offre. Ainsi, celui-ci a estimé que les travaux de démolition allaient générer environ 350 tonnes de métaux, 5 tonnes de DIB et 90 t de déchets dangereux. Les métaux sont récupérés par un ferrailleur pour être fondus, tandis que les déchets industriels banals sont triés pour être valorisés. Quant aux déchets dangereux prévus par l'Entreprise, ce sont les pièces de métallerie susceptibles de contenir de l'amiante qui étaient prévus d'être traités par une entreprise spécialisée (stockage en classe 1). Par chance, les tests menés lors de la période de préparation ont révélé que le barrage ne contenait pas d'amiante, ce qui a grandement simplifié la gestion du chantier sur cet aspect.
Lors de la phase chantier, le système de gestion des déchets est suivi de près par l'Entreprise et la Maîtrise d'œuvre afin de s'assurer de l'application du SOGED dans ce milieu aquatique particulièrement sensible aux pollutions diverses.

7. CONCLUSIONS

Le projet de rénovation complète du barrage du Liegeot – actuellement en cours de réalisation – constitue ainsi un cas quelque peu atypique en regard des nombreux barrages de navigation reconstruits par Voies Navigables de France ces 20 dernières années et qui, dans la très grande majorité des cas, ont consisté en une reconstruction ex nihilo d'ouvrages neufs.
Ce pari - que l'on peut qualifier de hardi - a été pris moyennant il est vrai des travaux d'adaptation conséquents sur le génie civil qui, bien que maintenu et sauvegardé pour ce qui est des principaux éléments porteurs (radier, piles et culées), a requis néanmoins des modifications substantielles d'adaptation aux nouvelles vantelleries et plus précisément au nouveau mode de transmission des charges complètement différent de celui prévu à l'origine.

Difficultés techniques liées à des reprises en sous-œuvre à la fois profondes quant à l'importance des travaux et fines quant au degré de précision requis, enjeux forts sur le timing qui impose à l'entreprise de livrer « pile à l'heure » une passe entièrement remise à neuf en complet ordre de marche, difficultés de cohabitation avec un ouvrage partiellement maintenu en exploitation pendant toute la période des travaux, l'ensemble de ces contraintes et sujétions lourdes requièrent avant tout de pouvoir disposer d'un projet précis complet et très abouti, d'un marché de travaux bien rédigé et parfaitement clair, et bien sur, de pouvoir compter sur des Entreprises fiables et de grandes qualités, tant sur le plan du management, de l'organisation, du respect des délais que sur le plan de la bonne exécution des travaux proprement dits.

REMERCIEMENTS

Nous remercions l'ensemble de l'équipe de la maitrise d'ouvrage de Voies Navigables de France - Direction Territoriale du Nord-Est de VNF, Arrondissement Etudes et Grands Travaux, ainsi que les représentants de l'Exploitation - DTNE - Unité Territoriale d'Itinéraire Moselle pour le soutien apporté à l'écriture de cet article.
Nous remercions aussi l'ensemble des ingénieurs et techniciens de l'équipe de maitrise d'œuvre de BRL et ISM Ingénierie pour leur contribution à cet article.

RECONSTRUCTION DES BARRAGES DE COUDRAY ET DE VIVES EAUX VANTELLERIE ET CONTROLE COMMANDE

Reconstruction of Coudray and Vives Eaux dams Gates and control system

Laurent VIDAL
ARTELIA EAU ET ENVIRONNEMENT, 6 rue de Lorraine, 38130 Echirolles
laurent.vidal@arteliagroup.com

Pierrick LACHERE, Etienne BOUCHEZ, Sébastien SOUDAIN
DUCROCQ INGENIERIE PROCESS, ZA d'Ecuires, 62170 Montreuil sur mer
contact@ducrocq-ingenierie-process.com

MOTS CLÉS

Clapet, ventre de poisson, vérin, passe à poisson, bouchure flottante, disposition constructive, montage, modèle réduit

RÉSUMÉ

Reconstruction des barrages de coudray et de vives eaux – vantellerie et contrôle commande
Situés en amont de Paris, les barrages de Coudray-Montceaux et de Vives Eaux assurent le maintien des niveaux de la Seine notamment pour la navigation. Leur reconstruction fait partie du programme de réhabilitation des ouvrages sur la Seine à l'amont de Paris lancé il y a plusieurs années par Voies Navigables de France (VNF). qui assure la maîtrise d'ouvrage de ce projet.
Les anciens barrages à hausses Aubert dont les manœuvres étaient devenues trop complexes à cause de leur vétusté sont remplacés par des barrages à clapets mobiles.
En 2012, le barrage de Coudray a été mis en service après près de 5 ans d'études, et 5 ans de chantier. Il est équipé de 2 clapets identiques de 34m par 7 m et d'un clapet plus petit de 13 m par 7m.
Le nouveau barrage de Vives Eaux est en cours de construction. Le premier clapet a été posé et testé en novembre 2014. A terme, le barrage sera équipé de 3 clapets identiques de 30 m par 6m.
L'article propose de présenter le déroulement des projets, depuis les études d'avant-projet jusqu'aux phases de réception.
L'article portera sur les points suivants :

- *L'historique des projets*
- *La description des ouvrages et des équipements*
- *Les dispositions constructives des clapets*
- *Le montage des clapets*
- *La gestion de l'aménagement pendant la phase de travaux*
- *Etude sur modèle physique du clapet de Coudray*

ABSTRACT

Located upstream to Paris, Coudray-Montceaux and Vives Eaux dams permit to control the water levels of the Seine River, particularly in order to insure the navigation. Their reconstructions are part of the global rehabilitation project of the old hydraulic amenagements on the upstream part of the Seine River launched several years ago by "Voies Navigables de France". The old dams with Aubert's shutters, whose operations had become too complex because of its obsolescence, are replaced by a navigable dam with flap gates. Coudray dam was commissioned in 2012 after almost 5 years of studies and 5 years of construction work. Two identical flap gates, 34m long and 7m high and one smaller flap gate 13m long are installed. The new Vives Eaux dam is currently under construction. The first flap gate was installed and tested on November 2014. The dam will be equipped with three identical flap gates 30m long and 6 m high. The present article tends to present the project process, from the preliminary study to the commissioning tests.

1. INTRODUCTION

Situés en amont de Paris, les barrages de Coudray-Montceaux et de Vives Eaux assurent le maintien des niveaux de la Seine notamment pour la navigation. Leur reconstruction fait partie du programme de réhabilitation des ouvrages sur la Seine à l'amont de Paris lancé il y a plusieurs années par les Voies Navigables de France (VNF) qui assure la maîtrise d'ouvrage de ces projets.
ARTELIA a réalisé les études amont, depuis le diagnostique des ouvrages existants jusqu'à la préparation des Documents de Consultations des Entreprises pour ces deux barrages. Pour la reconstruction du barrage de Coudray, ARTELIA a réalisé une assistance à Maitrise d'œuvre pour le compte de VNF. Pour la reconstruction du barrage de Vives Eaux, ARTELIA a réalisé la Maitrise d'œuvre.
Pour les deux barrages, l'entreprise EMCC à réalisé les travaux. Les clapets ont été réalisés par l'entreprise DIP Ducrocq Ingénieurie Process.
L'article propose de présenter certains aspects particuliers de ces projets relatifs aux équipements de vantellerie et de contrôle commande, depuis les études d'avant-projet jusqu'aux phases de réception.

2. HISTORIQUE - CHOIX DE LA RECONSTRUCTION

Les anciens aménagements de Coudray-Montceaux et de Vives Eaux étaient composés des principaux éléments suivants :

- Un barrage d'une seule passe de 84 m de long situé entre deux écluses (barrage de classe C) dans le cas de Coudray et un barrage de 88.50m de long réparti en deux passes ; 64.50m en rive droite et 24m en rive gauche dans le cas de Vives Eaux.
- La bouchure des barrages est réalisée par 42 hausses de type « Aubert » de 6.33x2.00m dans le cas de Coudray et de 43 + 16 hausses dans le cas de Vives Eaux.
- Un chariot se déplaçant sur la passerelle permet la manœuvre des hausses par un bras métallique
- Une passerelle piétonne permettant le passage sur la Seine
- Deux écluses de part et d'autre du barrage dans le cas de Coudray et situées en rive gauche dans le cas de Vives Eaux.

Ces anciens aménagements ont été mis en service vers 1964 pour Coudray et en 1929 pour Vives Eaux.
Le système de hausses Aubert a affiché des signes de vétusté dans le temps. Ainsi la complexité des manœuvres non automatisées, les difficultés de maintenance et les nombreux dysfonctionnements de l'ouvrage liés à sa vétusté, commençaient à nuire à l'exploitation du barrage pour réguler le bief situé à l'amont du barrage.
De plus, la dégradation des maçonneries des piles et des bajoyers de l'ouvrage et le fait qu'ils n'étaient pas équipés d'un dispositif de franchissement piscicole ont conduit à une reconstruction complète des ouvrages.
A partir de 1965, un important programme général de développement de la voie navigable est lancé. Dans ce cadre, les barrages de La Cave, Champagne sur Seine et Varenne sur Seine sont construits et équipés de 2 ou 3 clapets de 30m de large.
Les aménagements de Coudray et de Vives Eaux étaient ainsi les derniers de la Seine amont à ne pas être automatisés et équipés de clapets.
Les études de la reconstruction, lancées en 2005 pour Coudray et en 2006 par Voies Navigables de France (VNF), avaient comme objectifs l'amélioration : des conditions de travail, de la sécurité du personnel d'exploitation et de maintenance, du maintien du plan d'eau et de la gestion de la ressource en eau.
Les avantages de la reconstruction des ouvrages et de la l'installation de clapet sont les suivants :

- Régulation fine du niveau amont (même pour les petits débits)
- Écoulement par surverse laissant passer les corps flottants
- Type de vanne fiable et nécessitant peu d'interventions
- Solution homogène avec les barrages environnants de la Seine amont : permettant une facilité d'installation, d'exploitation et de maintenance pour VNF
- Effacement total du barrage en cas de crue

3. DESCRIPTION DES OUVRAGES ET DES EQUIPEMENTS

3.1 General

Les ouvrages de Coudray et de Vives Eaux sont des barrages de régulation situés sur la Seine amont. Ils barrent la Seine sur une largeur de 84m pour Coudray et de 96m pour Vives Eaux. Ils sont installés en parallèle d'écluses qui assurent la circulation des péniches. Une passerelle publique surplombe les ouvrages et assure la liaison entre la rive droite et la rive gauche. Une passe à poisson permet la montaison des espèces.

3.2 Clapets

Le tableau ci-dessous présente les principales caractéristiques des clapets :

	Coudray		**Vives Eaux**
Nombre	2	1	3
Largeur des passes	34.20m	14.10m	30.20m
Charge amont	5.97m		4.78
Chute	3.21m		2.71

***Tableau 1** : Principales caractéristiques des clapets*

La largeur des passes sur le barrage de Coudray a été dictée par la contrainte de navigabilité des deux passes principales en crue qui impose une largeur supérieure à 32m. L'emprise disponible restante a conduit à la réalisation d'une troisième passe plus petite de 14m.
Sur le barrage de Vives Eaux, la contrainte de navigabilité des passes n'a finalement pas été retenue par VNF, la navigabilité n'est en effet possible que 5 à 20 jours par an. Cette décision permet de limiter la largeur des passes à 30m afin de bénéficier d'une largeur de passe homogène avec les autres ouvrages de la Seine amont et de pouvoir ainsi profiter d'une bouchure de maintenance commune à ces ouvrages.

3.3 Organes de manœuvre

Chacun des grands clapets est manœuvré par deux vérins identiques, situés sur les piles du barrage.
Le clapet de 14.10 m de Coudray est lui manœuvré par un unique vérin, identique à ceux des grands clapets
Deux centrales hydrauliques sont installées pour la manœuvre des trois clapets.

- Une première centrale, installée en rive droite, est dédiée à deux clapets
- Une seconde, installée en rive gauche, est dédiée au troisième clapet

La centrale hydraulique rive droite dédiée à deux clapets est prévue pour manœuvrer un seul clapet à la fois.
Une tuyauterie de liaison entre les deux centrales hydrauliques est mise en place. Le robinet d'isolement ouvert manuellement permet le secours d'une centrale vers l'autre. Les deux centrales hydrauliques sont donc identiques.
En mode dégradé, la manœuvre du clapet avec un seul vérin est possible, le second étant hors service.

Le tableau ci-dessous présente les principales caractéristiques des vérins :

	Coudray	Vives Eaux
Pression maximum	250bar	250bar
Course	7.30m	6.20m
Capteurs de position	Codeur absolu à câble type SDEM	Codeur absolu à câble type SDEM
Fin de courses	Sur tige de recopie : bas, haut, très haut	Intégré au corps du vérin : bas et haut

***Tableau 2** : Principales caractéristiques des organes de manœuvre*

3.4 Passe à poisson

Les ouvrages de Coudray et Vives Eaux intègrent chacun une passe à poisson pour la montaison. Il s'agit de passes à bassins successifs. Au Coudray, cette passe est située en rive gauche, le long du bajoyer de la petite écluse, coté Seine. A Vives Eaux, elle est implantée en rive droite du barrage.

La passe à poisson comporte 14 bassins successifs à Coudray contre 12 à Vives Eaux.

Pour les deux barrages, les passes à poissons comportent les équipements suivants :

- Prise d'eau protégée contre les corps flottants par une grille amovible verticale à barreaux, parallèle à l'axe de la Seine. Les barreaux métalliques présentent un entrefer de 0,20 m.
- Un batardeau peut être inséré dans les rainures de la grille pour la maintenance
- Une vanne porte permet l'obturation de la passe à poisson. Elle est utilisée pour isoler la passe lors des maintenances.
- Coté aval, une vanne de régulation crée une chute constante entre le dernier bassin aval et la Seine. Cette vanne fonctionne en surverse. Elle est motorisée et asservie au niveau en Seine.

Le débit d'attrait est de 5m3/s, soit environ 10% du débit d'étiage de la Seine. Le dispositif assurant le débit d'attrait comporte les équipements suivants :

- Deux batardeaux
- Deux grilles d'entrefer 20mm équipées de dégrilleur à chaine
- Deux vannes murales de régulation
- Quatre grilles entre le bassin de dissipation et le bassin. Ces grilles sont motorisées afin de pivoter sur un axe vertical et ainsi faire un demi-tour de façon à être nettoyées à contre-courant.

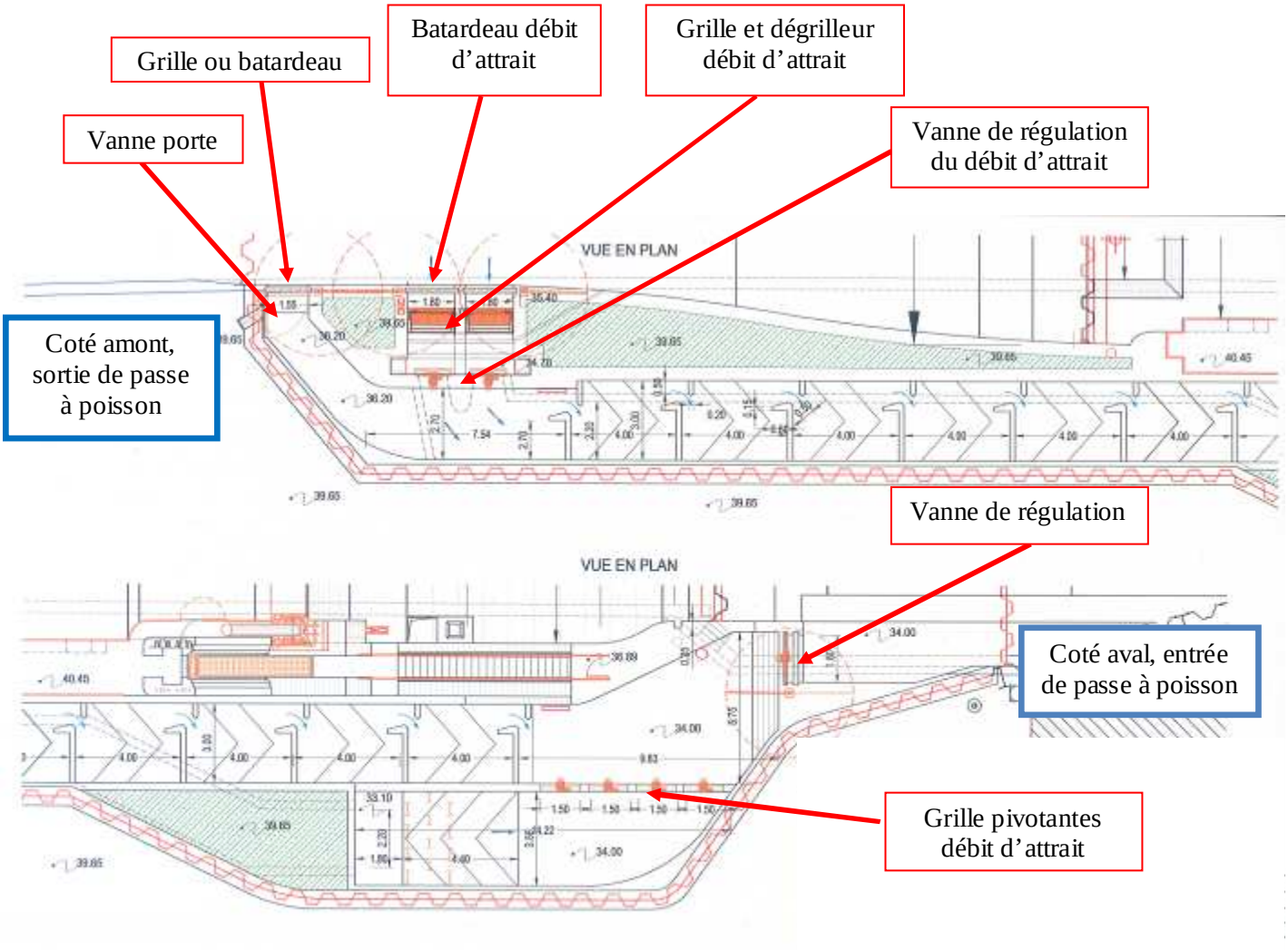


Figure 1 : Schéma passe à poisson



Figure 2 : *Dégrilleur du débit d'attrait de la passe à poisson, Vanne d'isolement de la passe à poisson et Vue coté amont de la passe à poisson ; vanne de régulation et grilles rotatives du débit d'attrait*

3.5 Bouchure de maintenance amont

Le batardage des passes pour maintenance est réalisé par des bouchures amenées par flottaison et coulées en place. Ce dispositif, déjà utilisé pour les autres barrages de la Seine amont permet le batardage en l'absence de superstructure de manutention.
Le batardeau est constitué par un platelage métallique raidi par des nervures soudées sous sa face inférieure et qui prend appui sur deux caissons longitudinaux de forme cylindrique de 1,5 m de diamètre environ. Ces caissons longitudinaux sont compartimentés par des cloisons transversales. Les compartiments du caisson destinés à être immergés sont munis de vannes et de tuyauteries de remplissage/vidange.
Pour sa mise en place, le batardeau est amené par flottaison au moyen de remorqueurs. Lorsque le batardeau est en contact avec le redent servant de roulement au galet de guidage, les tiges de vérins sont sorties de façon à permettre leur fixation sur les attaches des piles.
Dans la cadre de la reconstruction du barrage de Coudray, deux bouchures de 34.20 et de 14.10m de large ont été réalisées. Dans la cadre de la reconstruction du barrage de Vives Eaux, la bouchure de la Cave, un autre ouvrage de la Seine amont dont la largeur des passes est identique, sera réhabilité.

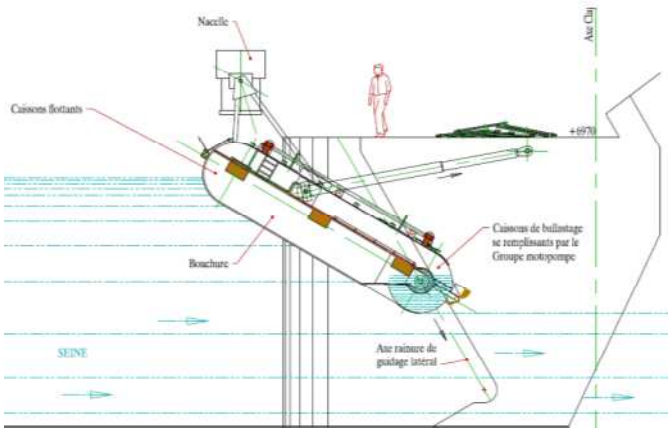


Figure 3 : *Coupe schématique de mise en place de la bouchure amont*

3.6 Bouchure de maintenance aval

Le batardeau aval est constitué de poutres en aluminium empilées horizontalement entre des potelets métalliques. Les poutrelles reposent sur un seuil constitué d'un profilé en acier scellé dans le béton du radier. Les potelets sont insérés dans des réservations prévues à cet effet dans le radier. En temps normal, les réservations sont obstruées par un bouchon béton amovible. La mise en place du batardeau aval nécessite l'intervention d'une grue sur barge et de plongeurs.
Il est prévu d'utiliser les mêmes éléments de batardeau à Coudray et à Vives Eaux. Des éléments de jonction seront prévus pour le barrage de Vives Eaux afin de s'adapter à la largeur des passes, qui sont différentes de celles du barrage de Coudray.

4. DISPOSITIONS CONSTRUCTIVE DES CLAPETS

5.1 Conception générale d'un barrage à clapet

Contrairement aux ouvrages levants traditionnels, l'utilisation d'une vanne clapet permet une intégration plus discrète. En effet le clapet offre un espace libre sur toute sa largeur, les organes de manœuvres étant aux extrémités. De plus, la régulation par un ouvrage déversant est plus précise et apporte une souplesse dans la gestion hydraulique, en laissant passer les embâcles et en offrant la possibilité de rendre la passe navigable après effacement du clapet en fond de passe.
Néanmoins, il existe des contraintes de réalisation importantes, de par la complexité dans la construction du Génie Civil, et la précision de mise en œuvre des dispositifs mécaniques.

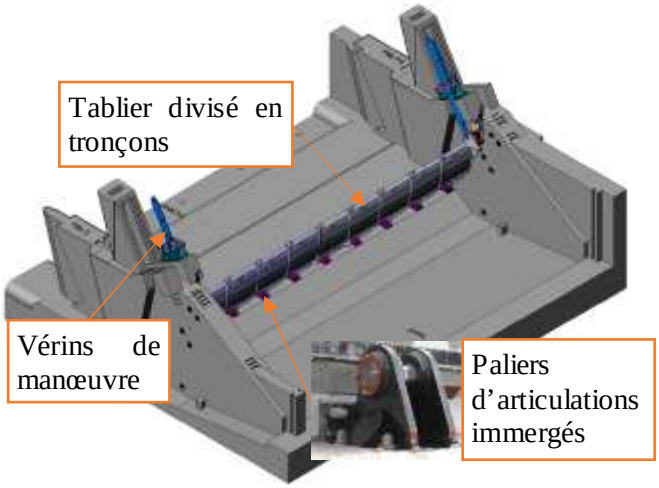


Figure 4 : *Modèle 3D d'une passe du barrage de Vives-Eaux*

Ci-dessus, un modèle d'une passe du barrage de Vives-Eaux. La conception 3D permet de s'assurer de la bonne cinématique des différents ensembles et de prévoir ainsi les éventuelles interférences lors des mouvements de fonctionnement.

5.2 Pourquoi un assemblage boulonné ?

Afin de simplifier la manutention du tablier au cours des différentes phases de réalisation et de montage, celui-ci est découpé en 4 parties, de masses et de dimensions sensiblement équivalentes. Des boulons et des axes de cisaillement viendront ensuite liaisonner l'ensemble pour former un tablier. La boulonnerie des brides est serrée au couple et est de type HR (Haute Résistance). Entre chacun des tronçons, sur chaque plan de pose un cordon d'étanchéité a été mis en œuvre en périphérie.
Pour des raisons de tenue mécanique, la découpe en tronçons du tablier ne doit pas être symétrique, la plus forte contrainte du tablier en fonctionnement normal se situant sur le plan de symétrie de la passe, le plan de joint doit en être éloigné. C'est pour cela que la découpe est exécutée comme sur le schéma ci-dessous. A savoir que le clapet est dimensionné structurellement de manière à pouvoir être manœuvré par un seul des deux vérins hydrauliques. Cette combinaison apporte une importante sollicitation structurelle et dimensionnante.

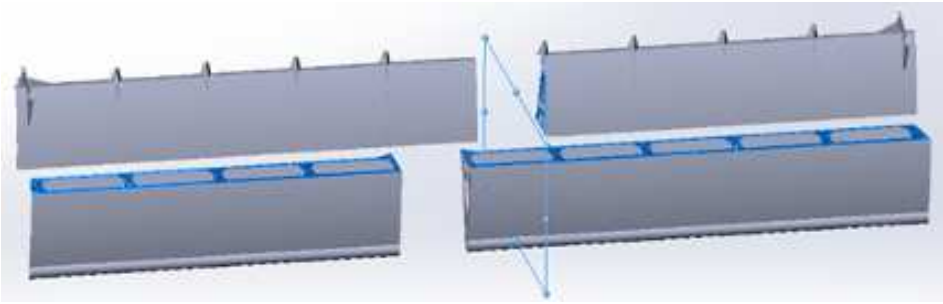


Figure 5 : *Découpe en tronçons par rapport au plan de symétrie de la passe*

5.3 Nombres clés

Nombres clefs	**Vives-eaux**	**Coudray-Montceaux**
Largeur de passe	30,2 m	34,2 m
Retenue d'eau	4,8 m	6 m
Nombre de paliers	10	12
Epaisseur de la tôle de bordé	15	15
Epaisseur des raidisseurs	15	15
Masse du tablier	63 T	117 T
Masse maxi d'un tronçon	19 T	34 T
Flèche maximale	3,4 cm	2,2 cm
Nombre de boulons de liaison	534 boulons classe 10.9	900 boulons classe 8.8
Effort de manœuvre maximal	300 T	400 T
Vérins	Ø480x180 Course 6,2 m	Ø480x170 Course 7,3 m

Tableau 3 *: Nombres clefs des deux barrages.*

Les normes de calculs applicables ont évolué entre les barrages de Coudray-Montceaux en 2007 et Vives-eaux en 2013 (entrée en vigueur des Eurocodes), par conséquence, le nombre et la classe des boulons utilisés pour liaisonner les tronçons de clapets sont différents.

D'autre part, le « fascicule 66 : exécution des ouvrages à ossature en acier » est la principale référence pour l'exécution des travaux et la qualité des matériaux. Il impose par exemple, un acier certifié NF et l'usage de boulonnerie à serrage contrôlé pour les ensembles structurels.

La différence de masse des tabliers entre les deux barrages s'explique, d'une part par la différence de dimension et d'autre part par l'optimisation de la conception. L'objectif principal lors de la conception est toujours l'optimisation du temps de fabrication, par la diminution des épaisseurs des cordons de soudures et par la simplicité des pièces à réaliser. La diffusion des contraintes dans les assemblages a également été optimisée par le calcul, permettant ainsi de diminuer la masse d'acier à mettre en œuvre.

5.4 Processus de fabrication

Ci-après, une illustration du processus de fabrication d'un tablier de clapet. La réalisation d'une telle structure nécessite un atelier de grandes dimensions avec les moyens de levage adaptés à la masse des différents tronçons.

Découpe en tronçons par rapport au plan de symétrie de la passe

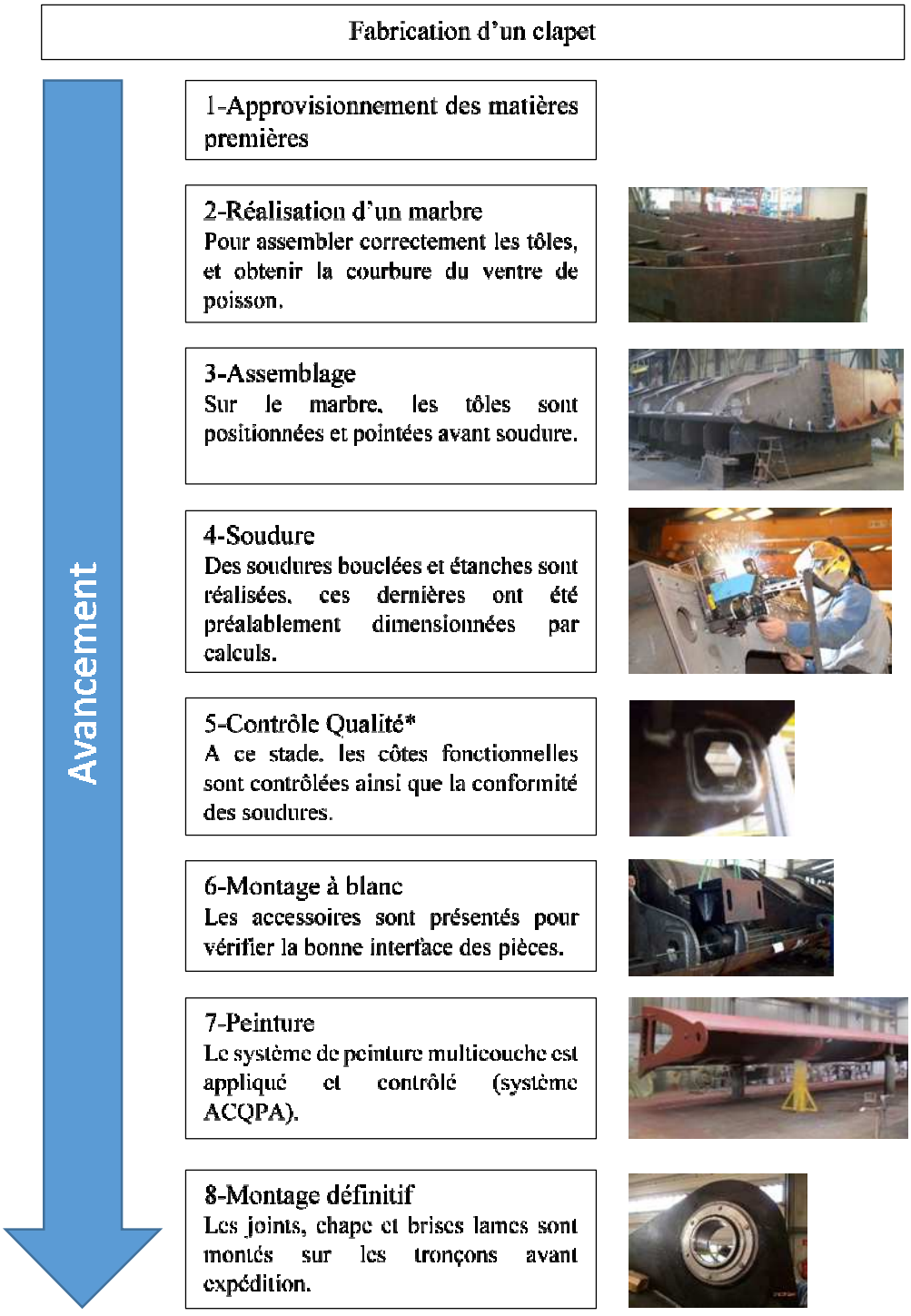


Figure 6 : Processus de fabrication

* Lors du contrôle qualité, une superposition des côtes réelles de fabrication du clapet avec celles du génie civil en cours de construction est réalisée. Cela permet de d'assurer de la bonne réalisation de l'ouvrage, ou le cas échéant, d'apporter les corrections nécessaires.

6. MONTAGE

6.1 Pièces fixes

Dans une opération de construction, la pose débute par les pièces fixes, depuis le radier vers les élévations.
Les pièces fixes sont constituées d'une part par les paliers d'articulation du clapet, et d'autre part par les châssis supports des vérins et des systèmes de verrouillage.
Les paliers sont équipés de tiges d'ancrage précontraintes, destinées à être scellées dans le béton. Ces pièces sont implantées par des monteurs expérimentés avec des outillages adaptés (gabarits, cordes à piano) sous couvert d'un expert géomètre.

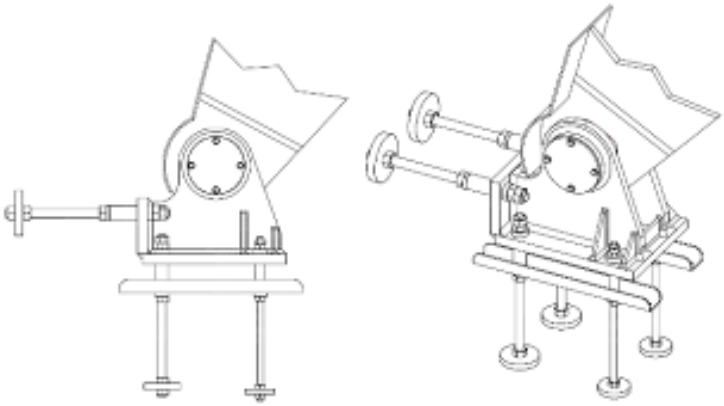


Figure 7 : *Représentation d'un palier d'articulation*

Après scellement des pièces fixes, les paliers et chevêtre sont fixés et réglés. Les axes théoriques des paliers doivent être parfaitement alignés entre eux. Cet alignement est possible grâce à des gabarits permettant de positionner tous les paliers dans la même configuration. Une attention particulière est apportée lors de cette phase pour laquelle les tolérances de montage sont de l'ordre du millimètre.



Figure 8 : *Mise en place des paliers d'articulation*

6.2 Transport

Les différents tronçons de clapet sont livrés par voie routière. Ceux-ci étant de grandes dimensions (18,7 x 4,1 x 2,6 m pour le plus grand, pour une masse d'environ 33 T), ils sont de ce fait transportés par convois exceptionnels de catégorie 3 (1 véhicule pilote + 1 voiture de protection à l'arrière).



Figure 9 : *Transport d'un tronçon de clapet du Coudray-Montceaux*

Des berceaux sont utilisés afin de maintenir les tronçons sur la remorque. Ces berceaux sont faits sur mesure pour s'adapter à la forme du tronçon.

A l'arrivée sur site, les tronçons sont déchargés et posés sur une barge (cette dernière étant équipée d'une grue). Cette barge achemine alors les tronçons jusqu'au barrage et les décharge dans la passe batardée à l'aide de la même grue.



Figure 10 : *Acheminement d'un tronçon de clapet par grue sur barge*

6.3 Phasage

6.3.1 Méthodologie de pose



Figure 11 : Processus de pose sur site

6.3.2 Outillage spécifique

La distance importante entre la barge supportant la grue et les paliers des clapets ne rendait pas possible une pose des clapets directement à l'aide de la grue. Les éléments de clapet ont donc été déposés à l'intérieur de l'enceinte du batardeau de chantier, puis repris par un outillage de translation spécifique.

Sur le barrage du Coudray-Montceaux, un accès depuis l'aval de la passe était disponible. Un système de rampes avec ripeurs (gérés hydrauliquement par une centrale hydraulique) a été mis en place afin de pouvoir approcher le tronçon jusqu'à sa position, puis l'incliner pour pouvoir mettre en place les axes de rotation.

Quant au barrage de Vives-Eaux, sur lequel un accès depuis l'amont de la passe était disponible, c'est cette fois un portique (équipé de quatre treuils de levage) qui a permis de lever et déplacer les tronçons.

L'inclinaison a, quant à elle, été gérée grâce aux treuils. L'image ci-dessous représente les deux systèmes de positionnement.

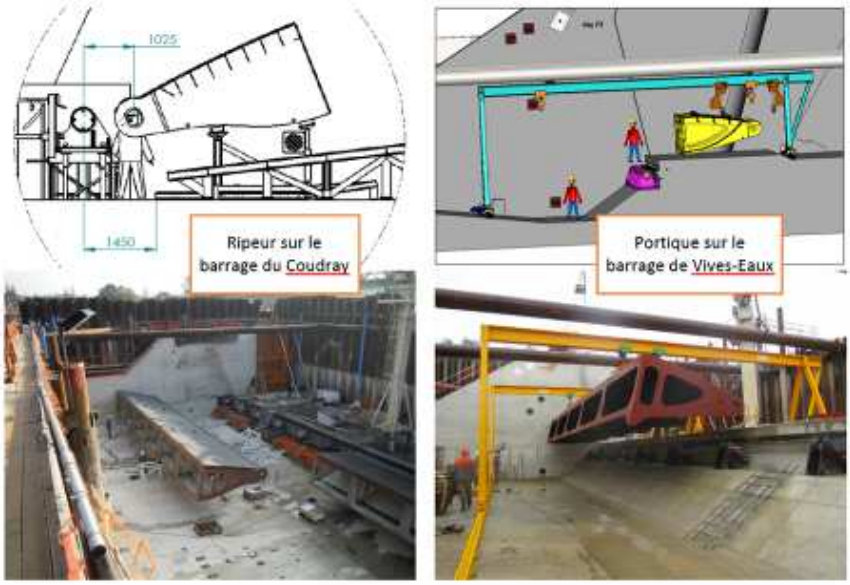


Figure 12 : *Systèmes de translation des clapets du Coudray et de Vives-Eaux*

6.4 Essais

Avant une mise en service du barrage, des essais préalables sont nécessaires afin de vérifier et valider le fonctionnement de l'ensemble. L'ensemble de ces essais est retranscrit dans un rapport détaillé.

6.4.1 Essais à sec

Tout d'abord, une série d'essais à sec est réalisée. Ces essais ont pour but de vérifier notamment :

- la cinématique générale (absence de points durs),
- le bon contact des joints d'étanchéité,
- le bon fonctionnement des organes de manœuvre (absence de fuites d'huile),
- le bon fonctionnement des accessoires (verrous, …).

6.4.2 Essais en eau

Après mise en eau du barrage, une nouvelle série d'essais est effectuée, cette fois en situation réelle. Ces essais consistent notamment à :

- vérifier le fonctionnement général (absence de points durs),
- vérifier l'étanchéité (contrôle des débits de fuite),
- vérifier les efforts de manœuvre,
- vérifier la flèche (déformation du tablier sous charge, avec le clapet retenu par deux vérins, puis par un seul),
- essayer les verrous.

Une fois l'ensemble de ces essais validé, la passe peut alors être réceptionnée partiellement (pour ce qui concerne la vantellerie) et remise à l'exploitant.

6. GESTION DE L'AMENAGEMENT PENDANT LES PHASES DE TRAVAUX

6.1 Planning

Le planning de chantier pour les deux ouvrages est essentiellement contraint par la nécessité de réaliser les travaux en Seine pendant les six mois d'été uniquement. En effet, entre les mois d'octobre et mai aucun obstacle (comme

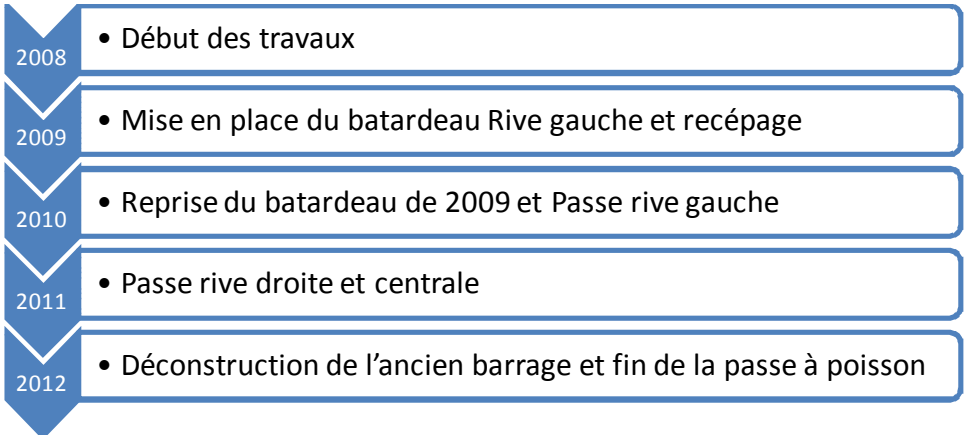
peut l'être un batardeau de chantier) ne doit réduire la section hydraulique de la Seine cela afin de permettre le passage des crues hivernales et d'éviter tout risque d'inondation.
Pendant la saison hivernale, seuls les travaux périphériques, terrestres ou encore de surface, ont donc pu être réalisés.

Lors des travaux sur le barrage de Coudray, des difficultés ont été rencontrées lors de la vidange du batardeau. Plusieurs essais successifs de vidange ont été réalisés. A chaque essai, les venues d'eau ont augmentées. En raison de la prise de retard sur le planning, la vidange du premier batardeau a été arrêtée et repoussée à l'année suivante, afin de ne pas réduire la section hydraulique de la Seine en période hivernale.

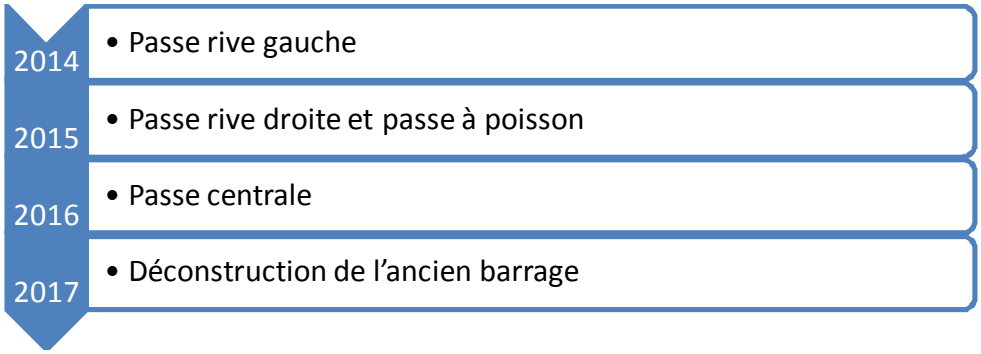
Avant de recéper les palplanches mises en place au cours de l'été 2009, un programme complet d'injections profondes et de surfaces a été monté sur le pourtour du batardeau provisoire. Le recepage a ensuite été réalisé environ 1.50m au-dessus du terrain naturel. En 2010, le nouveau batardeau a été reconstruit directement sur les palplanches de 2009.

Le planning simplifié des travaux est présenté ci-dessous :

Barrage de Coudray :



Vives Eaux :



6.1 Phase de construction

Ce barrage maintient le plan d'eau sur un tronçon très fréquenté du fleuve, en effet, il y circule chaque année plus de 13500 bateaux (commerce et plaisance) et 5.5 millions de tonnes de marchandises manutentionnées.
L'implantation du nouvel ouvrage, que ce soit en aval de l'existant dans la cas de Coudray ou en amont dans le cas de Vives Eaux, permet de se raccorder aux écluses existantes sans impacter leur fonctionnement. Le chantier n'a donc pas impacté la circulation fluviale.

Le barrage de Coudray a été réalisé à seulement 40m en aval du barrage existant. Le barrage existant ne pouvant être détruit avant la mise en service du nouvel ouvrage, les travaux se situaient donc directement dans les remous engendrés par l'ancien barrage à hausses Aubert.

Certaines hausses de l' ancien barrage étant indisponibles et bloquées en position basse, celles-ci engendraient localement de forts débits rendant les travaux (notamment par plongeur) difficiles.
De plus, l'axe de certaines hausses étant déboitées, celles-ci menaçaient de se détacher. Un rideau de protection en structure métallique a donc été mis en place en amont du chantier dans la partie la plus exposée afin de sécuriser les travaux et le personnel de chantier (plongeurs, etc..).
Ce rideau de protection a été dimensionné pour se déformer et ne pas rompre suite au choc d'une ou plusieurs hausses projetées contre le rideau.



Figure 13 : *Rideau de protection à l'aval des hausses instables*

6.1 Phase de déconstruction

Sur le barrage de Coudray, le démontage des hausses aubert a été réalisé par intervention de plongeurs et à l'aide d'une grue sur barge. Une ouverture a été réalisée par découpe dans la partie haute de chaque hausse pour permettre l'élingage. Les boulons de fixation de la hausse ont ensuite été découpés. L'ensemble hausse – chevalet – béquille a ensuite été levé. Le radier GC a été conservé en l'état.

L'ancienne passerelle qui servait de traversée piétonne et de chemin de roulement pour le chariot de manœuvre des hausses a été évacuée du site en un seul élément. Des camarteaux (assemblage de poutre croisées successivement) on été montés sous la passerelle au niveau des piles pour venir remplacer les piles existantes. Un vérin permet de lever ou baisser l'ensemble et ainsi d'ajouter ou de retirer des poutres. Au préalable, la structure de la passerelle a été renforcée au niveau des zones d'appuis des camarteaux. Une fois la passerelle supportée par les camarteaux, les piles existantes ont été détruites. La passerelle a ensuite été descendue sur un assemblage de barge à l'aide des camarteaux. L'évacuation par barge s'est ensuite faite par voie fluviale.

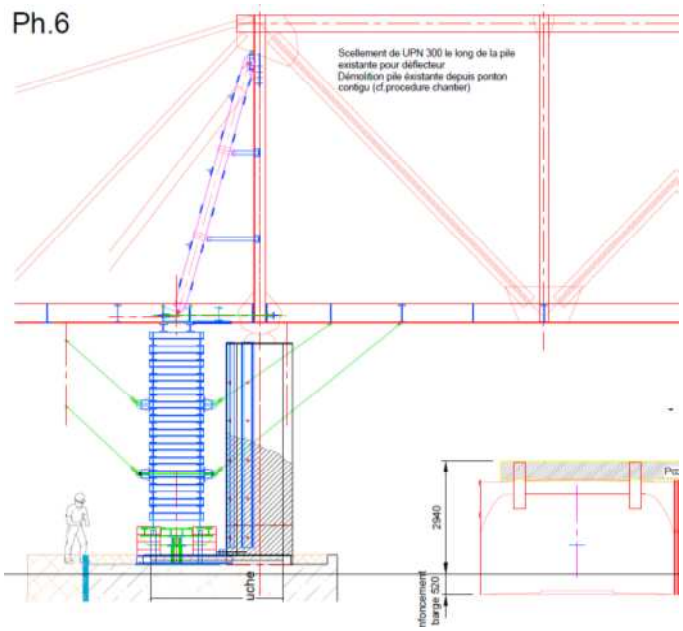


Figure 14 : *Camarteaux pour démontage de la passerelle*

7. ETUDES SUR MODELE PHYSIQUE

ARTELIA a réalisé une étude sur modèle réduit du clapet de Coudray. Un modèle à l'échelle de 1/12 d'une tranche de clapet de 1.4m de large a été réalisé. Cette largeur permet de s'affranchir des effets de bord.
Cette étude sur modèle a permis de nombreuses améliorations, notamment pour :

1) La détermination des lois niveau amont/aval et du débit de l'ouvrage pour les différentes positions du clapet
2) La détermination des efforts hydrodynamiques sur l'ouvrage avec des capteurs de mesure
3) L'optimisation du bassin de dissipation et le dimensionnement des enrochements par la mesure des efforts de sollicitation et la localisation des phénomènes tels que le jet plongeant au droit des clapets et le ressaut hydraulique aval. Par conséquence, les dimensions du bassin de dissipation composé du radier de l'ouvrage mais également d'un tapis en enrochements ont pu être optimisées et justifiées. Le ressaut aval pouvant se déplacer jusque dans la zone d'enrochements, ceux-ci ont été calibrés pour éviter leur instabilité et la longueur minimale nécessaire du bassin en enrochements a pu être vérifiée.



Figure 15: *Visualisation de la lame d'eau et du jet plongeant*

4) La mise en évidence du problème d'aération de la lame d'eau avec la conception initiale :

L'aération de la lame d'eau permet de supprimer le phénomène de résonnance (courbe rose de la figure ci-après) et donc de limiter les risques d'endommagement du clapet par mise en vibrations brutales.

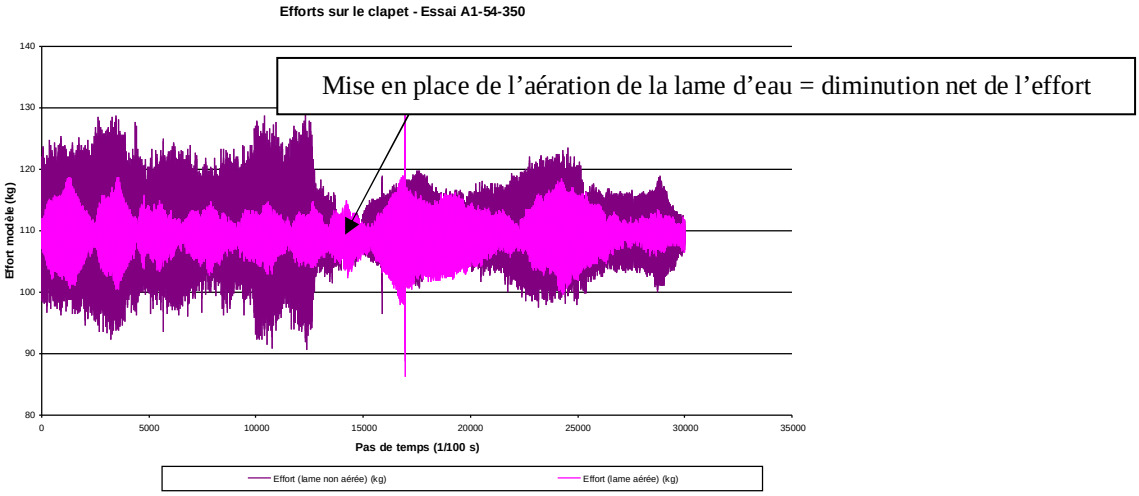


Figure 16 *: Résultats des essais sur modèle*

Des aérations au droit des piles ont été mises en place par l'installation d'évents. Il s'agit de conduits d'aération permettant de connecter le dessous de la lame d'eau qui se crée au niveau du clapet, à la pression atmosphérique présente au-dessus des piles en béton. Ainsi, afin de pouvoir aérer cette lame d'eau pour un maximum de positions différentes du clapet, 3 évents ont été dimensionnés de chaque côté des piles de l'ouvrage et leur sorties positionnées aux emplacements les plus efficaces, ceci grâce au modèle réduit du laboratoire.

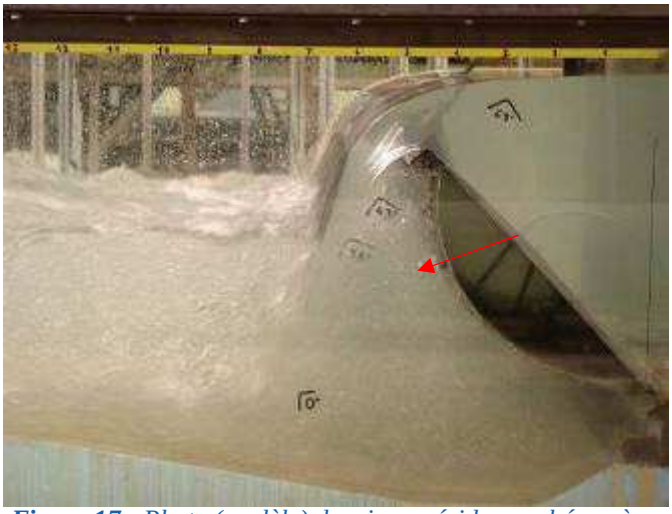


Figure 17 : *Photo (modèle) de mise en évidence phénomène de dépression*



Figure 18 *: Vue des 3 sorties hautes des évents pour aérer la lame d'eau pour un clapet en position haute*

L'optimisation des becs diviseurs installés sur le bord supérieur du clapet a également pu être réalisée en laboratoire, en faisant varier leur nombre, leur position, leur côte supérieure et leur forme pour obtenir une aération de la lame d'eau la plus homogène possible.

5. CONCLUSIONS

Après cinq ans d'études et cinq années de chantier, malgré des contraintes d'exploitation et des aléas géologiques particulièrement difficiles, le chantier du nouveau barrage à clapet du Coudray-Montceaux sur la Seine a été clos avec succès et l'ouvrage mis en service le 3 juillet 2012, puis inauguré le 15 mai 2013. Le nouveau barrage de Vives Eaux est en cours de construction. Le premier des trois clapets, a été posé et testé en novembre 2014. A terme, le barrage sera équipé de 3 clapets identiques. La date de mise en service est prévue pour 2017. L'expérience et le savoir-faire des entreprises impliquée ont permis de mener à bien ces travaux, que ce soit lors des études d'avant projet, des études d'exécution, de la fabrication ou du montage et de la réception des équipements. Des modifications de conception basées sur le retour d'expérience du barrage de Coudray ont permis de réduire les temps de fabrication et de montage pour le chantier de Vives Eaux. Cependant, la conception du clapet en lui-même, et son fonctionnement de manière générale, n'ont pas été affectés par le REX.
En revanche, le dépassement important du budget sur le barrage de Coudray, lié en partie aux difficultés de batardage en 2009 a par contre conduit VNF à confier la Maitrise d'œuvre du barrage de Vives Eaux à Artelia dissociant ainsi les responsabilités du Maitre d'Ouvrage et du Maitre d'œuvre.

REMERCIEMENTS

- Remerciements à Mme RIVOAL de VNF pour avoir permis la rédaction de cet article.
- Remerciement à M. Schatteman de VNF- TVE qui a assuré le suivi complet à pied d'œuvre de la reconstruction du barrage de Coudray et qui a la mémoire du chantier.
- Remerciements à M. SOUDAIN, M. BOUCHEZ et M. LACHERE de la société DIP-DUCROCQ INGENIERIE PROCESS pour leur contribution à cet article.
- Remerciements à tous les ingénieurs d'Artelia, toutes spécialités confondues (génie-civil, hydromécanique, géotechnique, automatisme et électricité) ayant apporté leurs compétences lors des différentes phases de ces projets

RÉFÉRENCES ET CITATIONS

[1] Legras, M (2013) Retour d'expérience sur la reconstruction du barrage de Coudray-Montceaux sur la seine Colloque CFBR: "Modernisation des barrages"
[2] EMCC (2012). Procédure de démontage des hausses..
[3] EMCC (2012) Procédure pour la réalisation de la dépose de la passerelle
[4]VNF (mai 2013). Reconstruction du barrage du Coudray-Montceaux. Plaquette informative.

TRAVAUX DE REHAUSSE ET DE RENFORCEMENT DE LA VANNE NPN (NOUVELLE PASSE NAVIGABLE) DU CANAL DE DONZERE

Reinforcement and heightening of the Donzère Canal NPN gate

Jean-Louis DUPUY, Yvan SETTI, Patrick BOUHANICHE, Vincent QUEMERAIS
SPRETEC, 19 rue des ciments, 38180 Seyssins
jeanlouis.dupuy@spretec.fr, yvan.setti@spretec.fr, patrick.bouhaniche@spretec.fr,
vincent.quemerais@spretec.fr
Téléphone : +33 (0)4 76 48 39 39, Fax : +33 (0)4 76 48 39 40

Guillaume BERNARD, Yann LENAOUR
Baudin Châteauneuf – BP 30019 – 45110 Chateauneuf sur Loire
guillaume.bernard@baudinchateauneuf.com, yann.lenaour@ baudinchateauneuf.com
Téléphone : +33 (0)2 3846 3846, Fax : +33 (0)2 3846 3841

MOTS-CLES

Clapet inversé, Réhausse de vanne, Séisme, Risques chantier, Soudure sur site

RESUME

Pour améliorer la protection du Centre Nucléaire de Production d'Electricité du Tricastin contre les crues du Rhône, le Maitre d'Ouvrage CNR (Compagnie Nationale du Rhône) a lancé une opération de réhausse et de renforcement de la vanne NPN du Canal de Donzère. Cette opération consiste principalement à sureléver de 1.9 m une vanne de grandes dimensions (largeur x hauteur = 62 x 8.3 m), doublant ainsi les efforts hydrostatiques sur son tablier. Cette opération d'envergure est présentée ici sous les quatre aspects suivants : i) Présentation de la solution retenue compte tenu des fortes contraintes de conception et de mise en œuvre, ii) Vérification de l'intégrité et de l'opérabilité de la vanne après séisme, iii) Analyse des risques induits par les travaux, iv) Présentation des particularités et de la chronologie des travaux sur site.

ABSTRACT

To improve the protection of Trication Nuclear Power Plant against flooding of the Rhone, the CNR (Compagnie Nationale du Rhône) launched an operation to raise and strength the NPN gate of Donzère Canal. This operation mainly consists in raising of 1.9 m a large mobile gate (W x H = 62 x 8.3 m), doubling the hydrostatic forces on her structure. Four main aspects of this program are detailed in this paper: i) Presentation of the solution adopted considering the strong constraints for design and work on site, ii) Verification of the integrity and reliability of the gate after earthquake iii) Risks analysis during site work, iv) Particularity and chronology for work on site.

1. INTRODUCTION

1.1 Présentation de la vanne NPN

La nouvelle passe navigable (NPN) fait partie des ouvrages de garde situés en tête du canal d'amenée de l'aménagement de Donzère-Mondragon, sur le Rhône (Cf. fig. 1). Sa fonction est d'isoler le canal en période de fortes crues du Rhône. Ainsi, au-delà d'un débit de 7100m3/s , les passes navigables sont fermées, et le débit entrant dans le canal d'amenée est régulé par le seul barrage usinier.

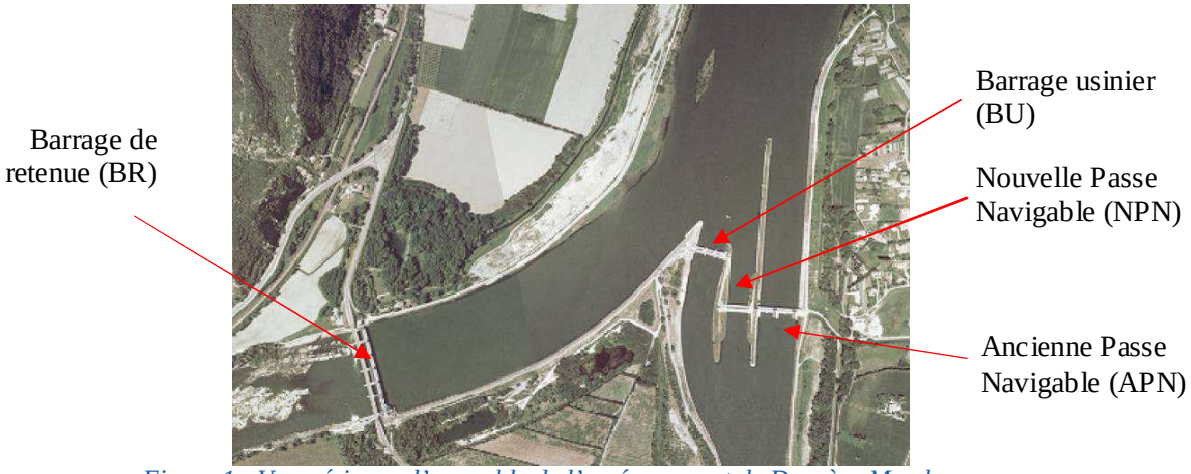


Figure 1 : Vue aérienne d'ensemble de l'aménagement de Donzère-Mondragon

Construite en 1984, la vanne NPN est atypique et unique en France, par son fonctionnement et par ses dimensions caractéristiques (avant travaux) :

- Type de vanne : « clapet inversé » constitué d'un caisson et d'un bordé.
- Largeur utile : 60 m.
- Organes de guidage : 2 paliers d'articulation ancrés dans le génie civil.
- Organe de manœuvre : 2 vérins hydrauliques supportés par des chaises vérins ancrées au génie civil.
- Etanchéités : absence de joint (jeu périphérique de 50mm).
- Efforts de manœuvre : 400t en tirant / 540t en poussée.
- Masse du tablier : 230t
- Reprise des efforts hydrostatiques s'exerçant sur le tablier fermé par un système de butonnage mobile positionné entre le tablier et le génie civil et manoeuvrés par 2 treuils à câbles.
- Vanne stationnée en position ouverte sur des béquilles.



Figure 2 : Vue de la vanne NPN ouverte depuis la rive droite (avant travaux)

1.2 Présentation générale de l'opération de réhausse et de renforcement de la vanne NPN

Les travaux d'amélioration de la protection du Centre Nucléaire de Production d'Electricité du Tricastin contre les crues (REX du Blayais) ont conduit à retenir un niveau de crue supérieur au dimensionnement initial des ouvrages de Donzère-Mondragon.

L'arase de la vanne NPN a ainsi due être réhaussée de 1,90m, de façon à assurer une protection du canal de Donzère jusqu'à une cote amont de crue millénale majorée (CMM), ce qui a pour conséquence immédiate le doublement des efforts hydrostatiques sur son tablier.
La tenue au séisme et la possibilité de manœuvre sur un seul vérin en mode dégradé ont également été intégrés dans le projet de modification de la vanne.

Au final, les caractéristiques principales de la vanne NPN après l'opération sont devenues :

- Masse du tablier : 360t, soit 1,6 fois la masse initiale.
- Efforts de manœuvre : 844t en tirant / 250t en poussée.
- Manoeuvre de la vanne possible sur un seul vérin hydraulique.



Figure 3 : Vue aérienne de la vanne renforcée après travaux

2. CONCEPTION DES ELEMENTS DE REHAUSSE ET DE RENFORCEMENT DE LA VANNE

2.1 Principales contraintes de conception

Les phases de conception et d'étude des réhausses et renforts de la vanne NPN ont été guidées par un nombre important de contraintes, parmi lesquelles les plus pénalisantes ont été les suivantes :

- Le maintien du tirant d'air de navigation au droit de la passe : les interventions n'étaient possibles que sur le dessus de la vanne ouverte (coté aval) ; toute intervention sur la face amont du bordé, qui aurait nécessité des reprises de peinture et donc l'obstruction de la navigation, était prohibée.
- La limitation de la masse de la vanne après intervention, afin de limiter autant que faire se peut l'augmentation inévitable des descentes de charges sur le GC.
- Le maintien opérationnel de la vanne durant la phase travaux : les périodes d'immobilisation de la vanne devaient être limitées au maximum ; en cas de crue, la vanne devait pouvoir être fonctionnelle dans un délai de préavis de 48 heures.
- La réalisation de travaux sur une vanne en charge, déformée sous son poids propre.
- L'accès très restreint entre la vanne et le génie-civil des bajoyers : chaque renfort devait être défini en lien avec les possibilités de travail des opérateurs soudeurs.

2.2 Réhausse et renforcement du tablier

Une des difficultés de l'opération a consisté à trouver une solution de renforcement du tablier respectant la masse maximale imposée et la contrainte de n'intervenir que sur le dessus de la vanne ouverte.

Après analyse de plusieurs solutions de conception (bow string, renforts treillis type Waren, etc.), la solution la plus adaptée a consisté à augmenter l'inertie de flexion du tablier par ajoût de deux Profilés Reconstitués Soudés (PRS) en aval, sur toute la longueur de la vanne.

L'étude et les calculs par éléments finis ont ainsi mis en évidence les modifications structurelles à apporter au tablier, en particulier : l'ajoût de PRS sur le caisson, la tenue du bordé par la mise en place de bracons, le renforcement des âmes du caisson, le renforcement des bras du à l'augmentation de la masse du tablier, le remplacement des appuis béquilles sur le tablier (cf. fig. 4).

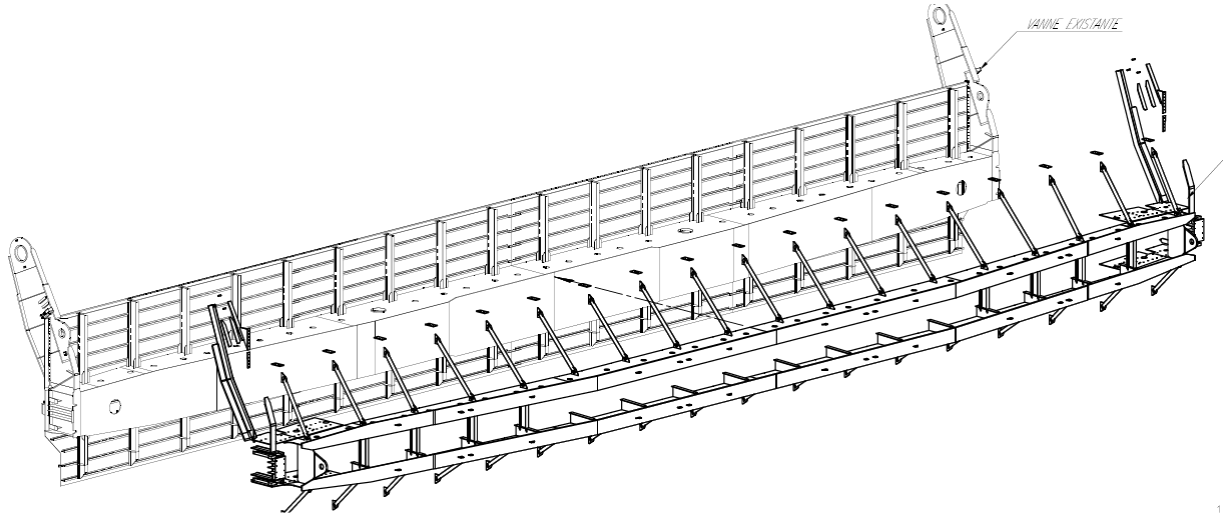
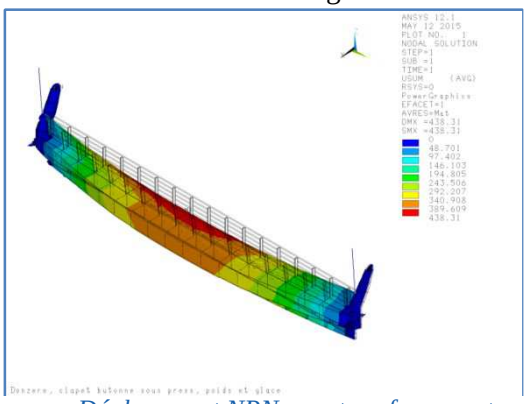
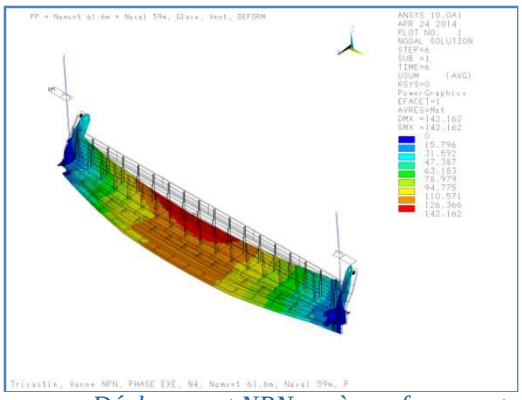


Figure 4 : Vue éclatée en perspective de la vanne d'origine et des renforcements

Une modélisation de la vanne avant et après travaux a été réalisée afin de valider que l'augmentation de la déformée restait compatible avec le fonctionnement de la vanne. Une mesure des jeux résiduels entre la vanne NPN fermée et le radier a également été réalisé pour vérification avant mise en œuvre des travaux.



Déplacement NPN avant renforcement



Déplacement NPN après renforcement

Figure 5 : Modélisation des déformations de la structure sous charge hydraulique

Cette maitrise de la déformée finale n'est néanmoins pas suffisante lorsque l'on intervient sur une structure en place, déformée sous son poids propre. En effet, afin de garantir un interstice régulier entre les PRS de renfort et la vanne, condition nécessaire pour garantir la qualité du cordon de soudure, un séquençage de soudage a dû être étudié, en calculant la déformée du tablier au fur et à mesure de l'ajout des PRS, prenant également en compte la la masse ajoutée des outillages (cabanes de soudage, portique de manutention embarqué,…). Cette étude a permis de définir les cordons de soudure chenilles provisoires, nécessaires à la reprise des contraintes dues au poids propre.

2.3 Renforcement des ancrages paliers

L'augmentation du poids propre de la vanne a logiquement conduit à l'accroissement des descentes de charge sur les fondations. Cette augmentation des charges s'est avérée incompatible vis-à-vis de la résistance du bajoyer au niveau des tambours de paliers supportant la vanne, par l'intermédiaire de rotules.
Afin de pallier à cette difficulté, un dispositif mécanique externe atypique a été conçue. Ce dispositif est constitué :

- d'une platine inférieure, ancrée par des bèches et des tirants,zone es,
- d'un poussoir supérieur accessible en partie haute,
- de deux systèmes actifs de pré-contrainte par câble.

Inséré dans l'espace réduit disponible entre le bras et le GC (300mm), ce dispositif permet d'apporter une pré-contrainte de 350 tonnes sur le tambour de chaque palier ancré dans le béton. Il permet ainsi d'intéresser un volume de béton plus important, à même de reprendre les charges majorées transmisee par les paliers de

la vanne. Chaque cable est instrumenté par une cellule de mesure d'effort afin de pouvoir contrôler la tension résiduelle à tout instant.

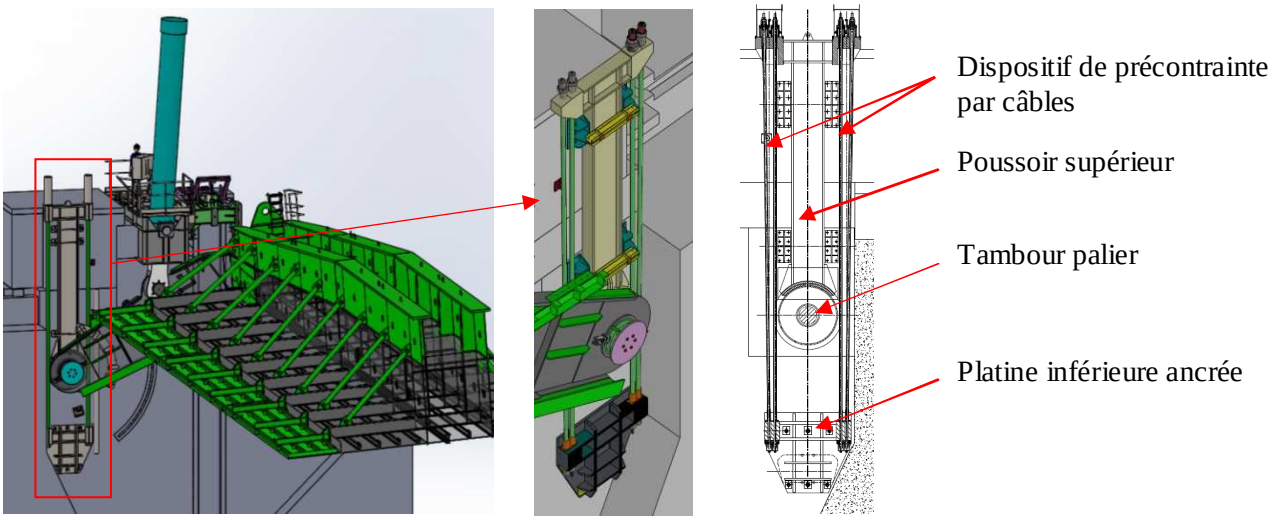


Figure 6: Principe de renforcement des ancrages paliers

2.4 Remplacement des vérins de manœuvre et renforcement de leur chaise

L'augmentation du poids propre de la vanne et le souhait de pouvoir manœuvrer sur un seul vérin en mode dégradé (redondance), a conduit au remplacement des vérins de manœuvre d'origine et à la mise en place des vérins possédant la plus forte capacité de tout le parc hydraulique français (Φalésage 750 x Φtige 250 x course de 6500 mm). Cela a également entrainé le besoin de renforcement des bras de la vanne, le renforcement du support de vérin et le remplacement des centrales hydrauliques.

La conception des renforts a été guidée par les fortes contraintes de mise en œuvre sur le site :

- Les chaises vérins à renforcer sont pour bonne partie noyées dans le génie civil.
- L'accessibilité et la sécurité des opérateurs devaient être assurées lors de la mise en place des renforts et la réalisation des opérations de soudage.
- Le remplacement des vérins hydrauliques devait pouvoir se faire en temps minimum pour garantir le maintien opérationnel de la vanne en cas de survenue d'un épisode de crue.

Ces contraintes se sont traduitent par un scénario de renforcement des supports vérin par le dessus, avec conservation des intefaces de montage des vérins d'origine. Les renforts complémentaires ont été conçus pour pouvoir être soudables avec les vérins en place.

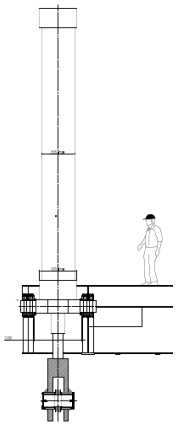


Figure 7: Vue d'ensemble d'un vérin

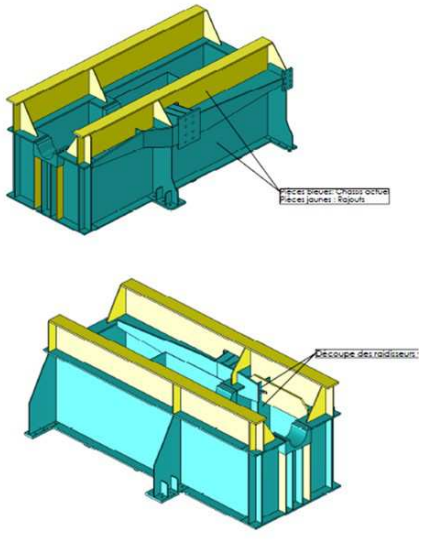


Figure 8: Principe de renforcement des chaises vérins

2.5 Amélioration du guidage en manoeuvre

Afin d'améliorer le guidage de la vanne lors de la manœuvre et d'assurer la non-interférence entre les bras de vanne et les bajoyers, un dispositif de guidage complémentaire a été intégré à la vanne.
Celui-ci est constitué de galets solidaires du bajoyer et d'une piste de roulement solidaire du bras. Ces éléments ont été positionnés à chaque extrémité de la vanne pour permettre son centrage.

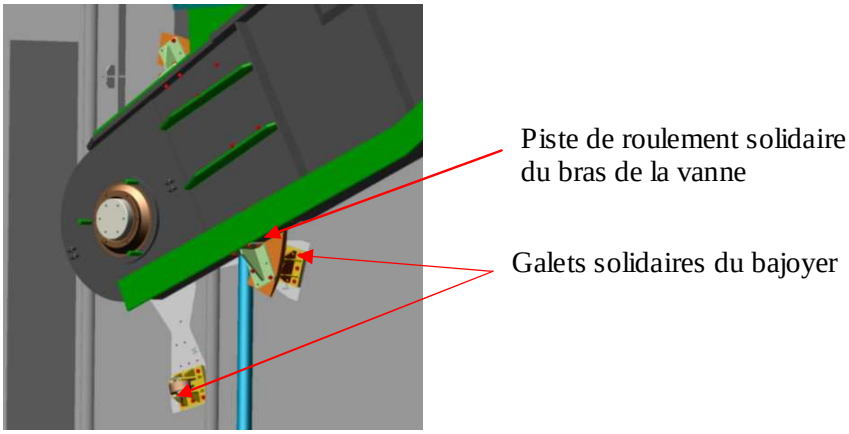


Figure 9 : Principe de guidage du bras de la vanne

2.6 Autres travaux divers

En compléments des principaux travaux présentés ci-dessus, différentes modifications ont également été apportées à la vanne NPN, parmi lesquelles :

- Le remplacement des rotules d'origine par des articulations autolubrifiantes.
- La mise en place de nouvelles béquilles d'appui amont et aval dans un encombrement identique mais avec 60% de plus de chargement.
- La mise en place de nouveaux butons dans un encombrement identique sous une charge doublée.

3. INTEGRITE ET OPERABILITE DE LA VANNE APRES SEISME

Dans la suite de ce paragraphe, la direction X représente le sens de l'écoulement, la direction Z est verticale vers le haut, et Y est donc horizontale, de la rive droite vers la rive gauche.

3.1 Définition des exigences et aléas sismiques

Compte tenu du rôle majeur de la vanne NPN dans l'aménagement de Donzère-Mondragon, l'exigence sismique a été traduite de la manière suivante *: « L'équipement doit résister au séisme, maintenir l'étanchéité, et continuer à être manœuvrable après séisme »*. On a donc une exigence d'opérabilité post-séisme.

Concernant l'aléa sismique, le spectre pris en compte est le spectre SMHV du site de Tricastin majoré d'un coefficient 2 afin d'obtenir le spectre de plancher au niveau des béquilles et articulations de la vanne. Le spectre horizontal est présenté en fig. 10. Il présente une partie rigide à 0.4 g et un pic à 0.9g ; le spectre vertical est égal au 2/3 du spectre horizontal.

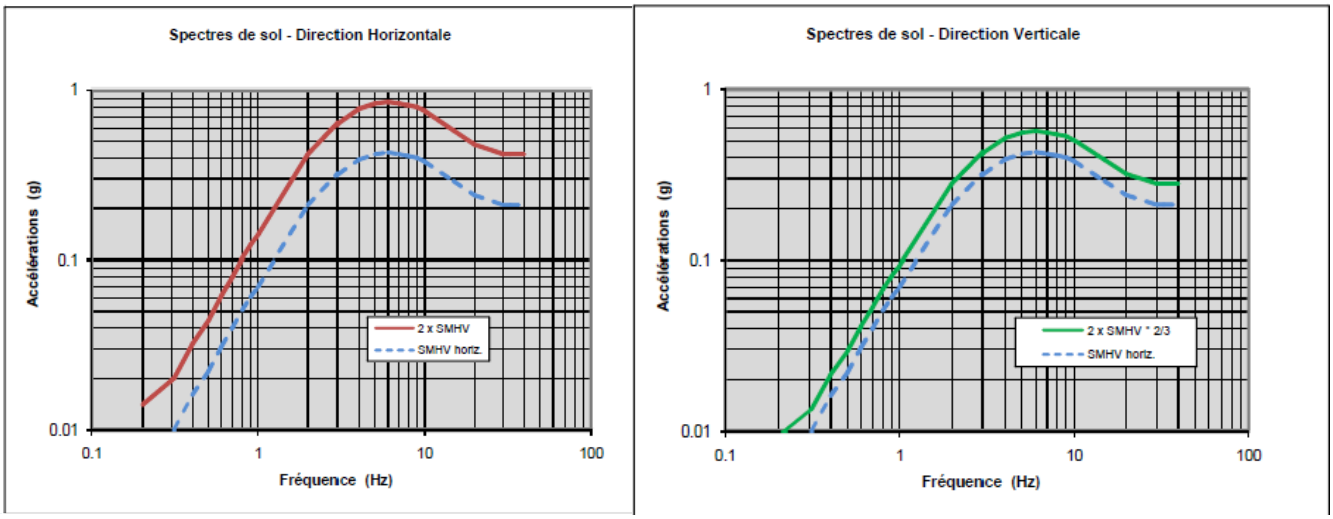


Figure 10 : Spectre horizontal

3.2 Méthode de justification

Compte tenu de l'enjeu, des exigences fonctionnelles de la vanne et de ses dimensions, le calcul sismique a été mené par la méthode spectrale à l'aide du modèle éléments finis construit pour les calculs statiques, soit :

1. Calcul des fréquences propres
2. Calcul des facteurs de participation et réponses modales
3. Cumul des réponses modales dans chaque direction (combinaison CQC)
4. Cumul des directions (Combinaisons de Newmark)

Deux situations incluant le séisme sont étudiées :

1. Vanne en air sur béquilles : Poids propre + séisme en air
2. Vanne en eau sur butons: Poids propre + ΔH normal (2,6m) + séisme en eau

Une des difficultés provient de la prise en compte de l'eau pour tenir compte de l'interaction fluide/structure. Pour garder un modèle 'industriel' compatible avec les délais d'étude imposés, une méthode classique a été retenue, la formulation de Westergaard (Réf. [1]):

$$\boldsymbol{m_w(h) = \frac{7}{8}.\rho_w.h_w.\sqrt{1-\frac{h}{h_w}}}$$

Avec : $m_w(h)$: Expression de la masse ajoutée en fonction de la hauteur/seuil (kg /m²)
ρ_w : Masse volumique du fluide (kg/m3)
h_w : Hauteur d'eau / seuil (m)

La vanne étant constituée d'un caisson non étanche et submergé, il a également fallu tenir compte de l'eau contenue dans le caisson, ce qui conduit aux masses suivantes:

1. Vanne en air sur béquilles :	Masse d'acier :	390 t
2. Vanne en eau sur butons :	Masse d'acier :	390 t
	Masse d'eau ajoutée en X :	2500 t
	Masse d'eau contenue :	362 t
	Masse totale vanne en eau :	3252 t

Les masses de Westergaard ne sont prises en compte que dans la direction de l'écoulement ; la masse d'eau contenue intervient dans les trois directions. Ces masses sont réparties sur le modele au niveau des raidisseurs horizontaux du bordé pour les masses de Westergard, et au nieau du caisson pour l'eau contenue.

3.3 Résultats vanne en air sur béquilles

L'analyse modale fait apparaître les modes important suivants, caractérisés par leur masse effective :

Direction	Mode	Fréquence (Hz)	Masse effective
X	4 5	2.53 2.70	196.3 103.0
Y	1	1.06	214.5
Z	4 5	2.53 2.70	129.5 207.8

Tableau 1 : Modes propres et masse effective (Vanne en air sur béquille)

A la fréquence de coupure du spectre (30 Hz), le cumul des masses effectives atteint 90% de la masse totale modélisée dans chaque direction.

Les modes propres en air sont représentés fig. 11 :

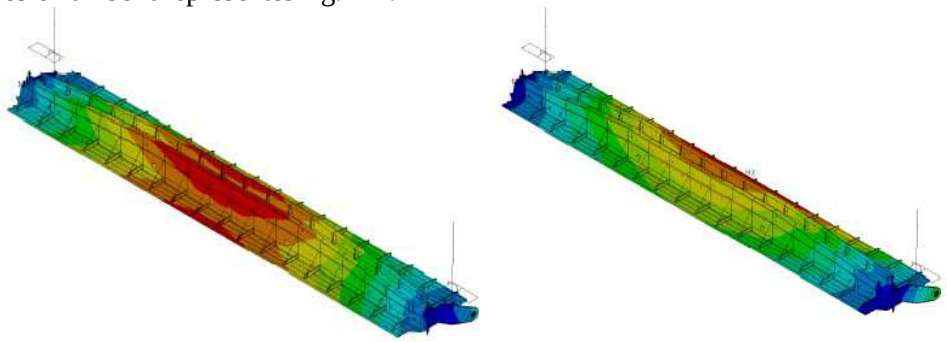


Figure 11 : Représentation des modes propres en air

On constate que la réponse en flexion d'ensemble est constituée par deux modes importants en X et Z à 2.53 et 2.7 Hertz. Ceci provient du fait que les inerties principales de la vanne sont inclinées d'environ 45° par rapport au repere de calcul. On a ici typiquement un cas où il aurait été érroné de faire une analyse pseudo statique sur un seul mode. L'analyse spectrale permet de prendre en compte ce phénomène.
On remarque également que les modes principaux sont situés à gauche du spectre, dans le domaine des basses fréquences ce qui donne des accélérations spectrales horizontales de l'ordre de 0,6 g.
La fleche en milieu de portée est de l'ordre de 41mm hors séisme, et 67 mm avec le seisme.
La contrainte dans le bordé est de l'ordre de 80 MPa hors séisme et 140 MPa avec le séisme.
La vanne étant construite en S355, cette contrainte est largement admissible pour le bordé.

3.4 Résultats vanne en eau sur butons

L'analyse modale fait apparaître les modes important suivants, caractérisés par leur masse effective :

Direction	Mode	Fréquence (Hz)	Masse effective (tonne)
X	2	0.98	2702.3
Y	1	0.14	705.0
Z	5 6	1.49 1.80	436.0 416.7

Tableau 2 : Modes propres et masse effective - Vanne en eau sur butons)

A la fréquence de coupure du spectre, le cumul des masses effectives atteint 90% de la masse totale modélisée dans chaque direction.Les modes propres en eau sont représentés ci-après fig. 12 :

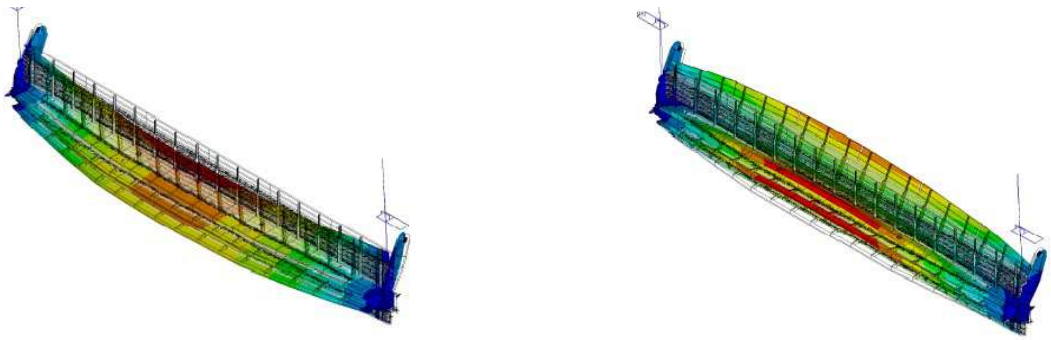


Figure 12 : Représentation des modes propres en eau

Compte tenu de la masse d'eau importante en X, on retrouve un seul mode important en X, et par contre toujours deux modes significatifs en Z.
On constate que ces modes sont nettement plus à gauche sur le spectre ; ceci est dû aux masses de fluide ajoutées qui font baisser sensiblement les fréquences propres, surtout en X. On lit pour ces modes, une accélération horizontale de 0.13 g en X et une accélération verticale de 0.2 g.
La flèche en milieu de portée est de l'ordre de 109mm hors séisme sous $\Delta H = 2.6$m, et 151 mm avec le séisme.
La contrainte dans le bordé est de l'ordre de 250 MPa hors séisme et 290 MPa avec le séisme.
La contrainte dans les raidisseurs du bordé atteint 315 MPa avec le séisme.
La contrainte dans les semelles du renforcement est l'odre de 180 MPa.
La vanne étant construite en S355, ces contraintes sont admissibles.

On tire ici profit de la 'souplesse' de la vanne, qui conduit, en eau, à des fréquences propres basses, et donc à des accélérations sismiques relativement faibles.
A titre de comparaison, les contraintes obtenues hors séisme, mais avec la CMM (crue millénale Majorée), sont légèrement supérieures: Bordé : 295 MPa, Raidisseurs horizontaux : 320 MPa, Semelles du renforcement : 290 MPa .
Globalement, en CMM ou en séisme, les contraintes restent dans le domaine élastique du matériau ; l'intégrité, et l'opérabilité après séisme, sont donc assurées.

3.5 Conclusion de l'analyse sismique

La méthode utilisée (réponse spectrale et masses ajoutées de Westergaard (Réf. [1])) a permis d'effectuer un dimensionnement sismique raisonnable de la vanne, adapté à ses dimensions et exigences de sécurité, tout en étant compatible avec les délais de réalisation de ce projet d'envergure.

4. PRESENTATION DES PARTICULARITES ET DE LA CHRONOLOGIE DES TRAVAUX SUR SITE

4.1 Analyse des risques induits par les travaux

En complément des problématiques rencontrées usuellement lors de la réalisation de travaux sur des ouvrages hydrauliques existants, la nécessité de préserver la sureté de la centrale de Tricastin à conduit à mener lors de la phase préparatoire des travaux une analyse de risque détaillée, portant sur les phases jugées sensibles du projet.
Ce rapport a permis d'identifier les sources imprévues possibles d'immobilisation de la vanne. Pour chaque opération identifiée comme potentiellement risquée, une décomposition par phases a été réalisée. Pour chacune de ces phases, les risques associés ont été décrits ainsi que leurs conséquences. A été ensuite définies les parades envisagées de façon préventive pour éviter d'avoir à recourir aux parades curatives elles-mêmes identifiées.

ROTULE - PHASE 1 : Pose vanne sur ses 4 béquilles d'appui			
Risque :	Blocage des béquilles amont utilisées uniquement de façon exceptionnelle		
Conséquence :	Impossible de libérer l'effort appliqué sur la rotule		
Degré conséquence :	R3		
Cause :	- Grippage de l'articulation - Blocage du mécanisme de manœuvre		
Probabilité :	4		
Parade préventive :	Positionnement de la vanne en surcourse haute puis manœuvre d'essai à vide des 2 béquilles amont.		
Fiabilité parade p. :	10		
Parade curative :	Pose de la vanne sur les 2 béquilles aval et sur des cales bois temporaires.		
Délai engendré :	2 jours		
Délai retour à zéro :	2 jours	*Délai pour fin OP :*	7 jours

Tableau 3 : Extrait du rapport d'analyse de risques ARTELIA Eau & Environnement : Parade MR3 – Renforcement vanne NPN – Analyse de risques

Sur la base de ce document, les modes opératoires de chacune des tâches critiques ont été définis par l'entreprise en charge des travaux.

4.2 Chronologie générale des travaux

Afin de limiter la durée d'immobilisation de la vanne synonyme de perte de sécurité hydraulique au niveau de la passe, la chronologie générale suivante a été retenue :

Etape 1 - Modification des béquilles.
Etape 2 - Modification bras.
Etape 3 - Modification des équipements oléo-hydraulique (vérins, centrale…).
Etape 4 - Renforcement du caisson de la vanne.
Etape 5 - Renforcement du bordé par mise en place des bracons.
Etape 6 - Peinture du bordé aval.
Etape 7 - Mise en place des rehausses de la vanne.

Tout au long des travaux, des moyens ont été mis en œuvre afin de garantir le maintien des caractéristiques fonctionnelles de la vanne :

- Mise en place d'une procédure détaillée et de gabarits outillages permettant les tracés des découpes prévues dans la vanne.
- Relevés de cotes sur les pièces existantes pour s'assurer de leur conformité par rapport aux plans d'origine.
- Contrôles dimensionnels en atelier des nouvelles pièces et comparaison avec les pièces existantes réelles.
- Conception d'outillage facilitant la mise en place et le retrait des pièces (notamment au niveau des éléments de liaison et de manœuvre).
- Définition détaillée des procédures de démontage et de remontage.
- Approvisionnement de pièces de rechange.
- Réalisation de contrôles à chaque étape d'installation des circuits hydrauliques et électriques.
- Analyse des déformées et jeux résiduels entre la vanne et le radier pour différentes phases de travaux.

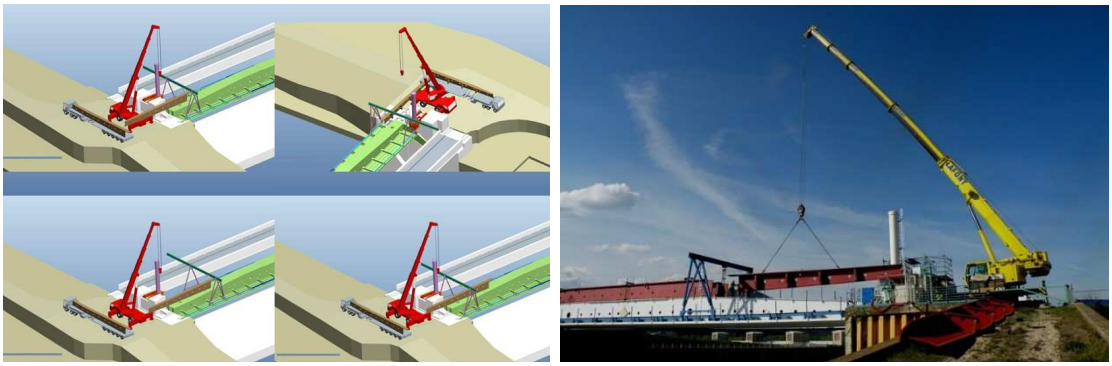


Figure 13 : Simulation d'amenée, déchargement et mise en place d'un renfort de vanne par portique embarqué ; Vue de l'acheminement du PRS d'extrémité RG

4.3 Particularités de mise en œuvre

4.3.1 Pour le maintien opérationnel en cas de crue

La chronologie des tâches à réaliser, les modes opératoires et les outillages mis en œuvre ont été définis afin de garantir le maintien opérationnel de la vanne en cas de crue. Pour se faire, en cas de déclaration de l'état de crue (débit du Rhône dépassant 5000 m3/s) pendant les travaux, les actions suivantes devaient rester possibles :

- Remise en configuration opérationnelle de la vanne en 48h.
- Enlèvement de tout matériel posé sur la vanne (portique de levage, abri de protection pour le soudage et la peinture…) dans un délai de 48h.
- Dégagement des zones de travail de façon à faciliter les accès à l'exploitant.



Figure 14 : Configuration de la vanne en phase soudage (présence de 2 portiques et 2 abris de soudage). Une grue mobile présente sur site permet à tout moment le retrait des abris de soudage



Figure 15 : En phase travaux, sous 48h, la vanne peut être rendue fonctionnelle et restituée temporairement à l'exploitant.

4.3.2 Pour le maintien de la navigation

La nécessité de maintenir la navigation des bateaux et péniches dans la passe a conduit à la mise en place des dispositions suivantes :

- Maintien de la visibilité de la signalisation lumineuse par rehausse du dispositif existant.
- Maintien de la signalétique.



Figure 16 : Passage d'une péniche en phase de travaux

4.3.3 Pour le soudage des renforts sur le tablier

En plus de la variation de flèche due à l'ajout des renforts (augmentation du poids propre) l'opération de renforcement devait tenir compte des déformations liées aux contraintes thermiques de soudage. Le phasage de soudage des renforts du caisson a ainsi été défini afin de limiter les déformées dues aux contraintes thermiques. Pour se faire, les éléments centraux de renfort ont été intégrés prioritairement à la vanne, et les soudures de raboutage des PRS réalisés préalablement aux soudures longitudinales, permettant un gain d'inertie de la vanne très tôt dans le phasage, ce qui a permis de limiter au final les déformations.



Figure 17 : Vanne NPN en cours de renforcement

4.3.4 Pour le renforcement des ancrages palier

Le renforcement des ancrages paliers a été réalisé par précontrainte extérieure du génie civil via le dispositif présenté au § 2.3. Les photos ci-après montrent la mise en œuvre de cette opération.

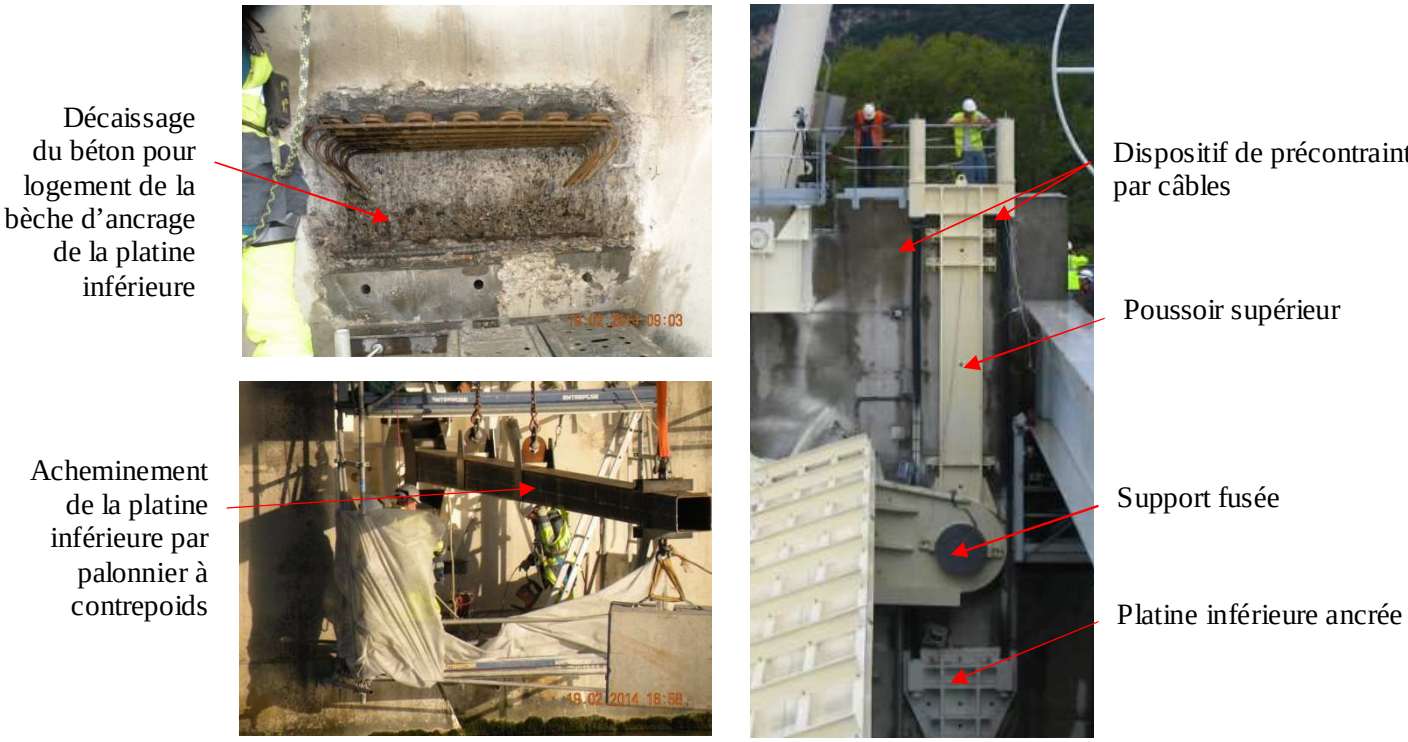


Figure 18 : Renforcement des ancrages palier en cours de réalisation et en configuration finale

4.3.5 Pour le remplacement des vérins de manœuvre

Le phasage pour le remplacement des organes de manœuvre a fait l'objet d'une attention minutieuse, conduisant à un mode opératoire spécifique. Cette opération complexe de changement de vérin a été planifiée sur une durée de 5 jours. Ce temps, supérieur aux 48 heures définies dans l'exécution classique du contrat, a requis un ordre de service spécifique prenant en compte les données climatiques ainsi qu'une estimation à moyen terme des débits du Rhône.

Le renforcement du support de vérin comportait des opérations classiques de découpe, soudage et application de protection anticorrosion. La découpe du support existant a été réalisée en présence des anciens vérins, le soudage de certains renforts a été réalisé lors de la période d'immobilisation de 5 jours de la vanne. Une conception, un phasage et une réalisation optimisée ont été nécessaires afin de limiter les déformations des supports de vérin au cours du soudage.



Graphique 10 : Vue du vérin de manœuvre RG en cours et après montage

CONCLUSIONS

Les travaux d'amélioration de la protection du Centre Nucléaire de Production d'Electricité du Tricastin contre une crue millénaire majorée ont conduits à modifier en profondeur la vanne NPN existante. L'augmentation de l'arase de la vanne a nécessité le renforcement structurel de la vanne conduisant par la-même à des modifications des éléments de liaison et de manœuvre.
Le travail collaboratif mené entre les différentes parties prenantes a permis de mener à bien ce projet tout en conservant en permanence la continuité de sureté hydraulique ainsi que la navigabilité de la passe.

REMERCIEMENTS

Nous remercions l'ensemble de l'équipe de la maitrise d'ouvrage de la Compagnie Nationale du Rhône (CNR) ainsi que l'équipe de la maitrise d'œuvre d'EDF-CIH.
Nous remercions aussi l'ensemble des personnels des sociétés SPRETEC et BAUDIN CHATEAUNEUF qui ont participé à la réalisation de ce beau projet.

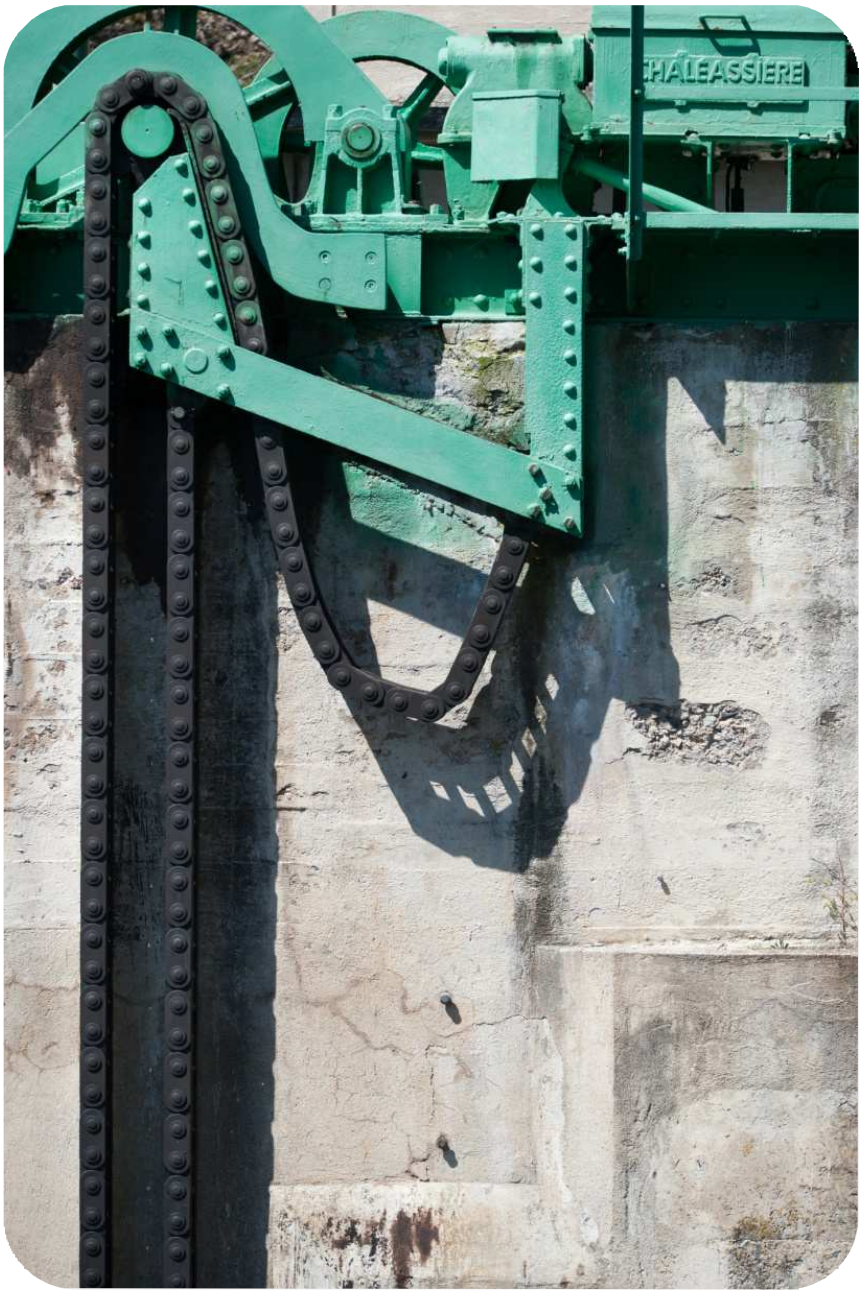
Crédits photos : Film EDF « Zoom sur le chantier de la passe navigable ».

RÉFÉRENCES ET CITATIONS

[1] H.M. Westergaard: Water pressures on dams during earthquakes . Trans of ASME Paper 1835

Thème C

Remplacement et évolution des organes de vantellerie des barrages



Détail du barrage de Poutès sur l'Allier, chaînes d'ouverture des vannes
© EDF – Patrick DHUMES

CREATION DU NOUVEAU DISPOSITIF DE VIDANGE DE FOND DU BARRAGE DE SARRANS

New bottom outlet creation on the Sarrans dam

Nicolas DUDA
EDF CIH – 18, av. R.Poincaré – 19100 BRIVE
nicolas.duda@edf.fr

MOTS CLÉS

Évacuateurs de crues, vanne wagon sous carter, vanne papillon, galerie, blindage, béton, dérivation provisoire, servomoteurs, centrale hydraulique.

RÉSUMÉ

Lors de la vidange du barrage de Sarrans qui eût lieu entre le 15 avril et le 24 octobre 2014, EDF a finalisé les travaux de réalisation d'un nouveau dispositif de vidange de fond, dont les travaux préparatoires avaient débuté dès le mois d'août 2012.
Deux vannes de type « wagon sous carter » doivent permettre d'assurer les fonctions de vidange de l'ouvrage et d'évacuateur de crue à hauteur de 230 m³/s à la RN. Ces vannes sont dimensionnées pour manœuvrer en charge en mode tout ou rien, et ont une fonction de régulation de débit sous la CME en cas de vidange du barrage. Ce dispositif se substitue aux 8 vannes papillon d'origine qui furent démantelées.
Le dispositif de vidange de fond nécessita la création d'une plateforme à l'aval de l'appui rive gauche, permettant le percement, barrage en eau, d'une galerie horizontale de diamètre 4,5 m. La liaison avec la dérivation provisoire n°1 existante fut réalisée une fois la retenue vidangée et la dérivation batardée.
En parallèle, la galerie horizontale fut blindée et le local abritant les 2 nouvelles vannes fut érigé sur la plate-forme aval. Un rond-rectangle réalise la liaison entre la galerie diamètre 4,5 m et la section de passage des nouvelles vannes de 3,5 m x 2,8 m. Les nouvelles vannes sont commandables depuis le nouveau local, et également depuis le local de crue situé sur le couronnement du barrage.
Les essais menés donnant entière satisfaction, cette opération se termine sur un bilan positif, tant sur les aspects coûts et délais que qualité de réalisation.

ABSTRACT

During the Sarrans dam's emptying made from the 15th of April to the 24th of October 2014, EDF ended huge works in order to create a new bottom outlet, preliminary works began from august 2012.
Two roller gates under carter allow to insure both functions of dam's bottom outlet and spillway until 230m³/s at the normal water level elevation. Both gates are design in order to maneuver which the maximal load according to an ON/OFF mode, and have to regulate under minimal exploitable level in case of dam draining. This device replaces the 8 original butterfly valves which have been dismantled.
The new bottom outlet required the creation of a platform against the downstream rock abutment, which allowed the excavation of the 4,5m diameter horizontal culvert despite the dam is full. The link with the n°1 diversion tunnel will be realized when the dam will be empty and this diversion tunnel will be gated.
During this period, the pressure pipe have been settled in the horizontal tunnel and the building, which shelter both new gates, have been build on the downstream platform. A self-supporting part makes the interface between 4,5 meters diameter pipe and the 3,5m x 2,8m gate's section. The new gates will be orderable from the new building, and also from the spillway gate chamber based on the dam's top.
This operation ended on a global positive balance, because of the successful tests, and the respect of budget, quality and projected deadlines.

1. PRESENTATION DE L'AMENAGEMENT

L'aménagement de Sarrans, mis en service en 1934, est situé sur la rivière « Truyère ». A sa construction, l'usine a été équipée de 3 groupes de production principaux, type Francis vertical, de 42 MW (50 m³/s unitaire) et d'un groupe de production auxiliaire également de type Francis vertical. En 1981, a été rajouté un quatrième groupe de production, type Francis vertical, de 57 MW (86,5 m³/s). Cet aménagement permet ainsi de turbiner un débit maximum de 236 m³/s, pour une puissance totale installée de 183 MW.

Le barrage de Sarrans est un ouvrage de type poids légèrement arqué, dont les 13 plots sont clavés.
D'une hauteur sur fondation de 113,20 m, ses principales caractéristiques sont :

- Niveau de la RN : 646,80 m NGF et niveau des PHE : 647,00 m NGF;
- Longueur en crête : 225 m;
- Épaisseur : 4,0 m en crête – 75,0 m au maximum;
- Fruit parement amont : de 0,03 à 0,015;
- Fruit parement aval : 0,77;
- Débit maximal évacuable à PHE : 2x1100 m3/s via deux galeries de 8,30 m de diamètre;
- Ancienne vidange de fond : 4 x 35 m3/s via deux galeries de 5,30 m de diamètre terminées par 4 conduits métalliques (2 vannes de type papillon en série sur chaque conduit);
- Terrain de fondation : Zone de granit à l'emplacement du barrage situé à l'entrée de gorges resserrées à forte pente. A l'amont du bassin, les terrains à pente douce sont composés de gneiss et de schistes cristallins.

2. EXPRESSION DU BESOIN

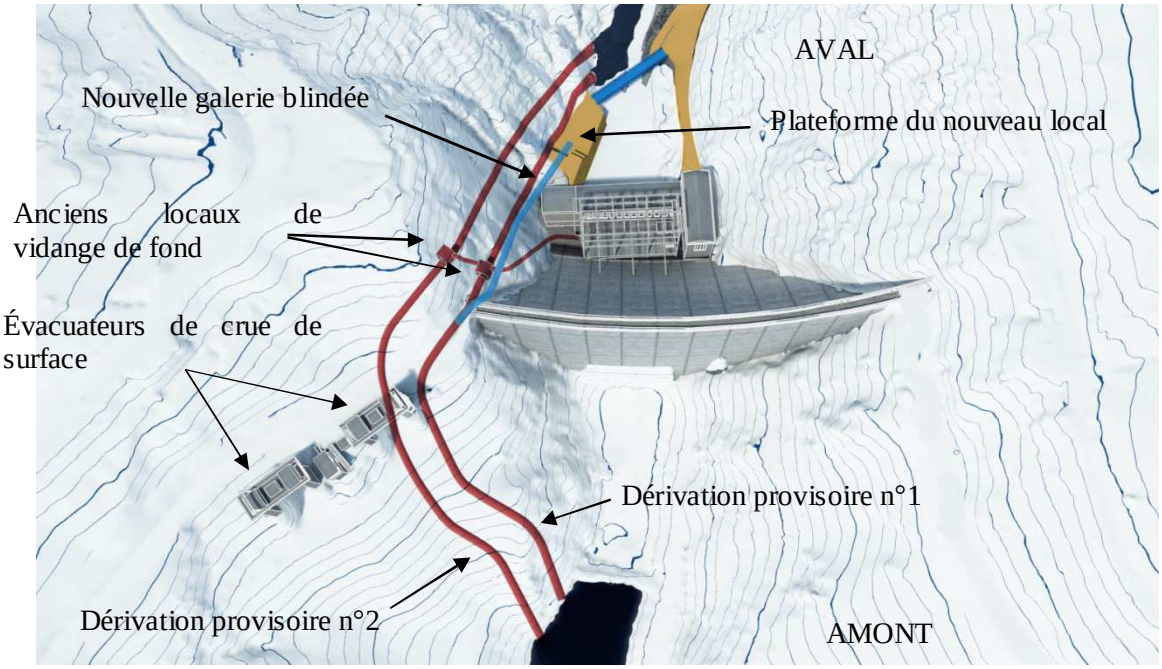
L'objet du renouvellement de la vidange de fond est de satisfaire aux critères de réduction de moitié de la poussée hydrostatique en moins de 8 jours et de la vidange totale de la retenue en moins de 21 jours. En complément, le cahier d'expression du besoin indique les éléments suivants :

- La nouvelle vidange de fond est intégrée à la fonction évacuation des crues du barrage ;
- La maintenance des futures vannes est réalisée sur place ;
- En fonctionnement en crue, les nouvelles vannes de vidange fonctionnent en tout ou rien (pas de fonction de réglage) ;
- En fonctionnement en vidange réglementaire, les nouvelles vannes de vidange de fond sont utilisées en régulation de débit en dessous de la Cote Minimale d'Exploitation (entre 596 m NGF et 572 m NGF environ) ;
- Les 4 anciennes vannes de fond de la vidange de fond n°1 sont remplacées par 2 nouvelles vannes qui serviront de vannes de vidange de culot ;
- La vidange de fond n°2 sera traitée de façon à garder la possibilité de faire transiter un débit par les conduits existants, dans le but de permettre une maintenance des vannes de vidange de culot de la galerie n°1.

3. DESCRIPTION GENERALE DU PROJET

La solution retenue est la création d'un nouveau dispositif d'une capacité de 230m3/s permettant d'assurer les fonctions de vidange de fond et d'évacuateur de crues complémentaires aux évacuateurs de crues existants. Ce nouveau dispositif est constitué des ouvrages GC suivants :

- La prise d'eau amont existante de la galerie n°1,
- La galerie amont n°1 existante sur une longueur de 220,00 m,
- Un puits incliné d'une longueur de 25,00 m et de diamètre 4.50 m en amont du bouchon béton existant intégrant les deux conduits de diamètre 1,50 m,
- Une nouvelle galerie subhorizontale blindée d'une longueur de 100,00 m et de diamètre 4,50 m,
- Une chambre des vannes située en sortie de galerie, avec mise en place d'une vanne de garde (et son clapet d'isolement) et d'une vanne de service,
- Un canal et une cuillère de dissipation d'énergie,
- Un poste de pilotage dans le local de crue,
- Un groupe électrogène de secours.



Graphique 1 : Vue de dessus de l'ouvrage

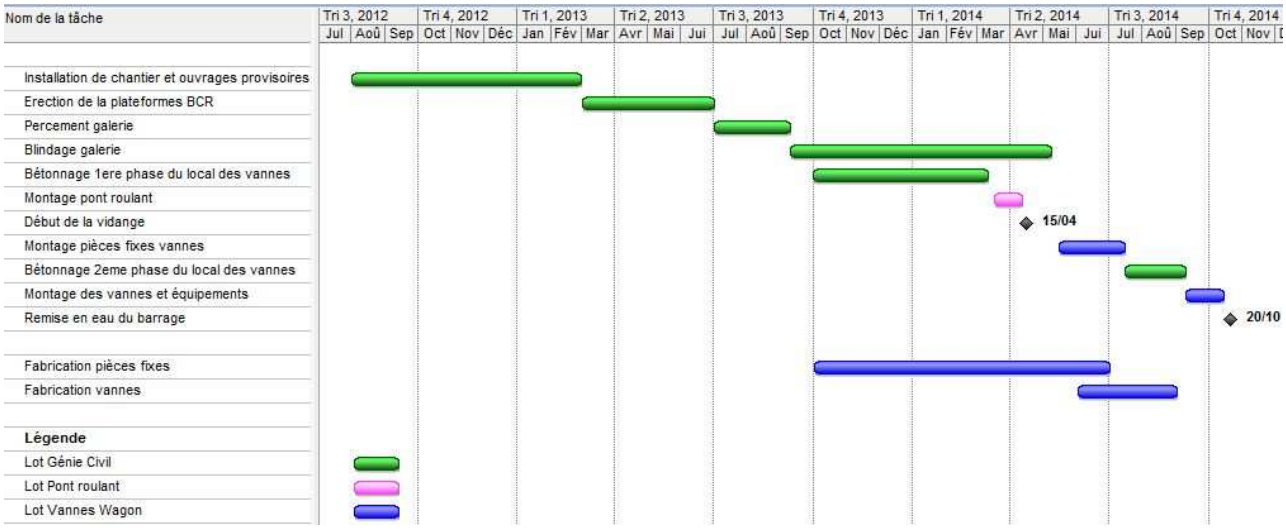
4. PLANNING

Ce projet était contraint par une forte pression planning, de la phase étude jusqu'à la mise en service de l'ouvrage. La décision de réaliser le projet et la vidange associée a été prise en juin 2011, déclenchant le début de la phase d'avant projet détaillé. Celui-ci fut validé en juin 2012. Les dossiers de consultations des entreprises furent lancés afin de commencer la phase réalisation.

La réalisation du projet peut être découpée suivants trois phases principales de travaux :

- « **Travaux préparatoires** » : Cette phase regroupe les travaux préparatoires de la nouvelle installation. Elle a été réalisée entre les mois de septembre et décembre 2012 dans le but de réaliser principalement la sécurisation de la route d'accès à l'usine de Sarrans, la sécurisation de la falaise rive gauche à l'aplomb du futur local d'exploitation et des ouvrages de dissipation, la préparation de la zone base vie avec intégration de l'éclairage, du dispositif de traitement des eaux usées, de la fourniture d'énergie et la préparation de la zone pêcherie à l'aval;
- « **Usine de Sarrans en exploitation** » : Cette phase regroupe l'ensemble des travaux ne nécessitant pas la vidange de la retenue. Elle débuta en mars 2013 et se termina à la fin du mois de mai 2014 à la fin de la vidange de la retenue pour permettre de réaliser principalement l'installation de la base vie, le terrassement et la réalisation de la plate-forme à 564,50 m NGF, la mise en place du pont d'accès à la rive gauche, la réalisation de la galerie subhorizontale (déroctage, blindage, etc.) et la réalisation du local d'exploitation, la mise en place du pont roulant et le début du montage des vannes;
- « **A sec de la retenue** » : Cette phase regroupe l'ensemble des travaux qui nécessitèrent la vidange de la retenue. Elle débuta au début du mois de juin 2014 pour se terminer à la mi octobre 2014 avant la remontée du plan d'eau pour permettre de réaliser principalement le batardage des galeries, le déroctage du puits incliné et la réalisation du béton projeté, la fin des travaux sur la galerie subhorizontale (peinture, raccordement avec le local d'exploitation, etc.), la fin des travaux sur le local d'exploitation, les travaux sur les chambres des vannes n°1 et n°2, la réalisation de la plate-forme à 572,00 m NGF et la passerelle de raccordement à l'usine, la réalisation des ouvrages de dissipation aval (canal et cuillère) et les premiers essais de requalification des vannes.

Côté mécanique, le lot principal comprenant les 2 nouvelles vannes de type « wagon sous carter » de la nouvelle vidange de fond fut attribué en mars 2013, laissant une année au Titulaire pour mener les phases d'études et de fabrication avant l'arrivée des premières pièces fixes sur site.
Entretemps, le lot GC devait avoir érigé la plateforme, creusé et blindé la galerie horizontale, bâti le local des vannes. Le pont roulant du local fit l'objet d'un marché spécifique, une fois les premiers éléments d'études des nouvelles vannes livrés.



Graphique 2 : Macroplanning de réalisation

5. CHOIX DE CONCEPTION

5.1 Prise d'eau et galerie amont

Pour permettre la réussite du projet dans la durée incompressible d'a-sec de la retenue (défini par une étude hydrologique), il a paru indispensable de réutiliser la prise d'eau et la galerie amont de la galerie de vidange de fond n°1 dans le but de minimiser les travaux à l'amont de l'ouvrage. En effet, cette stratégie permit de réaliser la majeure partie des ouvrages avec l'aménagement en exploitation et de raccorder les nouveaux ouvrages à la retenue sans réaliser de travaux importants et longs pendant la vidange.

5.2 Dimensionnement de la nouvelle galerie

A partir des hypothèses de départ (réutilisation de la dérivation provisoire, diamètre de galerie de 4,5m), le calcul a permis d'établir un optimum technique de débitance avec une section de passage de 2,8m x 3,5m. Ce calcul tient compte des pertes de charges liées au profil hydraulique de la galerie amont existante, du blindage métallique sur toute la longueur de la nouvelle galerie et du revêtement par béton projeté du puits incliné. En phase d'étude, il restait une incertitude quant au coefficient de perte de charge de la dérivation provisoire, la rugosité de celle-ci n'étant pas connue. Partant de ces hypothèses, la débitance des vannes de fond à RN a été estimée en phase d'étude à 230m³/s.

5. 3 Local des vannes

Le local qui regroupe tous les éléments mécaniques et contrôle commande de premier rang est également dimensionné pour permettre la maintenance future des 2 nouvelles vannes. Ces principales dimensions sont une hauteur maximale de 25 m pour une emprise au sol de 125 m². Ce bâtiment est relié à l'usine via une passerelle de 2.50 m de large.
L'implantation des nouvelles vannes dans le local d'exploitation implique la reprise de l'effet de fond qui s'applique sur l'ensemble rond/carré-vannes (≈ 1290 tonnes) et sur la vanne d'isolement (≈ 794 tonnes). Pour définir le moyen de reprendre ces efforts, une étude a été réalisée et montre que le local d'exploitation est stable sous l'effet de fond dû aux PHE à 647,00 m NGF, sans prise en compte de la galerie, des murs du local au-dessus de la cote 572,00 m NGF et des locaux techniques solidaires.

5. 4 Vannes wagon sous carter

Le local de vidange de fond est équipé de 2 vannes de type « wagon sous carter ». Ce type de vanne a été retenu car il répondait à l'ensemble des fonctions requises, et bénéficiait d'un avantage économique par rapport aux autres alternatives techniques.
En effet, en cas d'urgence ou en crue, la vanne wagon est adaptée du fait de son utilisation en mode "Tout ou Rien" à pleine charge, sous 81 mCE. Si une fonction de régulation était nécessaire à pleine charge, le choix se serait porté sur une vanne aval de type « secteur », qui présente les inconvénients de nécessiter des

ouvrages GC bien plus complexe en termes de reprise d'efforts dans la configuration du site et de représenter un coût beaucoup plus important. De plus, la vanne wagon permet de réguler sous faible charge, lorsque l'exploitant doit pouvoir adapter le débit évacué lors d'une vidange en fonction des taux de matière en suspension relevés à l'aval.
Le type de vanne « à glissière » a été envisagé, mais a été écarté notamment à cause du dimensionnement de la puissance de la motorisation associée.

5. 5 Vannes de vidange de culot

La nouvelle vidange de fond débitant 20 m au-dessus de l'originelle, les anciennes vannes de fond ont été partiellement remplacées pour conserver la possibilité de procéder à une vidange complète de l'ouvrage. Deux nouvelles vannes papillon manœuvrables à partir de la limite de fonctionnement des vannes wagon permettent de vidanger le culot.

6. FONCTIONNEMENT

6.1 Vidange de l'ouvrage

Avec ce nouveau dispositif, la vidange de la retenue se décompose désormais en 3 phases, selon l'abaissement de la côte de la retenue :

- Une première phase entre la RN et la CME, pendant laquelle l'abaissement se fait par les groupes de production ;
- Une fois la CME atteinte, les nouvelles vannes de fond prennent le relai jusqu'à la côte 572 m NGF, valeur légèrement supérieure au sommet de la nouvelle galerie. Pendant cette phase, le débit est réglé par la vanne de service afin de respecter les vitesses d'abaissement ;
- La dernière phase de la vidange est assurée par les vannes de vidange de culot, jusqu'à atteindre l'à sec. Ces vannes restent ensuite ouvertes afin de faire transiter les débits entrant pendant la durée de l'à sec.

Lors d'une vidange d'urgence, le nouveau dispositif de vidange de fond est sollicité à pleine ouverture, associé aux évacuateurs de crue. Il permet la baisse de moitié de la poussée hydrostatique sur le barrage en moins de 8 jours.

6.2 Évacuation des crues

Le dispositif d'évacuation de crue d'origine de l'aménagement de Sarrans est constitué de 2 passes de surface équipées de 2 vannes plates double corps (type stoney/wagon), d'une capacité de 1100 m³/s chacune. Le nouveau dispositif de vidange de fond participe également à l'évacuation des crues et porte la capacité totale de l'ouvrage de Sarrans à 2430 m3/s .

La consigne de crue définit que l'évacuation des crues est dans un premier temps réalisée par les vannes de surface jusqu'à l'atteinte d'un débit de 1000 m3/s . A partir de ce seuil, la nouvelle vanne aval de vidange de fond est ouverte complètement, en compensant par les vannes de surface afin d'éviter les variations de débit à l'aval. Dans ce mode, la nouvelle vanne aval de vidange de fond fonctionne en mode Tout ou Rien, (régulation impossible à cette charge de part la conception de la vanne – vibrations trop importantes). La régulation du débit d'eau de la crue revient donc aux vannes de surface.

6.3 Fonctions des différents matériels du nouveau dispositif de vidange de fond

Pour réaliser les fonctions demandées, le nouveau dispositif est composé d'une vanne amont et d'une vanne aval, capables de couper le débit en charge. La vanne aval est dite « de service » ; elle réalise les ouvertures à pleine charge, et la régulation en phase de vidange à charge réduite.
Les vannes amont et aval sont identiques, tant sur les aspects fonctionnels que dimensionnels. En effet, toutes deux sont capables de manœuvrer en charge, que ce soit à l'ouverture ou à la fermeture. Cette fonctionnalité commune est motivée par des considérations de sûreté, car en cas de défaillance ou d'indisponibilité de la vanne aval de service, la vanne amont doit pouvoir suppléer la vanne de service.
La vanne amont, dite « de garde », est butonnable en position haute et isolable de la conduite en pression grâce à un clapet d'isolement, rendant ainsi possible la maintenance de la vanne hors vidange.

Les 3 organes (vanne amont, vanne aval et clapet) sont chacun manœuvrés par un vérin, alimenté par une centrale oléo-hydraulique commune.
Le by-pass de la vanne amont permet d'admettre l'eau de la galerie amont entre la vanne amont et aval (toutes deux en position fermée) afin de remettre en charge la vanne aval. Sans by-pass, il faudrait faiblement ouvrir la vanne aval, créant une lame d'eau dont la vitesse importante dégraderait inévitablement les étanchéités.

6.4 Maintenabilité

La maintenance de ces matériels nécessite leur manutention, réalisée dans le local par un pont-roulant d'une capacité de 30 tonnes.
La procédure de maintenance consiste à :

- Isoler la vanne du circuit en pression ;
- Déboulonner le plancher bouchon ;
- Lever l'ensemble vérin-plancher bouchon-vanne ;
- Monter des étriers sur la vanne permettant de reprendre son poids au sol pour désaccoupler le vérin de la vanne et stocker sur un châssis l'ensemble vérin-plancher bouchon.

La vanne peut ensuite être sortie de son carter pour être positionnée sur le plancher entre les carters amont et aval. L'espace disponible dans le local entre les planchers bouchons des 2 carters permet de réaliser les travaux de maintenance nécessaires, notamment de confiner la vanne dans le but de procéder à un sablage et une remise en peinture en place, de changer les joints, etc. ...
Pour la vanne amont, la procédure d'isolation du circuit amont revient à fermer le clapet d'isolement et à le verrouiller en position, mettre le carter supérieur à l'échappement afin de casser la pression et obtenir un plaquage optimal pour minimiser les fuites, et vidanger le carter tout en captant les fuites résiduelles.
Un plancher bouchon de maintenance est monté sur la bride du carter afin de remettre en service le dispositif de vidange de fond, et ainsi pouvoir faire face à une situation d'urgence.

7. REALISATION

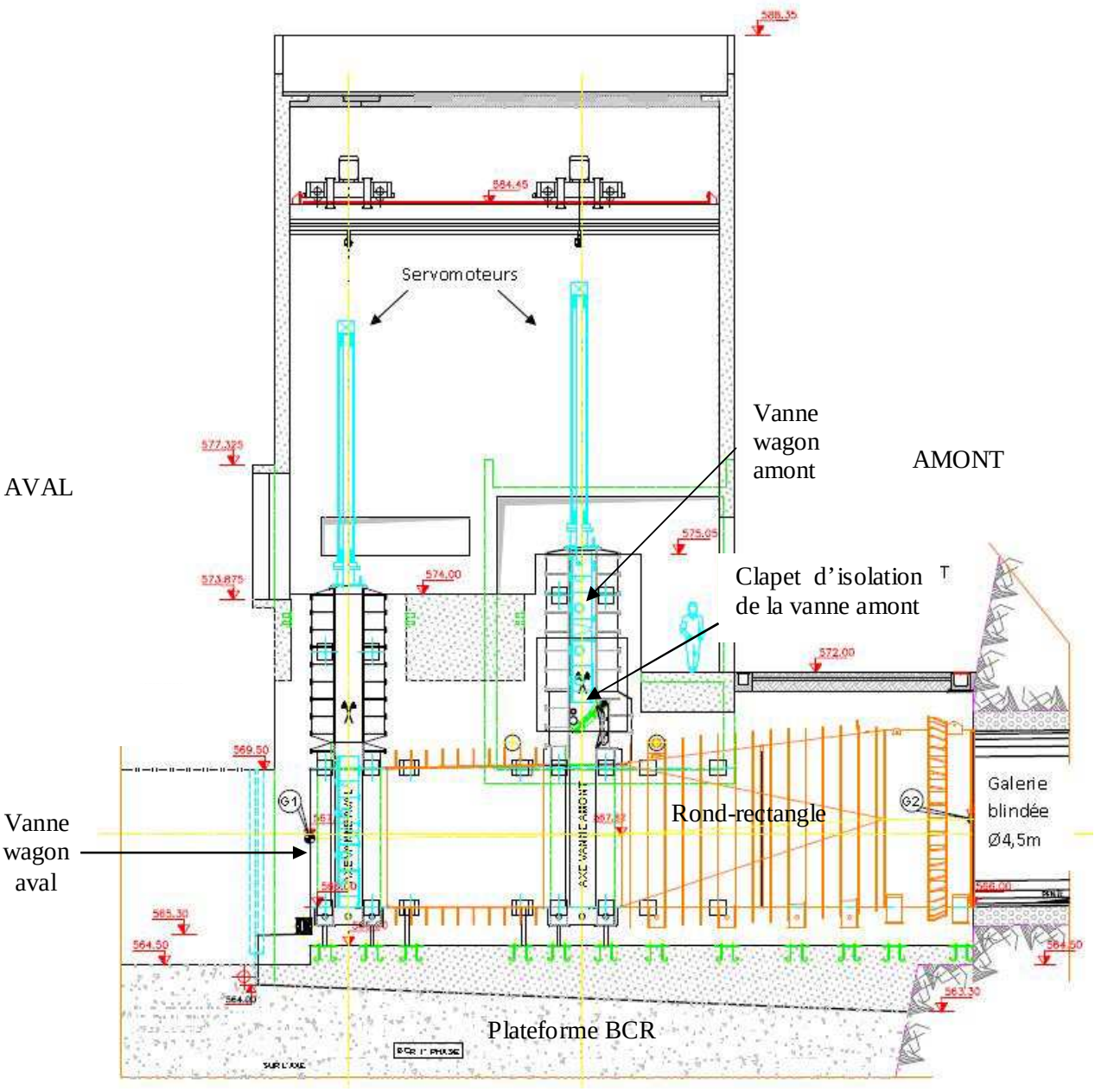
7.1 Lot Nouvelles vannes de vidange de Fond

7.1.1 Périmètre

Le lot mécanique principal consistait à étudier, fabriquer et installer sur site :

- Une virole butée de reprise de l'effet de fond réalisant l'interface avec le conduit amont blindé,
- Un rond-rectangle réalisant l'interface entre le conduit amont blindé de diamètre ø 4,5 m et la section de passage des vannes 2,8 m x 3,5 m,
- Les carters métalliques amont et aval,
- Le conduit métallique intermédiaire,
- Les vannes amont et aval et leur motorisation par vérin oléo-hydraulique,
- Le clapet d'isolement de la vanne amont,
- Le circuit by-pass de la vanne amont.

Ce lot a été attribué en mars 2013 à la société Alstom, qui sous-traita la fabrication des pièces fixes à la société Carchi (St Chamond, France), les vannes à la société Pemel (Porto, Portugal) et les vérins à la société Douce Hydro (Albert, France).



Graphique 3 : Coupe Amont-Aval du nouveau local de vidange de fond

7.1.2 Pièces fixes (blindage – carters)

Les pièces fixes ont été réalisées en 8 sous-ensembles, principalement pour s'affranchir des problématiques de gabarits routiers, les accès à l'usine de Sarrans étant limités. En partant de l'amont, la virole butée de diamètre 4,5 m est soudée sur la dernière virole d'épaisseur 16 mm constituant le blindage du conduit amont.

Cette pièce a pour but de transmettre l'effet de fond au bâtiment, dont la stabilité est assurée par son propre poids. Vient ensuite le rond-rectangle, pièce réalisant l'interface entre la virole butée circulaire et le carter métallique amont inférieur rectangulaire de hauteur 3,5 m et de largeur 2,8 m. Le rond rectangle faisant plus de 6 mètres de long, celui-ci a été scindé en 2 éléments. Le carter amont est composé d'une partie inférieure comprenant le logement du clapet d'isolement de la vanne amont, et d'une partie supérieure. Un conduit métallique intermédiaire d'une longueur de 4 m lie les carters amant et aval.

Toutes ces pièces sont autoporteuses, c'est-à-dire qu'elles résistent à la pression intérieure sans participation du béton qui les entoure. Ce sont des assemblages mécano-soudés, réalisés en tôles d'acier non allié de type « S355J2+N ». Leur fabrication a bénéficié d'un suivi particulier depuis l'approvisionnement matière, jusqu'à l'assemblage sur site. Les certificats matières ont été contrôlés pour chacune des tôles utilisées, ainsi

que les PV de contrôles volumiques des tôles par ultrasons. Une étude de sensibilité à l'arrachement lamellaire a validé la qualité Z15, 25 ou 35 des tôles soudées en angle et soumis à la pression.

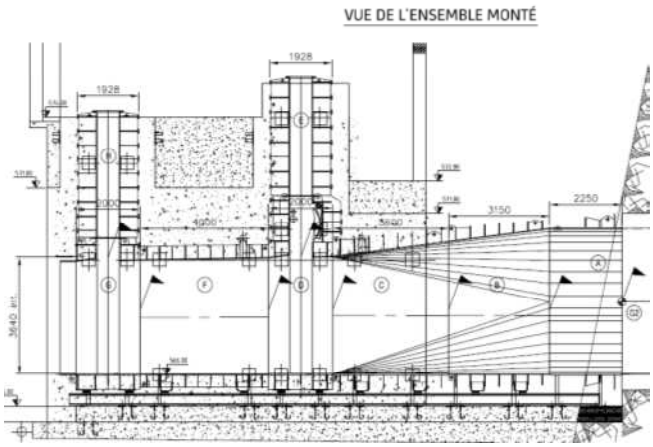
Les soudures réalisées en atelier ont été contrôlées par examen macrographique, tests de dureté, essais de résilience dans le métal fondu et dans la zone affectée thermiquement, essais de flexion par choc, essais de traction, essais de pliage, ressuage et radiographie (pour les soudures pleine pénétration).

Les soudures réalisées sur site pour l'assemblage des différents éléments sont des soudures « sur latte » de tôles de 25 mm d'épaisseur, sauf entre les carters inférieurs et supérieurs qui sont des soudures bout à bout avec reprise envers de tôles de 30 mm d'épaisseur. Les procédés de soudage ont été qualifiés préalablement à la mise en œuvre, avec l'établissement de coupons témoins.

Le soudage des carters inférieurs et supérieurs a présenté de sérieuses difficultés au niveau des plats de roulement. En effet, les éléments inférieurs sont en acier inoxydable martensitique soudés sur une tôle d'acier non allié de type « S355J2+N », alors que les plats éléments supérieurs sont en acier inoxydable austénitique type « 316L ». Cette soudure hétérogène à triple matériaux a été difficilement maîtrisée, et a nécessité de nombreuses reprises et un suivi particulier. De plus, les contrôles volumiques associés n'ont pas été catégoriques sur la qualité de la soudure finale. Une note de calcul a dû être rédigée pour vérifier la tenue de la soudure en cas de défaut.



Graphique 4: Montage à blanc en atelier



Graphique 5: Vue en coupe des pièces fixes

7.1.3 Vannes

Les vannes ont été réalisées au Portugal, dans les ateliers de la société PEMEL. Elles sont constituées de deux boggies de deux galets par côté, liés par une tôle de bordé unique de 30 mm d'épaisseur conférant la souplesse nécessaire pour que le système ne soit pas hyperstatique et que l'effet de fond soit réparti sur chaque galet. Les galets usinés dans des bruts d'acier faiblement allié 42CrMo4, sont bombés pour assurer une surface de contact permanente, indépendante de la flexion de la vanne qui est fonction de la charge amont. Des galets de contre-guidage amont et latéraux garantissent le maintien de la vanne dans l'axe du carter. La protection anticorrosion est composée d'une métallisation et d'un système résistant à l'abrasion par des eaux chargées (peinture époxy).

A l'instar des pièces fixes, les vannes sont réalisées à partir de tôles en acier non allié de type « S355J2+N » et ont bénéficié du même suivi de fabrication. Leur masse de 16 tonnes leur confère la capacité de coupure du débit à pleine charge gravitairement.



Graphique 6: Fin de montage d'une vanne en atelier

7.1.4 Contrôle-commande

Toutes les fonctionnalités d'exploitation et de maintenance du dispositif de vidange de fond sont réalisables depuis le nouveau local par l'armoire électrique fournie par le Titulaire :

- commande de la vanne aval,
- commande de la vanne amont,
- commande du clapet d'isolement de la vanne amont.

Le nouveau dispositif de vidange de fond participant à l'évacuation des crues, celui-ci est également commandable depuis le local de crue situé sur le couronnement du barrage.
Le tableau suivant décrit les différents modes de fonctionnement et les possibilités associées selon la sélection du mode sur l'armoire de commande du local de vidange de fond.

MODES DE FONCTIONNEMENT	POUR LA VANNE AMONT	POUR LA VANNE CLAPET	POUR LA VANNE AVAL
LOCAL (depuis l'armoire de commande locale)	Ce mode est utilisé pour les fonctionnements en essai ou en vidange. Les commandes permettent de réaliser des ouvertures / fermetures totales avec auto-maintien des ordres.	Les commandes permettent de réaliser des ouvertures / fermetures sans auto-maintien des ordres	Ce mode est utilisé pour les fonctionnements en essai ou en vidange. Les commandes permettent de réaliser des ouvertures / fermetures partielles avec ou sans auto-maintien des ordres.
DISTANCE (depuis le pupitre existant du local de crue)	*Mode de fonctionnement impossible*	*Mode de fonctionnement impossible*	Ce mode est utilisé en période de crue. Les commandes du pupitre du local de crue permettent de réaliser une ouverture ou fermeture totale avec auto-maintien des ordres
ARRÊT	Ce mode interdit toutes les manœuvres des vannes en mode local et distant pour la vanne aval et éteint les signalisations		

Tableau 1: Modes de fonctionnement des matériels

En exploitation courante, le dispositif de vidange de fond est dans la configuration suivante :

- Vanne aval fermée,
- Vanne amont ouverte et butonnée,
- Clapet effacé (ouvert), verrou engagé.

Cette configuration répond aux situations d'urgence et à la nécessité de solliciter rapidement le dispositif de vidange.

7.1.5 Commande depuis le local de crue

La commande à distance de la vanne aval en crue est gérée en fonction « transfert de débit », c'est-à-dire une ouverture totale en auto maintien des ordres pendant que l'exploitant referme manuellement les vannes de surface de l'évacuateur de crue à l'aide de temporisations l'aidant à maintenir le débit évacué du barrage constant. Toutes ces actions sont réalisées depuis le pupitre dans le local de crue.

L'armoire électrique de commande du local de vidange de fond est munie d'un commutateur de mode local ou distant, empêchant les manœuvres intempestives depuis le local de crue si le mode distant n'est pas actionné. En état de veille, l'exploitant sait si la vanne de fond est manœuvrable depuis le local de crue grâce à un voyant. Ainsi, il peut mettre l'installation en configuration si tel n'est pas le cas afin de pouvoir passer la crue avec tous les organes disponibles.

Les fonctionnalités depuis le local de crue sont limitées afin de réduire le facteur humain, en empêchant une confusion des actionneurs lors de manœuvres en crue dont l'occurrence est extrêmement faible. Ainsi, l'exploitant ne peut manœuvrer que la vanne aval, mais dispose de la position des vannes amont et aval. Si les informations de position laissent à penser qu'un disfonctionnement est survenu (perte de la position, incohérence par rapport à l'ordre demandé, ou tout autre défaut), un agent exploitation doit se rendre dans le local de vidange pour diagnostiquer l'origine du problème (disfonctionnement du capteur, blocage de la vanne, disfonctionnement de la motorisation) pour prendre la bonne décision.

7.1.6 Alimentations

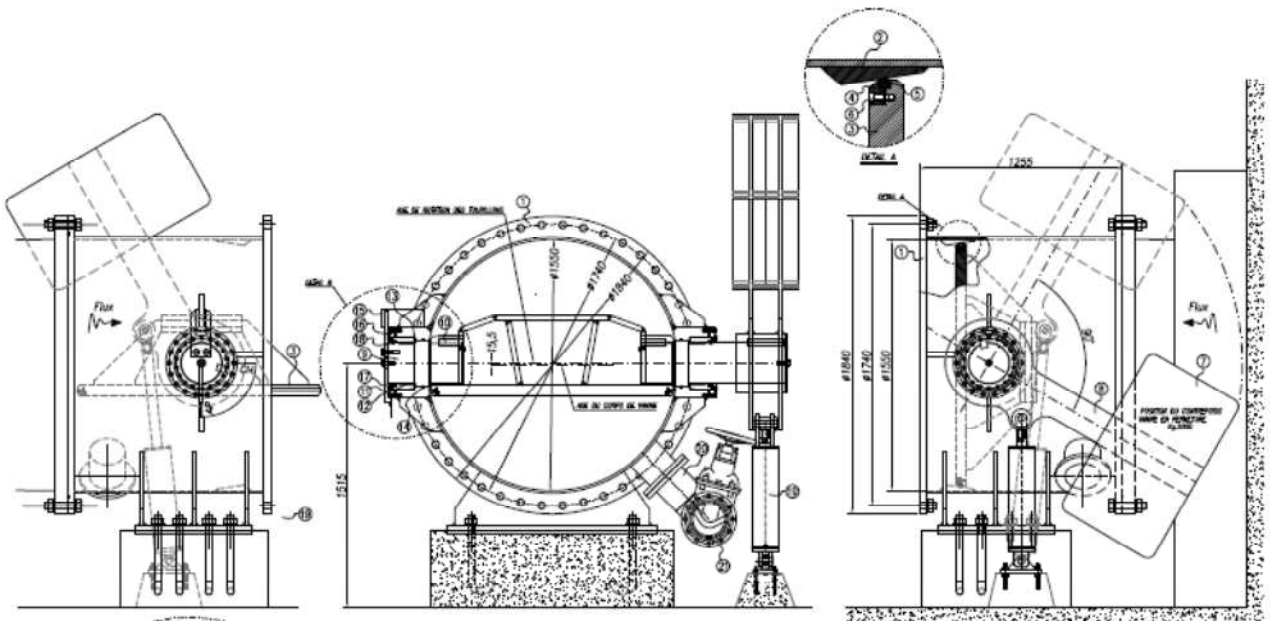
L'alimentation principale de l'armoire électrique et de la centrale hydraulique est pourvue par l'usine. La passerelle d'accès au local dispose de deux chemins de câbles distincts séparés physiquement, sur lesquels cheminent les alimentations normale d'un côté et secourue de l'autre. L'alimentation secours est assurée par le groupe électrogène barrage, situé dans le local de crue, qui alimente également les commandes des vannes de surface de l'évacuateur de crue. Le démarrage du groupe électrogène se fait sur perte de tension Normale TGBT Barrage et/ou perte de tension Normale VDF.

En cas de défaillance de l'alimentation secourue, un raccord hydraulique est prévu sur la centrale hydraulique permettant d'accoupler une motopompe thermique capable de réaliser la manœuvre d'ouverture de vanne requise.

7.2 Vannes de vidange de culot

Le second lot mécanique consistait à étudier, fabriquer et installer sur site deux vannes de type papillon de 1,5 m de diamètre, et de déposer le dispositif de vidange originel. Celui-ci utilisait les 2 dérivations provisoires. Chaque dérivation était obstruée par un bouchon béton traversé par 2 conduits métalliques de diamètre 1,50 m, chacun équipé de 2 vannes papillon en série. Ces 8 vannes d'origine connaissaient une dégradation de leur étanchéité au niveau de la lentille, engendrant un débit de fuite pénalisant. Le nouveau dispositif de vidange de fond étant créé, ces matériels n'ont plus vocation à vidanger l'ouvrage en urgence ou lors de vidanges réglementaires. Leur seule fonction est donc de vidanger le culot de la retenue, entre les côtes 572 m NGF et 560 m NGF.

Les 8 vannes ont donc été déposées lors de la vidange, pour être partiellement remplacées. Étant donné la très faible périodicité d'utilisation de ce dispositif de vidange du culot, celui-ci se limite à 2 vannes papillon neuves, une par conduit dans le local n°1. Des fonds-pleins obturent désormais les conduits du local n°2, afin de pouvoir réutiliser les conduits au cours d'une prochaine vidange.



Graphique 7 : Plan des nouvelles vannes papillon.

8. ESSAIS DE QUALIFICATION

8.1 Programme d'essais des nouvelles vannes de vidange de fond

L'objectif des essais de qualification des nouveaux matériels était de valider la capacité de chacun des matériels à remplir ses fonctions dans les différents cas d'exploitation envisagés. Ainsi un programme d'essais a été établi, et reproduit à plusieurs cotes amont du barrage.

La séquence d'essais suivait le déroulement ci-après :

- Fermeture du clapet isolement vanne de garde en eau morte
- Vidange carter haut de la vanne de garde et constat du débit de fuite, carter vidangé.
- Remplissage du carter haut de la vanne de garde
- Ouverture clapet
- Fermeture vanne de garde en eau morte
- Ouverture vanne de garde en eau morte
- Verrouillage de la vanne de garde en position haute
- Ouverture vanne de service
- Fermeture vanne de service
- Fermeture vanne de garde
- Vidange du carter intermédiaire entre les 2 vannes par ouverture partielle de la vanne de service
- Ouverture vanne de garde en charge
- Fermeture vanne de garde en charge
- Déverrouillage de la vanne de service
- Fermeture vanne de service hors d'eau
- Équilibrage par remplissage de la chambre entre les 2 vannes, au moyen du by-pass
- Ouverture vanne de garde
- Verrouillage de la vanne sur ces crochets

A l'issue de cette séquence, les matériels étaient déclarés fonctionnels et mis en exploitation jusqu'à l'atteinte de la prochaine cote d'essai.

8.2 Cotes d'essais

Afin de s'assurer de la manœuvrabilité des vannes et du clapet d'isolement au cours du remplissage, 4 campagnes d'essais ont été programmées, à des intervalles d'environ 20m de charge. Ce principe permettait de valider l'intégralité des fonctionnalités (régulation entre 572 et 596 m NGF, ouverture/fermeture à pleine

charge, etc…), mais également de constater du comportement des matériels (vibration, cavitation, temps de manœuvre) et des phénomènes hydrauliques (lame d'eau dans le canal, profil du jet, etc…)
Les premiers essais ont été réalisés à la cote 572 m NGF, correspondant à la limite de fonctionnement du dispositif de vidange de fond.
La seconde campagne a été menée à 596 m NGF, cote limite de régulation.
La suivante eut lieu à 621 m NGF. Cette cote ne correspond à aucun seuil fonctionnel, mais faisait figure de palier intermédiaire avant d'atteindre la cote de retenue normale (RN).
Les essais de qualification finaux eurent lieu à 642m NGF, et permirent de vérifier les dernier cas de chargement des vannes et de valider l'intégralité des fonctionnalités du dispositif de vidange de fond.

8.3 Mesures de débitance

Au regard des fonctions du nouveau dispositif de vidange de fond (vidange de la retenue et évacuation des crues), il était nécessaire de fournir à l'exploitant un abaque de débitance fiable, ne se limitant pas à des valeurs théoriques basées sur le calcul. Des mesures physiques ont donc été menées aux différentes cotes précédemment citées. Pour des raisons de sécurité, ces mesures ont été exécutées après avoir qualifié fonctionnellement les matériels.

Les caractéristiques des nouvelles vannes ne permettent pas de procéder à une instrumentation directement à l'intérieur de la galerie de vidange de fond. En effet, le profil de la galerie est très perturbé avec des alignements droits très courts, et des changements de direction horizontaux et verticaux. L'écoulement dans la galerie est donc trop perturbé pour instrumenter des points de mesure de pression dans la galerie.
Par ailleurs, une instrumentation pour ultrason ou micro-moulinets installés directement dans la galerie n'est pas possible car la vidange de fond est enterrée et donc inaccessible après la mise en eau.
Des mesures de débit en rivière à l'aval du barrage de Sarrans se sont donc imposées. Afin de corroborer ces premières mesures, des mesures de capacité par remplissage de la retenue aval ont été réalisées. Cette technique consiste à mesurer le temps de remplissage d'un volume donné. Dans le cas présent il s'agissait d'effectuer un calcul de variation de réserve à la retenue de La Barthe (à l'aval direct de Sarrans), en maintenant l'usine de Brommat à l'arrêt et en fermant les organes évacuateurs de crue de La Barthe pendant un temps donné. On obtient ainsi le débit sortant à Sarrans par les vannes de fond, aux apports intermédiaires près, connus de l'exploitant.
Il est nécessaire de réaliser à minima 3 mesures pour établir un abaque de débitance exploitable. Ainsi, les 4 essais menés au cours du remplissage de la retenue de Sarrans permettaient d'améliorer le modèle avec un point de fonctionnement supplémentaire.
Les différentes mesures réalisées lors des derniers essais à pleine charge font état d'une débitance de 250 m^3/s, soit une valeur de débit supérieure de 20 m^3/s aux projections issues de l'avant projet détaillé.

8.4 Résultats / Observations

Les mesures des temps de manœuvre à l'ouverture des vannes amont et aval sont conformes aux spécifications (10 min pour la vanne aval, 12 min pour la vanne amont). Les temps de manœuvre à la fermeture dépendent de la charge amont et sont également conformes aux attendus.
Lors des manœuvres, les pressions du circuit oléo-hydraulique ont été enregistrées, notamment dans les chambres des vérins afin d'identifier d'éventuels efforts de manœuvre anormaux. Ces mesures n'ont décelé aucun point dur néfaste au fonctionnement.
Les mesures vibratoires sur les planchers bouchon sont correctes. Toutefois, on observe sur une faible course (dizaine de centimètres) un niveau sonore important au ¾ d'ouverture de la vanne, assimilable à des bruits de cavitation.
On observe également un passage en dépression des carters supérieurs lorsque la vanne sort de la section de passage. Ce phénomène n'est pas préjudiciable au dispositif, car les carters sont dimensionnés à la dépression.
D'un point de vue hydraulique, le comportement de la lame d'eau dans le canal est en écart par rapport à l'attendu basé sur le modèle réduit élaboré en phase avant-projet. Cela est dû à la modélisation trop simpliste n'ayant pas pris en compte le profil des rainures du carter aval. De même, ne disposant pas du profil du couteau de vanne en phase avant projet, les modélisations d'ouvertures partielles n'ont pas été réalisées. Ainsi, la longueur du jet a été sous-évaluée lors des faibles ouvertures, car le poids de la lame d'eau est moindre qu'à la pleine ouverture. Hormis ce comportement transitoire, le jet à pleine ouverture est correct.

En conclusion, les résultats observés sur l'ensemble des matériels lors des différents essais sont très satisfaisants, et le nouveau dispositif remplit les objectifs attendus en termes de débitance.



Graphique 8 : Essais de qualification à 643,00 m NGF.



Graphique 9 : Essais de qualification à 643,00 m NGF, vue du couronnement.

REMPLACEMENT DES CLAPETS DE MAUZAC

Replacement of Mauzac dam flap gates

Pierre, M., GRENOUILHAT
18 avenue Poincaré, 19311 Brive-la-gaillarde
pierre.grenouilhat@edf.fr

MOTS CLÉS

MAUZAC, clapet, interfaces génie civil – mécanique, ouvrages provisoires

RÉSUMÉ

Les 2 clapets du barrage de Mauzac, mis en service en 1952, présentaient de fortes dégradations. Suite à plusieurs expertises menées en 2007 et 2008, il a été décidé de remplacer ces 2 clapets par 2 clapets neufs disposant de nouvelles fonctions. Le chantier de remplacement, réalisation des ouvrages provisoires compris, s'est déroulé de Mars à Décembre 2013 pour une mise en service des clapets en Avril 2014 qui a donné satisfaction.

ABSTRACT

The two Mauzac dam flap gates, installed in 1952, were really degraded. Following several expertises done in 2007 and 2008, the decision was made to replace these two flap gates by two others flap gates with new functions. The replacement site, including achievement of provisional works, took place from March to December 2013 for a commissioning in April 2014.

1. INTRODUCTION / RESUME

Le barrage de Mauzac, sur la Dordogne, dispose de 10 évacuateurs de crue de 3 types différents (3 vannes STONEY, 5 vannes toit et 2 clapets). Deux expertises menées sur les clapets en juillet 2007 et en janvier 2008 ont permis de constater un certain nombre de désordres sur ces derniers (forte corrosion, déformation des bordés, usure des systèmes de manœuvre, etc. ...). Au vu de ces constats, il a été décidé de remplacer les clapets existants par 2 nouveaux clapets permettant d'assurer en plus de leur fonction d'évacuation de crue et d'évacuation d'embâcles, une fonction de passage du débit réservé et une fonction de régulation du plan d'eau.

Afin d'assurer ces 2 nouvelles fonctions, les 2 nouveaux clapets ont été motorisés par des vérins oléohydrauliques (un par clapet), ces derniers se trouvant dans la pile rive gauche de chaque clapet, là où auparavant, se trouvait un contrepoids béton, qui assurait une ouverture et une fermeture des clapets en tout ou rien sans énergie.

Le remplacement des clapets a dû également s'accompagner de forts travaux génie civil sur les seuils des passes correspondantes. L'ouvrage avait en effet subi de multiples rehausses (barrage initial datant de 1850, rehausse en 1920 et installation des clapets en 1950) et présentait une hétérogénéité très pénalisante pour la tenue des nouveaux clapets et des passes elles-mêmes. Les études de dimensionnement des nouveaux seuils ont donc nécessité de nombreux aller-retour avec les études de dimensionnement des clapets, notamment concernant les descentes de charges engendrées par ces derniers.

2. DESCRIPTION DE L'AMENAGEMENT ET DES CLAPETS OBJET DU PRESENT DOCUMENT

2.1 L'aménagement de Mauzac

L'aménagement de Mauzac est composé d'amont en aval des ouvrages suivants :

- Un barrage mobile d'environ 350 mètres de long

Ce barrage mobile, d'une capacité d'évacuation de 2000 m3/s à RN est composé des organes suivants :

- 3 vannes Stoney d'une capacité unitaire d'évacuation de 300 m3/s ,
- 5 vannes toit d'une capacité unitaire d'évacuation de 200 m3/s chacune,
- 2 clapets de surface d'une capacité unitaire d'évacuation de 50 m3/s chacun,
- De 4 seuils déversant à la cote RN.

- La prise d'eau alimentant le canal d'amenée de l'usine est située en rive gauche.

- Un canal d'amenée

Le canal d'amenée, d'une longueur de 960 m, relie le barrage à l'usine. Il est équipé à l'aval d'un clapet de défeuillage d'une capacité d'évacuation de 80 m3/s .

- Une usine

La centrale est composée de 6 groupes de production (5 turbines Francis et 1 turbine Kaplan).

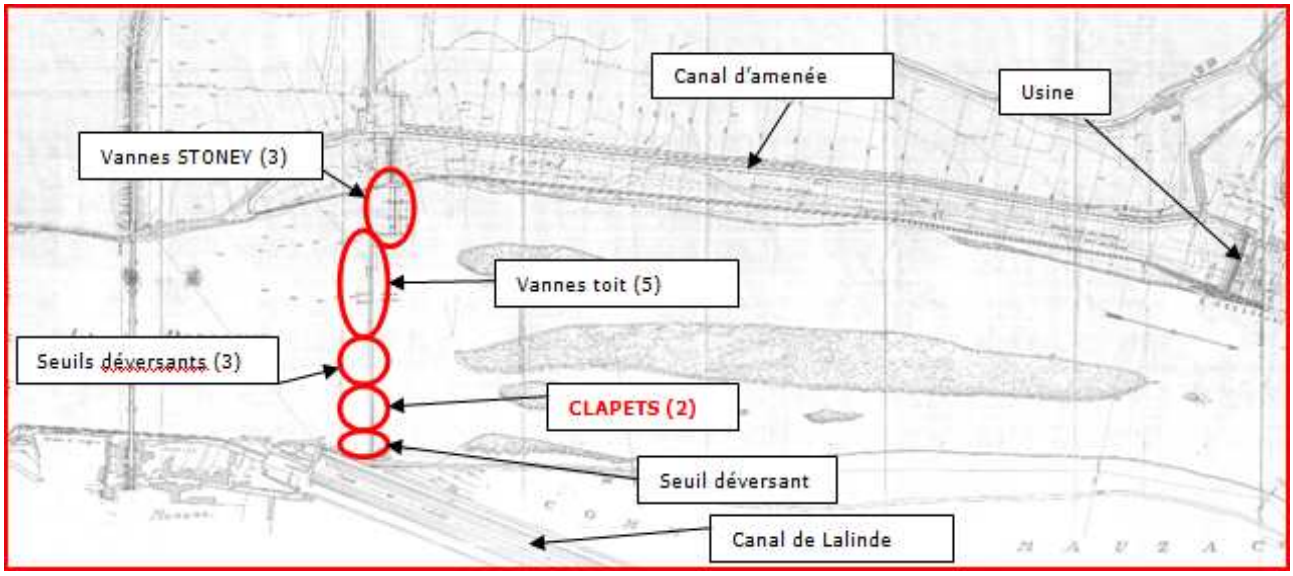


Figure 1 : Plan masse global de l'aménagement de Mauzac

2.2 Les anciens clapets

Les 2 clapets étaient situés quasiment en rive droite du barrage de Mauzac, près du canal de Lalinde. Seul un seuil déversant se situe entre la rive droite et les 2 clapets.

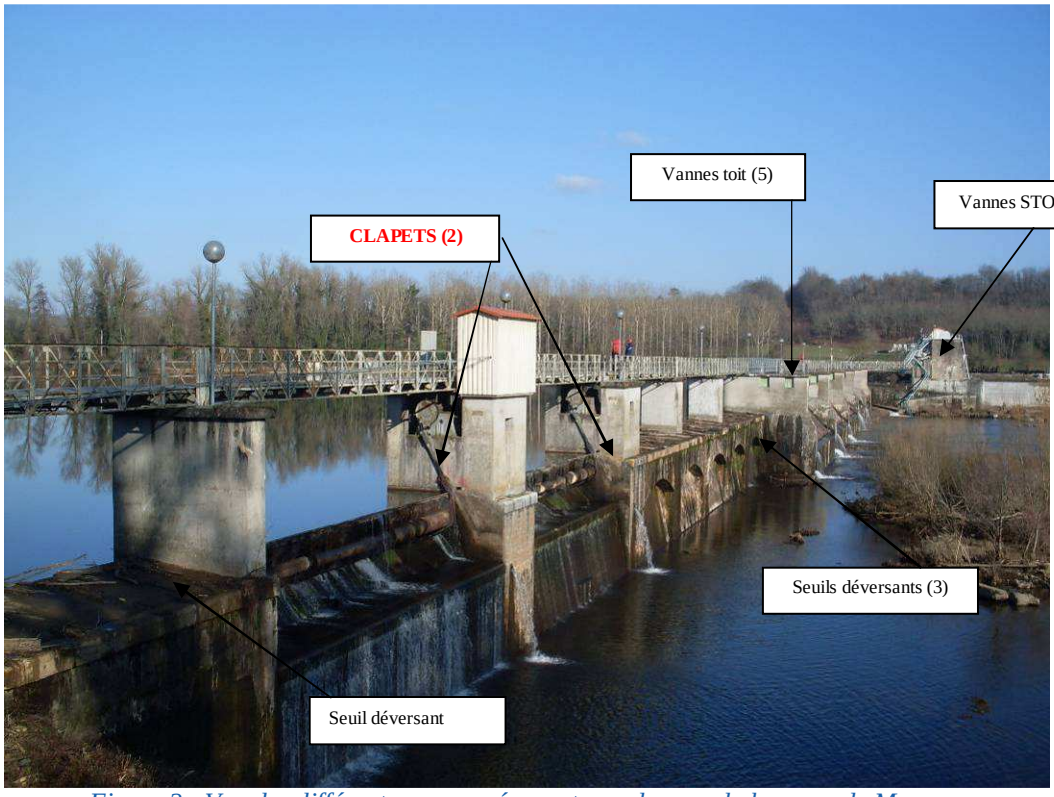


Figure 2 : Vue des différents organes évacuateurs de crue du barrage de Mauzac

Les 2 clapets étaient de conception identique. Les tabliers étaient de fabrication mécano-soudée. Ils étaient fixés sur le seuil du barrage par un axe articulé. Chaque clapet faisait 15 m de longueur et 1,50 m de hauteur pour une masse estimée à environ 7 tonnes.
Ces clapets étaient manœuvrés par à un contrepoids situé dans la pile rive gauche de chaque clapet. Ce contrepoids était relié à une extrémité du tablier par l'intermédiaire d'une brimbale, d'un câble et d'une poulie de renvoi et permettait de maintenir le clapet fermé quelle que soit la hauteur d'eau amont.
Pour ouvrir un clapet, la pile gauche contenant le contrepoids était remplie d'eau par l'intermédiaire d'une vanne d'amission amont. L'eau montait alors dans la pile et le contrepoids était « allégé » par l'effet de la poussée d'Archimède ; le clapet basculait alors et s'affalait sur le seuil sous l'effet de la poussée hydraulique.
Pour la refermeture du clapet, la vanne d'admission de la chambre d'eau était fermée et la vanne d'échappement aval était ouverte. La pile rive gauche se vidait alors et le contrepoids assurait la fermeture du clapet.





Figure 3 : Vue des différents éléments reliant le clapet au contrepoids (brimbale, poulie de renvoi, axe, câbles d'attache)

3. LE REMPLACEMENT DES CLAPETS – DONNEES D'ENTREE DE L'OPERATION

Les données d'entrée de l'opération, permettant de définir la conception des clapets, étaient principalement :

- Le fonctionnement attendu des futurs clapets,
- L'état du génie civil au niveau des passes des clapets.

3.1 Le fonctionnement des futurs clapets

A la demande de la Maitrise d'Ouvrage, les fonctions à assurer par les 2 nouveaux clapets étaient les suivantes :

- Dès leur mise en service :
  - Une fonction « Évacuation des crues » identique à celle existante (ouverture complète des clapets réalisée manuellement en local par un opérateur),
  - Une fonction « Évacuation des embâcles » différente de la fonction actuelle. Les clapets devaient pouvoir être positionnés manuellement en ouverture partielle, sur une plage de niveau amont allant de RN à RN - 80cm, pour la réalisation des chasses en rive droite devant la prise d'eau du canal de Lalinde.
- A moyen terme :
  - Une fonction régulation « du plan d'eau » : les clapets devront pouvoir assurer la régulation du plan d'eau en étant intégrés dans le pilotage automatique du barrage. A ce titre les clapets et leurs organes de manœuvre devaient donc être dimensionnés pour supporter de fréquentes manœuvres.
  - Une fonction « Passage du débit réservé » : les clapets devront pouvoir assurer le passage du débit réservé de l'aménagement de la cote RN à la cote RN-20 cm.

3.2 L'état du génie civil de l'ouvrage au niveau des passes clapets

Le remplacement des clapets devaient s'accompagner notamment du remplacement des pièces fixes de seuil. Dans ce contexte, des recherches sur l'historique de l'aménagement et des sondages (par carottage) ont été effectués en début d'opération pour connaître l'état du génie civil au niveau des passes clapets.

3.2.1 Historique de l'ouvrage

Le barrage "primitif" (traits rouge sur le schéma ci-dessous) a été construit au milieu du 19ème siècle, il est constitué de blocs d'enrochement d'assez gros diamètre, semblable à un béton cyclopéen. En 1920, une surélévation du barrage a été effectuée en ajoutant un nouveau seuil et une recharge aval (traits vert). En 1950, le barrage a de nouveau été surélevé, cette fois ci par adjonction de clapets automatiques, dans les passes qui nous concernent (trait bleu). La démolition du béton de 1920 avait alors été entreprise pour construire le seuil du clapet. La cote de seuil du clapet était inférieure à la cote du seuil construit en 1920. Ce n'était donc pas une simple superposition, mais une substitution partielle. Le schéma ci-dessous montre cette superposition de couches au niveau d'une des passes fixes situés à côté des passes clapets.

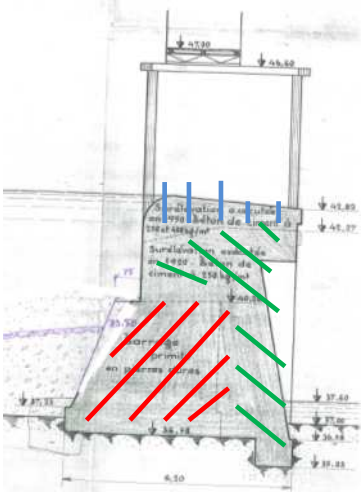


Figure 4 : Vue des surélévations successives de l'ouvrage au niveau des passes fixes et des passes clapets

3.2.2 Résultats des carottages

Les résultats des carottages effectués au niveau des passes clapets ont révélé une qualité du béton 1920 totalement insuffisante pour reprendre des efforts apportés par des nouveaux clapets : le béton 1920 était en effet localement totalement dépourvu de liant, qui semblait avoir été le siège d'importantes venues d'eau.

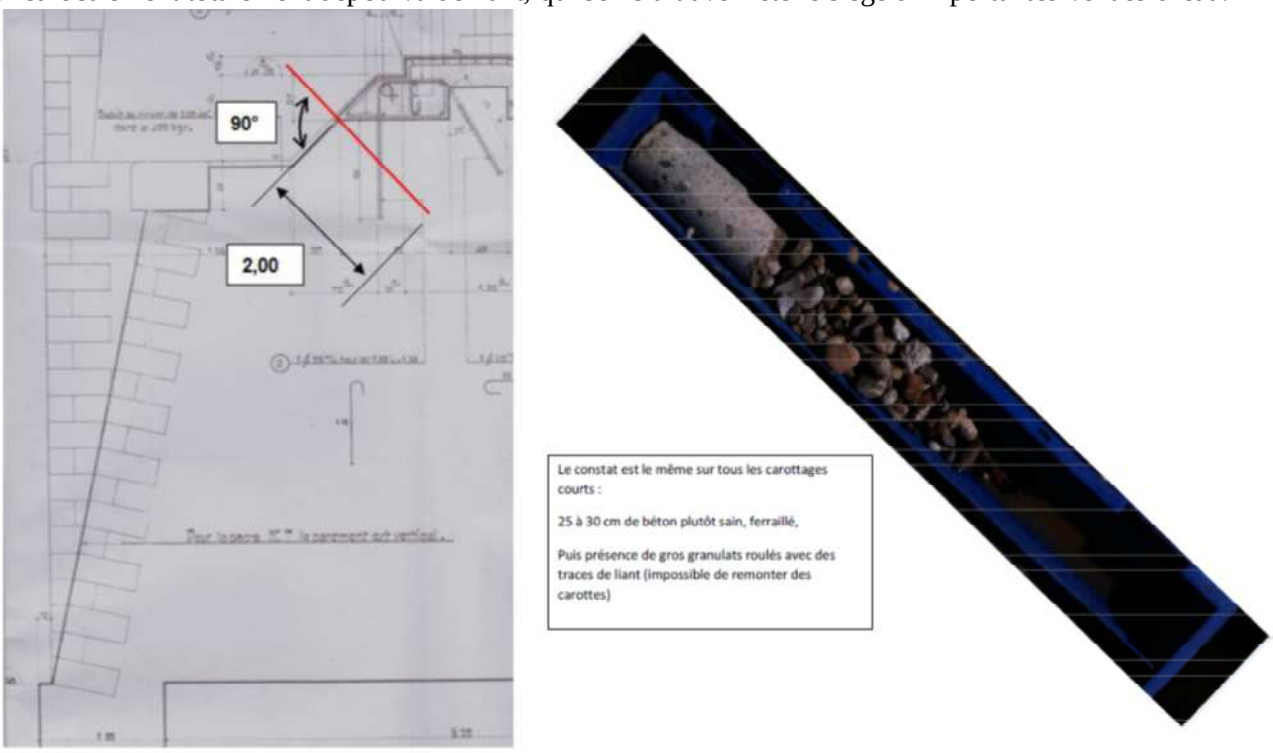


Figure 5 : Vue du résultat d'un des carottages (à droite)

4. LA CONCEPTION DES CLAPETS

La conception suivante a été retenue pour les 2 nouveaux clapets :

- Tablier des clapets
  - Dimensions : 15 m de large, 2 m de haut ; Poids : 7 Tonnes. Les nouveaux clapets venaient en remplacement des clapets précédents ; leurs dimensions et leur poids sont donc quasiment identiques aux précédents : la largeur est la même et leur hauteur a été allongée d'une quinzaine de centimètres de manière à se prémunir des phénomènes de batillage,
  - Bordé amont de forme arrondie renforcé par 13 raidisseurs verticaux et un tube rigide. Une forme arrondie a été donnée aux clapets de manière à obtenir un meilleur écoulement (pas de profil Creager néanmoins car l'optimisation du débit n'est pas la recherche principal pour ces organes),
  - Étanchéités latérales frottant sur bajoyers inox. Des bajoyers inox ont été installés sur les bajoyers bétons. Ce choix avait pour but d'assurer une meilleure étanchéité et de préserver l'état des joints dans la durée,
  - 7 paliers d'articulation. Ce choix avait été laissé à la main du Titulaire du lot hydromécanique. Les conséquences de ce choix de conception sont précisées ultérieurement.

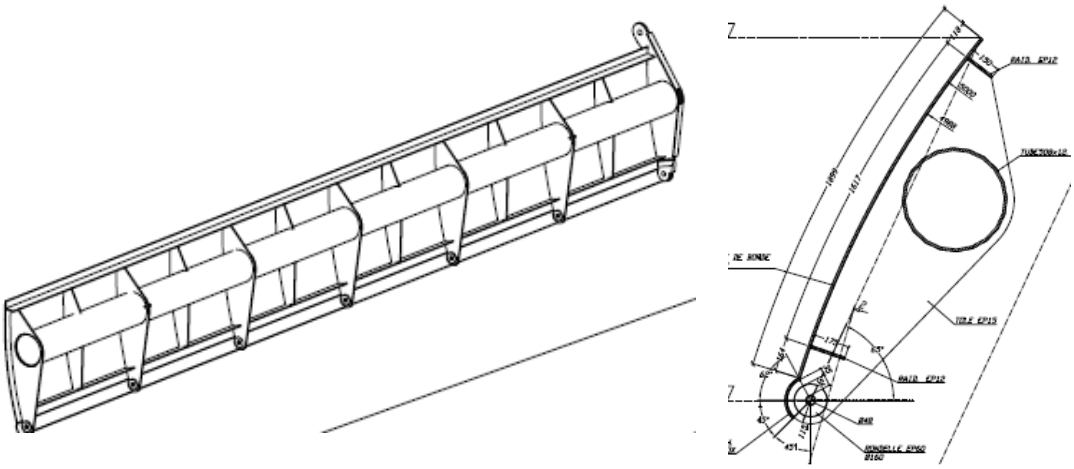


Figure 6 : Vue d'un clapet depuis l'aval (à gauche) et en coupe (à droite)

NOTA sur la fabrication des clapets : lors de l'opération de cintrage de la tôle de bordé du premier clapet, Il a été constaté que la partie basse cette dernière avait subi une d éformation onduleuse importante suite aux opérations de chaud de retrait (vagues répétées tous les 2500mm avec environ 80mm d'écart entre le point haut et le point bas : figures 4-7). Cette problèmatique était principalement dû au fait que le raidisseur longitudinal du clapet avait été pointé avant le démarrage des opéraitons de chaud de retrait, augmentant l'intertie en bord de tôle et entrainant ensuite le phénomène de plissement constaté. Le problème a été résolu par formage à froid de la tôle et par la réalisation de la soudure du raidissuer longitudinal. Pour le deuxième clapet, le raidisseur longitudinal n'a pas été pointé avant les opérations de chaud de retrait.



Figure 7 : Vue du problème d'ondulation constaté sur le tôle du premier clapet lors de la fabrication

- Chaise palière (pièce fixe de seuil) :
  - Poutre palière de 15 m de long sur laquelle sont positionnés les 7 paliers. Afin d'obtenir un alignement des paliers plus facile sur site, une poutre de la longueur de la passe a été installée au niveau du seuil de chaque clapet (voir schéma ci-après).
  - 4 tiges d'ancrage verticales sous chaque palier avec possibilité de réglage en hauteur des tiges pour assurer le positionnement de la poutre sur site
  - 2 tiges d'ancrage horizontales par palier pour pouvoir reprendre les efforts amont-aval en traction.

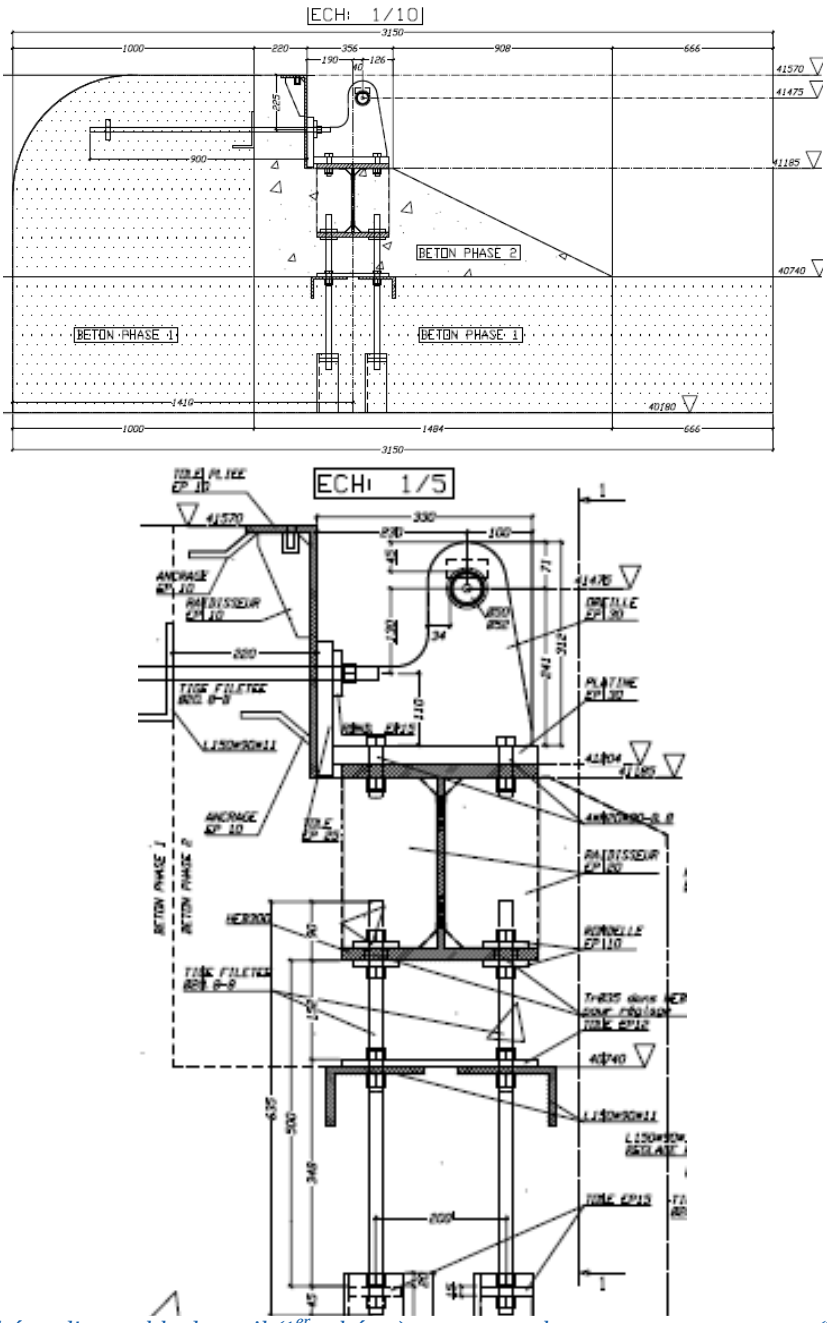


Figure 8 : Schéma d'ensemble de seuil (1er schéma) et zoom sur la poutre et ses ancrages (2ième schéma)

- Système de manœuvre :
  - Un seul vérin par clapet pour une manœuvre de chaque clapet d'un seul côté. Le choix de motoriser le clapet avec un vérin résidait dans le fait qu'il fallait pouvoir positionner ce dernier dans n'importe quelle position d'ouverture au vu des fonctionnalités demandées.
  - Vérin simple effet positionné dans la pile en lieu et place du contrepoids. La force de l'eau est motrice pour faire descendre le clapet. Ces choix de conception ont été retenus afin notamment de réutiliser l'intérieur de la pile après la dépose du contrepoids. De plus, l'accès au vérin et donc sa maintenance sont plus aisés.
  - Système de renvoi composé d'un ensemble {palonnier + Câbles + arbre de renvoi avec poulies + brimbale}. De la même manière, la conception des clapets déposés a été plus ou moins reproduite pour conserver des efforts aux mêmes endroits (têtes de pile principalement).

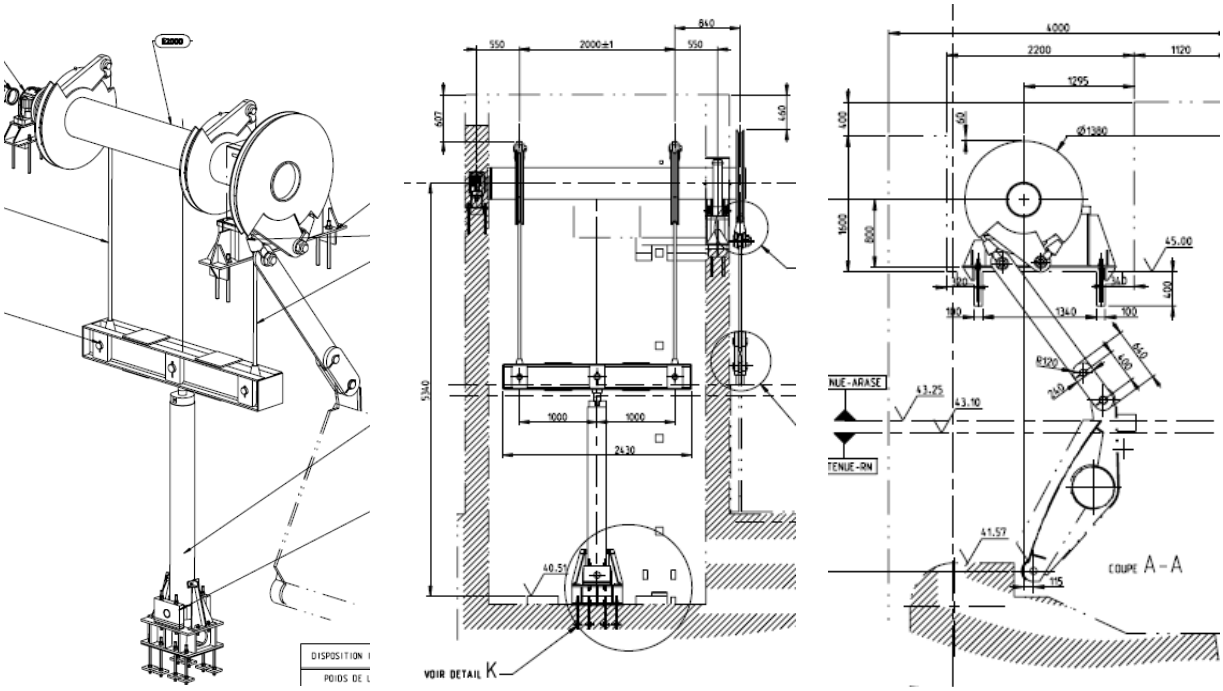


Figure 9 : Divers schémas de la motorisation des clapets

5. LA CONCEPTION DU GENIE CIVIL ET LES INTERFACES GENIE CIVIL – MECANIQUE

Les choix de conception réalisés dans le cadre de l'étude mécanique des clapets et décrits ci-avant ont eu des impacts non négligeables sur les études et la conception génie civil, qui sont venues dans un deuxième temps.
2 choix de conception mécanique ont principalement influencé les dimensionnements génie civil associés :

- Passer de clapets avec 16 paliers à des clapets à 7 paliers
- Installer un vérin en fond des piles rive gauche de chaque clapet

5.1 Impacts du passage à 7 paliers d'articulation

Le passage de 16 à 7 paliers avec conservation de la manœuvre d'un seul côté a eu pour conséquence une évolution de la répartition des charges au niveau du seuil génie civil. Ainsi, cette conception provoquait des concentrations de contraintes fortes dans certaines zones du seuil, alors que 16 paliers permettaient auparavant de mieux linéariser ces contraintes. La structure de la passe génie civil des clapets étant de faible hauteur (Mauzac est Barrage Mobile en Rivière), il a fallu dans un premier temps dimensionner le ferraillage du seuil de manière à linéariser les charges via ce dernier puis dans un deuxième temps regarder l'influence de ces charges sur la stabilité du seuil et dimensionner une recharge aval (ajout de masse) en conséquence.

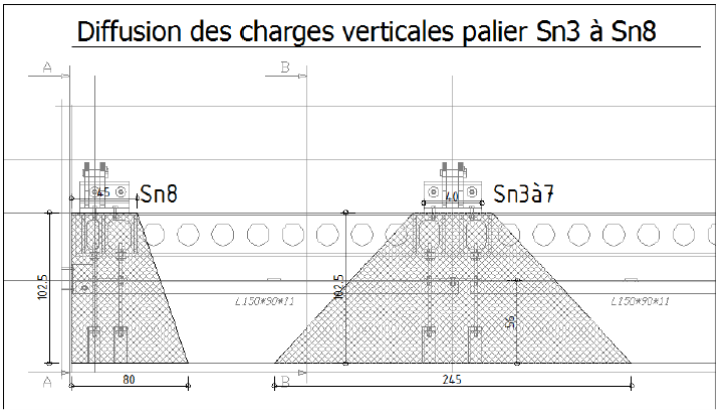


Figure 10 : Vue de la diffusion des charges transmises par les paliers au seuil génie civil

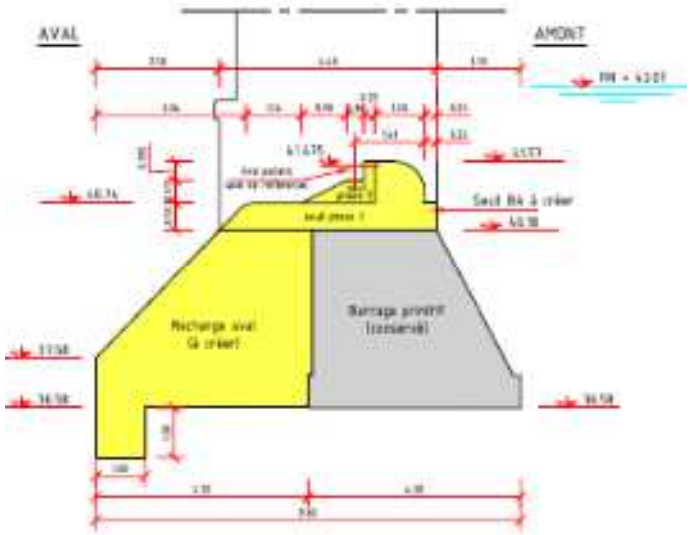


Figure 11 : Vue de la recharge aval créée dans le cadre l'opération

NOTA : la nécessité de créer une recharge aval ne venait pas que de cette problématique de conception (qui n'a fait qu'augmenter son dimensionement) mais provenait également du fait que :
- L'effort global maximum au niveau du seuil génie civil était supérieur à l'effort transmis par les clapets précédents (clapets légèrement plus hauts)
- Les codes de calcul actuels relatifs à la stabilité sont plus pénalisants que les codes de calcul datant de la construction des anciens clapets.

5.2 Impacts de l'installation d'un vérin en fond de pile

L'installation d'un vérin ancré en fond de pile a engendré des efforts de traction sur ce dernier. Avec la configuration précédente (fonctionnement avec contrepoids), ces efforts n'existaient pas. Il a donc fallu réaliser en fond de pile une dalle ferraillée ancrée dans le rocher avec des tiges de plusieurs mètres de long.

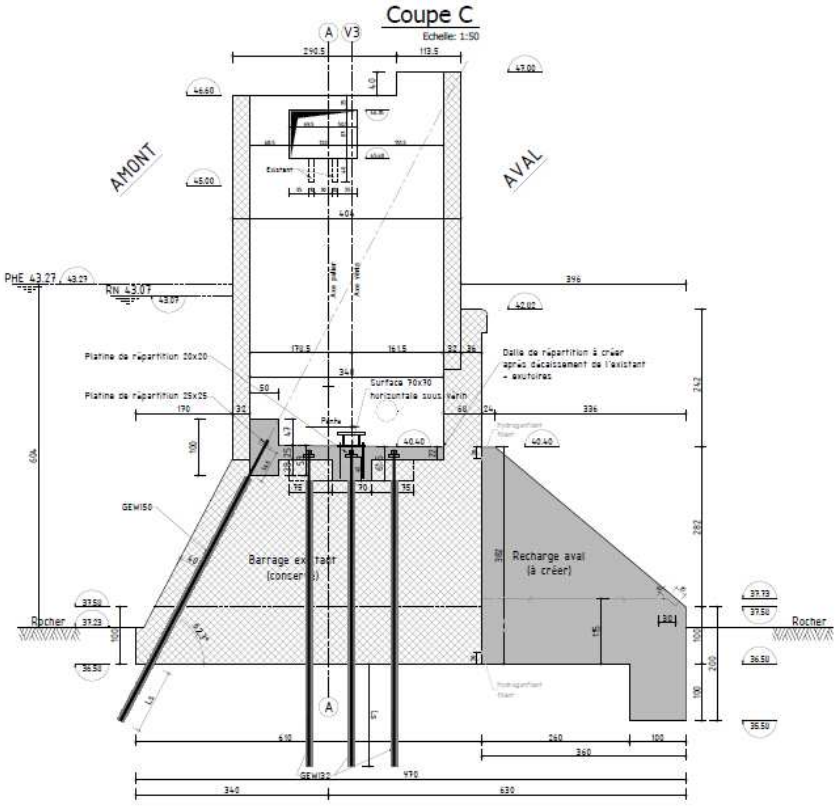


Figure 12 : Vue des tiges d'ancrages de la dalle située en fond de pile venant accueillir le vérin

6 LA REALISATION DU CHANTIER – FOCUS SUR LES OUVRAGES PROVISOIRES

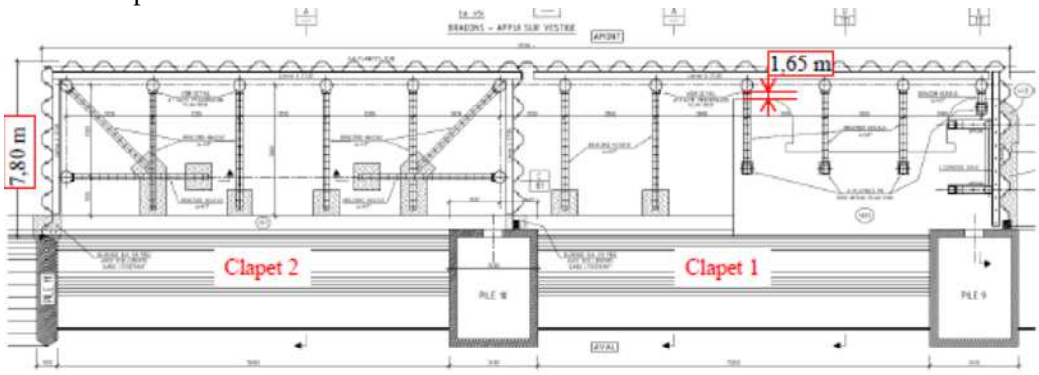
Le remplacement des clapets a eu lieu en une seule campagne de travaux, en 2013. La réalisation du chantier a notamment demandé la création de 2 ouvrages provisoires conséquents :

- Un batardage amont, étant donné qu'aucune vidange de la retenue n'était prévu et qu'aucun dispositif de batardage pérenne n'existait pour ces clapets,
- Un batardage aval couplé à une piste d'accès de manière à créer un zone de travail "sèche" à l'aval des clapets et pouvoir y accéder avec des engins de chantier et de manutention.

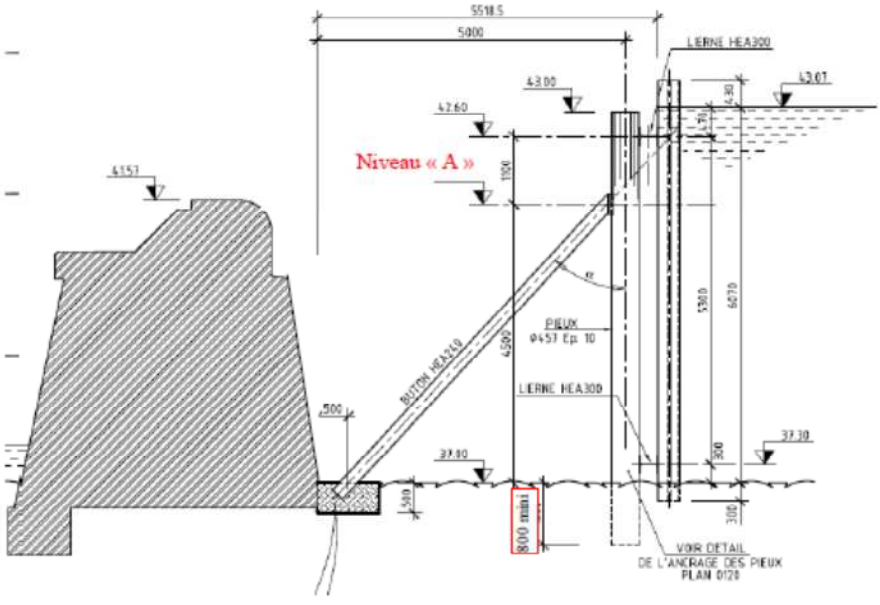
6.1 Le batardage amont

Le batardage amont devait permettre d'isoler simultanément les 2 passes clapets de l'amont de la retenue, soit un linéaire d'environ 35 mètres (2*15 mètres de clapets plus les piles rive gauche respective de chacun d'entre eux). La contrainte majeure concernant la conception et la réalisation de cet ouvrage a consisté dans le fait qu'il devait être auto-stable, c'est-à-dire ne pas s'appuyer sur l'ouvrage génie civil, à cause des problèmes de stabilité lors de la dépose de la recharge aval des passes.

La conception a donc consisté en l'installation de palplanches battues dans le sol et s'appuyant sur des pieux également battus dans le sol, via deux liernes (une en tête et une en pied). Les pieux étaient ensuite tenus par des jambes de forces venant s'appuyer dans le sol juste au pied du barrage. Les 2 plans et la photo ci-après illustrent cette conception



Batardage des clapets 1 et 2 – Vue en plan



Batardage des clapets 1 et 2 – Coupe type

Figure 13 : Plan du batardeau provisoire amont

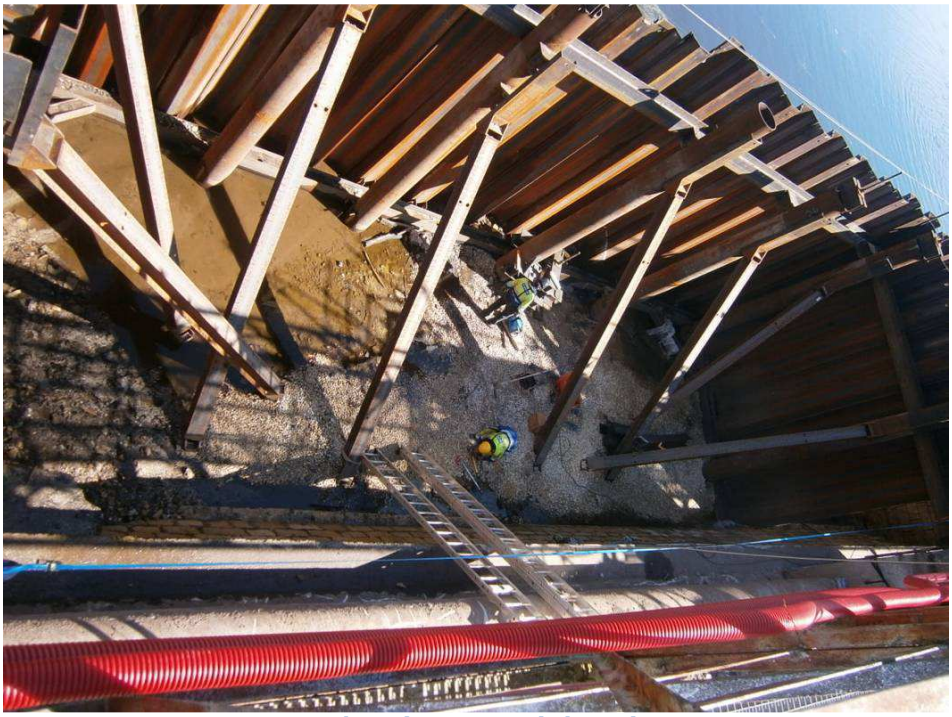


Figure 14 : photo d'une partie du batardeau amont

6.2 Le batardeau et la piste d'accès aval

Le batardage aval devait permettre d'isoler le chantier contre une crue d'environ 1200 m3/s (Crue décennale maximum sur la période du chantier). Il a donc été décidé de construire une digue en aval des passes clapet venant isoler ces dernières du lit de la rivière. La création de cette digue a également servi de piste pour accéder à une plateforme créée en aval des clapets, utilisée notamment pour les lourdes manutentions ou pour le stockage du matériel. Les photos ci-dessous montrent cette digue aux dimensions relativement importantes pour un ouvrage provisoire (hauteur de 4 à 5 m, longueur d'environ 150 mètres).



Figure 15 : Vue de la digue et de la piste d'accès



Figure 16 : Autre vue de la digue et de la piste d'accès

7 LES ESSAIS FONCTIONNELS DE QUALIFICATION

A l'issue du montage des clapets, les essais de qualification ont lieu en plusieurs phases distinctes :

- Essais fonctionnels hors d'eau : ces essais se sont déroulés derrière la batardeau et ont permis de vérifier les différentes fonctionnalités des clapets (mouvement sans à-coups sur la totalité de la course, crantage, rerpise de fuite en position fermée, fonction débit réservé, etc….)
- Essais d'étanchéité : pour ces essais, l'enceinte entre le batardeau et les clapets a été remplie pour constater l'étanchéité de ces derniers. Les réglages nécessaires ont été effectués après vidange de l'enceinte par des pompes (pas d'ouverture des clapets avc présence du batardeau).
- Essais fonctionnels en eau : ces essais se sont déroulés après la dépose du batardeau et ont été le point final de la qualificaiotn des 2 clapets. Durant ces essais, plusieurs configurations ont été testées (ouverure d'un seul clapet, des 2 clapets simultanément, ouverture d'un clapet en position débit réservé, etc…) de manière à valider le comportement hydraulique des clapets et du tapis de récpetion en enrochements.



Figure 17 : Photos des clapets lors des essais de mise en service

8 CONCLUSION

Cette opération de remplacement de clapets, qui pouvait sembler relativement “simple” a première vue, a révélé au final de nombreuses problématiques, périphériques aux clapets en eux-mêmes. Des choix de conception sur les clapets ont notamment eu des impacts non négligeables sur le génie civil de l’ouvrage, notamment par le fait que la conception des nouveaux clapets différait de la conception des clapets déposés mais aussi parce que nous étions sur un BMR (Barrage Mobile en Rivière).

La réalisation du chantier a également demandé de gros moyens logistiques par rapport à l’importance des ouvrages remplacés. Un dispositif de batardage amont relativement complexe à concevoir et à mettre en œuvre a notamment été nécessaire. La digue aval, qui servait également de piste d’accès pour les gros engins, a également constitué une grosse part du chantier.

REMPLACEMENT DES VANNES DE CRUE DES BARRAGES DE LA VANELLE ET BEAUMONT MONTEUX

Replacement of spillway gates at La Vanelle and Beaumont Monteux dams

David, GREGOIRE
EDF, 37 Rue Diderot BP176 - 38042 Grenoble cedex 9
david.gregoire@edf.fr

MOTS CLÉS

Evacuateur de crues, Vanne charpentée, Vanne de crue, Vanne segment, Vanne Stoney, Clapet

RÉSUMÉ

Remplacement des vannes de crue des barrages de la Vanelle et Beaumont Monteux
Suite au retour d'expérience défavorable constaté sur la rénovation d'une vanne de crue du barrage de la Vanelle, il a été décidé de remplacer les 6 vannes du barrage de Beaumont Monteux et 3 vannes sur les 4 du barrage de la Vanelle ainsi que l'ensemble des organes de manœuvre. Le remplacement est réalisé à l'identique. Le contrôle commande et l'alimentation électrique de chaque vanne sont également remplacés selon les principes de sûreté en vigueur. Le remplacement des vannes se déroule vanne par vanne, ce qui nécessite de faire cohabiter pendant la phase des travaux deux installations de contrôle commande. Le remplacement des vannes permettra de garantir la sûreté des ouvrages pour les 50 prochaines années et de moderniser les installations.

ABSTRACT

Replacement of spillway gates at La Vanelle and Beaumont Monteux dams.
Following the negative feedback on the refurbishment of a flood gate at the dam of La Vanelle, it was decided to replace the six gates of the Beaumont Monteux dam and three out of the four gates of La Vanelle dam – as well as all the actuators. The replacement is performed identically. The control systems and power supply of each gate are also replaced in accordance with the applicable principles of safety. The gates are replaced one at a time, which requires the old control systems to coexist with the new one during the construction phase. The replacement of the gates will ensure the safety for the years to come of the hydraulic structures and modernize the facilities.

1. CONTEXTE

1.1 Présentation des aménagements de La Vanelle et de Beaumont-Monteux

Barrage de La Vanelle

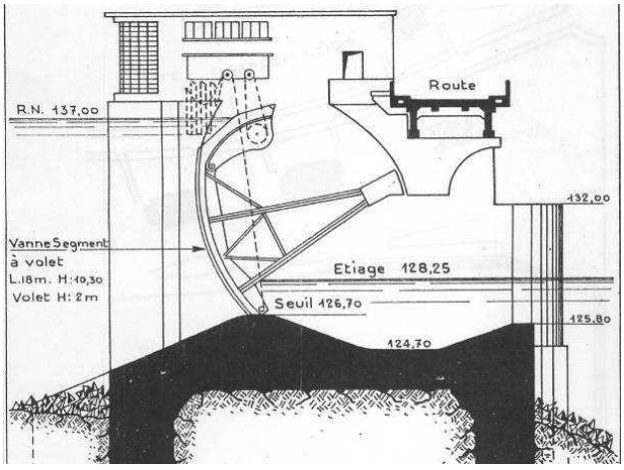
L'aménagement de La Vanelle, situé sur l'Isère, à l'aval de la ville de Romans (26) a été mis en service en 1950.

Le barrage mobile évacuateur de crues est équipé de 4 vannes segment surmontées d'un clapet déversant (2 m de hauteur), fermant des passes de 18 m de large par 10,30 m de hauteur.
Il existe un jeu de batardeaux amont et un jeu de batardeaux aval permettant d'isoler un pertuis.
Vannes et clapets sont constitués de profilés et de tôles assemblés par rivets. La masse du clapet est de 19 tonnes, celle de la vanne de 100 tonnes.
Vannes et clapets sont manœuvrés par l'intermédiaire de chaînes Galles (mouflage pour la vanne segment).

Les étanchéités latérales sont assurées par des joints plats montés sur tôles ressort et les étanchéités de seuil par un joint note de musique.
Chaque vanne est pourvue de deux contre-galets cylindriques latéraux situés en partie inférieure.
En 2010-2011, la vanne n°2 a fait l'objet de travaux de rénovation des structures ainsi que des étanchéités.



Graphique 1 : Vanne Segment



Graphique 2 : Coupe dans un pertuis

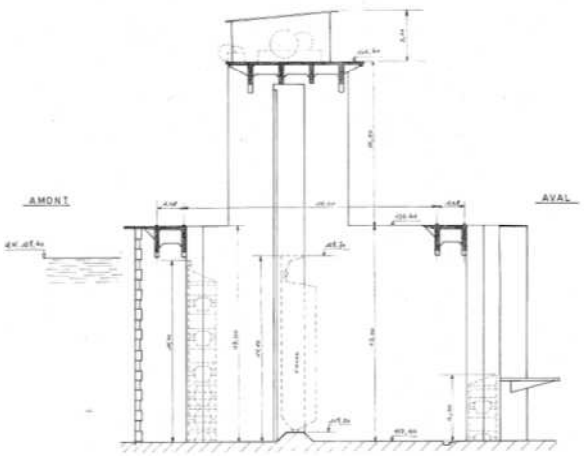
Constructeur des vannes : Schneider
Débit max d'un clapet : 100 m3/s – Débit max d'une vanne : 750 m3/s

Barrage de Beaumont-Monteux

L'aménagement de Beaumont Monteux, situé sur l'Isère, à l'aval du barrage de la Vanelle a été mis en service en 1921.
Le barrage mobile évacuateur de crues est équipé de 6 vannes Stoney surmontées d'un clapet déversant (1,5 m de hauteur), fermant des passes de 17,5 m de large par 10,40 m de hauteur.
Il existe un jeu de batardeaux amont et un jeu de batardeaux aval permettant d'isoler un pertuis.
Vannes et clapets sont constitués de profilés et de tôles assemblés par rivets. La masse du clapet est de 8 tonnes, celle de la vanne de 139 tonnes.
Les vannes sont manœuvrées par des chaînes Galles. Les clapets sont manœuvrés par l'intermédiaire de câbles.
Les étanchéités latérales sont assurées par des joints cornières et les étanchéités de seuil par un joint note de musique.
Chaque vanne est pourvue d'une série de contre-galets de guidage amont et latéraux.



Graphique 3 : Vue aval du barrage



Graphique 4 : Coupe d'un pertuis

Constructeur des vannes : LEVAIVE & Cie
Débit max d'un clapet : 50 m3/s – Débit max d'une vanne : 700 m3/s

1.2 Contexte du remplacement des évacuateurs de crues

Compte tenu des éléments défavorables de complexité (présence de peintures amiantées, périmètre incertain des travaux), de coûts et de délais constatés sur la rénovation de la vanne n°2 de La Vanelle, ainsi que des diagnostics des différentes vannes, il a été décidé de remplacer les 6 vannes du barrage de Beaumont-Monteux et 3 vannes sur les 4 du barrage de La Vanelle, ainsi que l'ensemble des organes de manœuvre.
Le remplacement demandé est à l'identique.

Ce projet s'intègre dans le projet Vanne Basse Isère qui inclut également le remplacement des vannes de Pizançon (non traité dans cet article).
Un lot « contrôle-commande » a également été ajouté au projet de remplacement des vannes évacuateurs de crues.
Les marchés de remplacement des vannes ont été confiés à deux prestataires différents.

2. DESCRIPTION DES TRAVAUX

Les travaux consistent à remplacer les 6 vannes de Beaumont Monteux et les 3 vannes non rénovées de La Vanelle. A cette fin, l'ensemble des vannes actuelles, des pièces fixes et des organes de manœuvre est déposé et remplacé à l'identique. Le type des vannes est inchangé ; les conditions d'exploitation et les sollicitations globales sur le génie civil du barrage restent inchangées.
Le remplacement effectué vanne par vanne, comprend:

- le démantèlement de la vanne existante et son mécanisme de manœuvre,
- le démantèlement du 1er rang du contrôle commande associé,
- la fourniture de la nouvelle alimentation électrique nécessaire au fonctionnement des vannes,
- la fourniture et le montage de la nouvelle vanne et de son mécanisme de manœuvre,
- la fourniture et le montage du contrôle commande associé,
- les essais de requalification.

3. DEMANTELEMENT DU MATERIEL EXISTANT

3.1 Risque amiante/plomb

Suite au diagnostic avant travaux, il a été détecté :
- du plomb dans les peintures des tabliers métalliques, pièces fixes et châssis des organes de manœuvre,
- de l'amiante dans les peintures des tabliers métalliques et pièces fixes.

Les travaux de dépose des vannes s'effectuent à l'extérieur et en plein air par découpe au chalumeau en plusieurs éléments.
Ces travaux relèvent de la sous-section 4 - niveau 1 du code du travail. Des prélèvements d'air au niveau du poste de travail et dans l'atmosphère ambiante ont permis de valider le niveau de protection des intervenants.

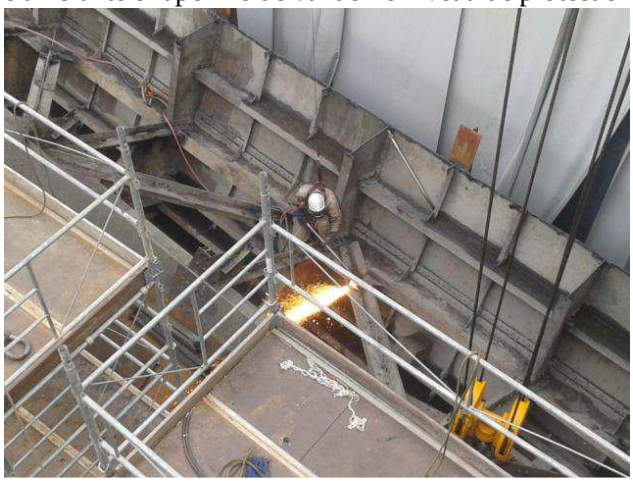


Figure 1 : Découpe de la vanne de la Vanelle

3.2 Traitement du matériel déposé

L'espace disponible sur le site de Beaumont Monteux n'étant pas suffisant pour permettre un stockage temporaire du matériel déposé, une zone de conditionnement a été aménagée sur le domaine concédé du barrage de la Vanelle. Cette zone qui est mutualisée pour les 3 chantiers de remplacement des vannes de la Basse Isère est dédiée :
- au stockage temporaire des DND (Déchets Non Dangereux) et DD (déchets Dangereux) issus des 3 chantiers,
- à la découpe des tronçons de vannes en vue de leur évacuation par la filière de retraitement métaux lourds/amiante.

3.2.1 Type de déchets et filière retenue (hors métaux revêtus de peintures contenant de l'amiante et/ou du plomb)

Selon les matériaux à évacuer du site durant le chantier, les principales filières de traitement retenues sont les suivantes :

Bétons de démolition : récupération et revalorisation via station de concassage et/ou utilisation comme matériau de remblai.

F*errailles nues ou peintes* : le déchet est évacué en l'état sans prétraitement. Recyclage via un ferrailleur puis un aciériste pour l'élimination finale.

Ferrailles polluées avec des graisses, des lubrifiants : ces déchets souillés ne sont pas considérés comme dangereux à partir du moment où les graisses et autres huiles lubrifiantes utilisées ne sont pas elles mêmes dangereuses. Une information préalable du ferrailleur est réalisée.

Produits lubrifiants usagés (huile, graisse) : ces déchets sont collectés par une entreprise spécialisée puis recyclés.

Matériels électriques divers : tri sur parc pour valorisation des différents matériaux, ferraille, aluminium, cuivre.

3.2.2 Filière de retraitement des métaux revêtus de peinture contenant de l'amiante et/ou du plomb

L'ensemble des vannes déposées sur les 3 sites du projet Vanne Basse Isère (15 au total), et les organes de manœuvre associés représente environ 3000 tonnes d'acier revêtu de peinture contenant de l'amiante et/ou du plomb. Ces matériels sont traités à l'aide d'un marché dédié au traitement de ce type de déchets et utilisé au niveau national par EDF.

Ce marché a été attribué à un Groupement Momentané d'Entreprises. Le mode de fonctionnement est le suivant en présence d'amiante :

1- mise en forme des matériels sur zone de conditionnement avant enlèvement (intervention en sous-section 4),
2- enlèvement et transport vers un site classé ICPE,
3- décapage UHP dans une unité spécifique installée sur le site ICPE en sous-section 3,
4- revalorisation de l'acier auprès d'un aciériste,
5- traitement du déchet final (classe 1 ou inertage).

Lorsque la peinture ne contient que du plomb, le déchet est envoyé après mise en forme directement chez l'aciériste avec une simple information préalable.

4. REMPLACEMENT DU CONTROLE COMMANDE

Les installations électriques actuelles datent des années 70, elles arrivent en fin de vie pour certaines (transformateur, disjoncteur, etc) et présentent des écarts par rapport aux recommandations actuelles sur les redondances et modes communs. Il a donc été décidé de remplacer le contrôle commande et l'alimentation électrique de chaque vanne selon les principes de sûreté en vigueur.
La fiabilité de la conduite, manuelle et automatique, des évacuateurs de crues de la nouvelle installation est assurée par :

- la mise en œuvre de redondance à tous les niveaux,
- l'élimination systématique des modes communs,
- l'utilisation de matériels éprouvés, d'une fiabilité adaptée à l'enjeu de sécurité qu'ils portent.

Pour minimiser le coût des travaux de rénovation et pour optimiser le dimensionnement des câbles et des disjoncteurs, la tension des services auxiliaires évolue à l'occasion du remplacement des vannes du 220 Vca vers une tension de 410 Vca.

Les vannes n'étant remplacées qu'une seule à la fois, il est nécessaire de faire cohabiter deux installations de contrôle commande pendant la phase des travaux. La superficie des anciens locaux n'étant pas suffisante

pour implanter les nouveaux matériels, il a été construit sur chaque aménagement un nouveau local d'exploitation. Il permet de garantir la sûreté des installations pour le barrage et d'assurer le transfert des anciennes installations vers les nouvelles.

Les nouveaux locaux intègrent 7 salles techniques séparées pour y installer :

- un nouveau groupe électrogène,
- les nouveaux services auxiliaires 5.7 kV,
- les armoires de distribution des auxiliaires alternatifs,
- une salle « batterie »,
- une salle de conduite locale,
- une salle « télécom »,
- une salle auxiliaire continue.

L'alimentation en énergie des organes de manœuvre est réalisée à partir de quatre sources indépendantes :

- l'alimentation normale depuis les jeux de barres 5,7 kV de la centrale via un câble de puissance privé et de deux transformateurs,
- l'alimentation normale depuis le réseau ERDF,
- un groupe électrogène de secours au barrage,
- un groupe électrogène mobile sur remorque qui peut être raccordé sur l'installation en cas de besoin.

En dernier recours, pour ouvrir une vanne de crue lorsque les moyens classiques sont inopérants : alimentation normale et secours, motorisation principale et son contrôle commande, un dispositif d'ultime secours est prévu sur chaque aménagement (mini groupe électrogène avec moteur électrique de secours sur les réducteurs mécaniques ou moteur thermique accouplé sur la chaîne cinématique).

Pour les moteurs de commande des organes de manœuvre, le référentiel EDF s'oriente actuellement vers des moteurs de type asynchrone :

- soit à démarrage étoile ou triangle,
- soit à démarrage sur résistances rotoriques,

L'utilisation de démarrage avec variateur de fréquence est proscrite sur les vannes assurant des fonctions de sûreté telles que les évacuateurs de crues et les vidanges de fond.

5. LES VANNES

La configuration des deux barrages et les moyens de levage disponibles sur site ne permettent pas de mettre en place les vannes dans leur logement en un seul morceau. Cette contrainte a conduit les constructeurs à réaliser les vannes en plusieurs éléments. Ils ont ensuite fait le choix de les assembler par soudage (plutôt que par boulonnage) sur site.

5.1 Beaumont Monteux

La vanne est construite en cinq éléments dont la masse et l'encombrement sont donnés sur la figure suivante.

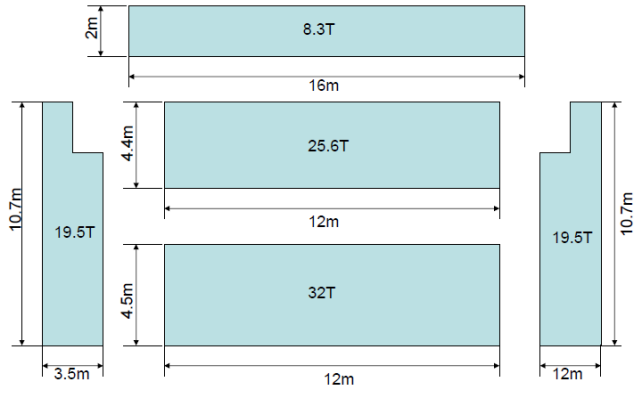


***Figure 2** : Masse et dimension des morceaux de vanne*

La présence d'une passerelle supérieure accueillant les treuils, ne permet pas de déposer les éléments de vanne directement dans les rainures. Pour ceci, il est nécessaire de mettre en place un dispositif composé d'un chemin de ripage posé sur le radier et de berceaux mobiles recevant les morceaux de vanne. Ces berceaux peuvent translater dans les deux directions (amont/aval et RG/RD) à l'aide de chenillettes. Les morceaux de vanne sont transportés depuis la plateforme d'accès en rive gauche jusque dans la passe à l'aide du portique barrage de capacité 40 T.



Figure 3 : *Beaumont Monteux - manutention des morceaux de vanne*

5.2 La Vanelle :

La vanne est construite en 9 éléments dont la masse est donnée sur la figure suivante.

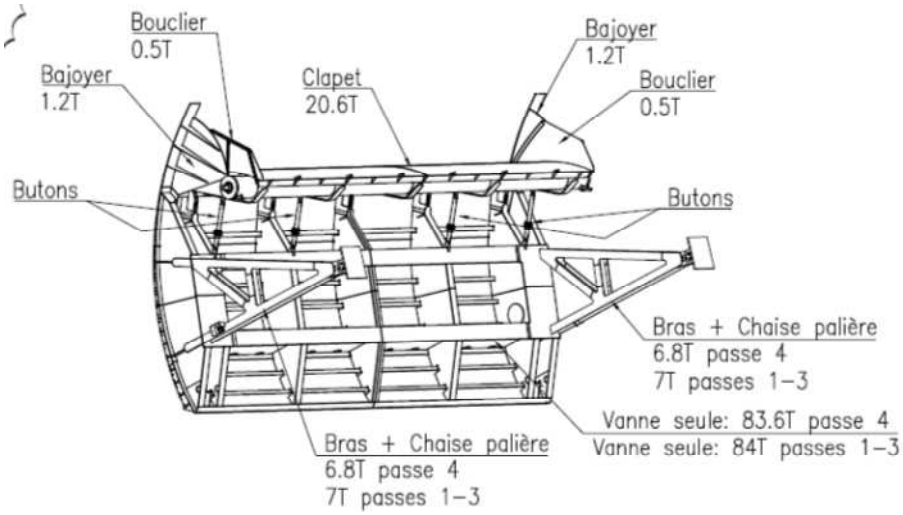


Figure 4 : Masse des morceaux de vanne

Contrairement à Beaumont Monteux, l'absence de rainure et de passerelle supérieure permet de mettre en place des éléments horizontaux sur toute la largeur de la passe sans système de ripage. Seul un dispositif de plancher équipé d'un berceau posé sur le radier est installé en fond de passe. Les morceaux de vanne sont mis en place à l'aide du portique barrage de capacité 30 T.

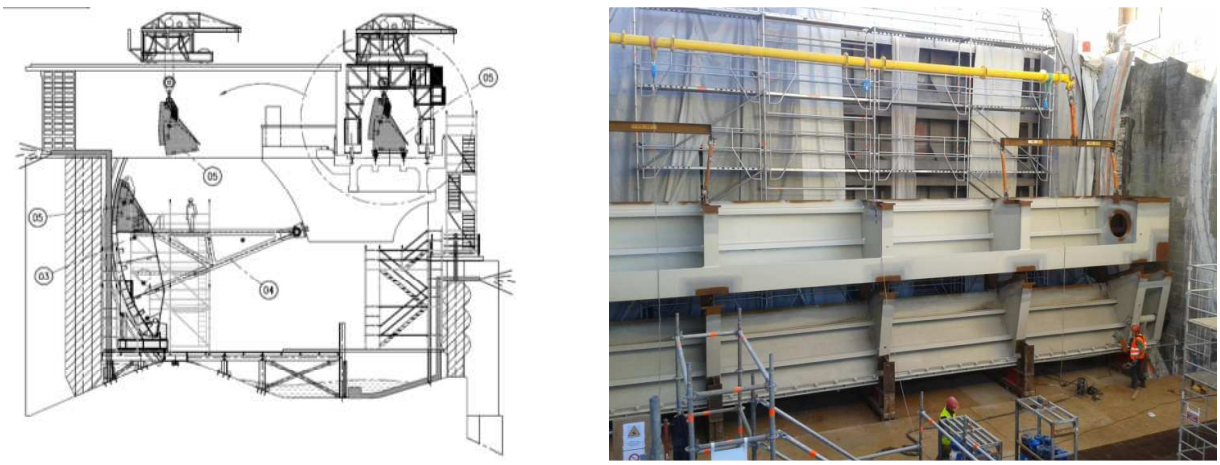


Figure 5 : La Vanelle - Montage des éléments de vanne

6. LES MECANISMES DE MANOEUVRE

Les deux sites sont équipés de treuils à chaines et à câbles. Ils sont constitués d'un moteur central, d'un réducteur primaire et de deux réducteurs secondaires synchronisés par une ligne d'arbre.
Le dimensionnement des organes de manœuvre est réalisé suivant les Règles de calcul utilisées par les Constructeurs d'appareils de levage - Section I Appareils lourds de levage et de manutention- de la Fédération Européenne de la Manutention (F.E.M.) dernière version en vigueur [1].
Le calcul des efforts de manœuvre tient compte des sollicitations suivantes :

- poids propre des éléments à lever,
- majoration pour prise en compte de la glace, du bois ou des dépôts éventuels,
- pression hydrostatique,
- sollicitation hydrodynamique,
- les frottements.

De plus, il est exigé une marge de 20% (Capacité de l'organe de manœuvre / efforts résistants > 1.20).

7. POINT D'AVANCEMENT DU PROJET

Les premières vannes de Beaumont et La Vanelle ont été remplacées, elles sont actuellement dans la phase d'essais de réception. Dès leur mise en service, le remplacement de la vanne suivante pourra débuter.

8. CONCLUSIONS

Le remplacement des vannes de ces deux aménagements permettra de garantir la sûreté des ouvrages pour les 50 prochaines années et de moderniser les installations.

9. REMERCIEMENTS

Remerciements à :
- Cyril BETHENOD (Chef de Projet)
- Emmanuel FRANCOIS (Vérificateur Technique Electromécanique)
- Yu JIA (Responsable du lot contrôle commande de La Vanelle)
- Sébastien ANNOULD (Responsable du lot contrôle commande de Beaumont Monteux)
- Michael MUCHEMBLED (Contrôleur de Travaux Electromécaniques)

RÉFÉRENCES ET CITATIONS

[1] Règles de calcul utilisées par les Constructeurs d'appareils de levage - Section I Appareils lourds de levage et de manutention- de la Fédération Européenne de la Manutention (F.E.M.)

REMPLACEMENT DES VANNES EVACUATEUR DE CRUE DU BARRAGE DE PIZANCON

Replacing the gates of Pizançon dam

Laurent S, GIRAUDON
37 Rue Diderot 38000 Grenoble
Téléphone : +41 (04) 76 20 89 00, Fax : +41 (04) 76 20 88 85, Courriel : laurent.giraudon@edf.fr

MOTS CLÉS

Vanne Stoney, Vanne wagon, Assemblage boulonné, Affalage, Moyens de manutention

RÉSUMÉ

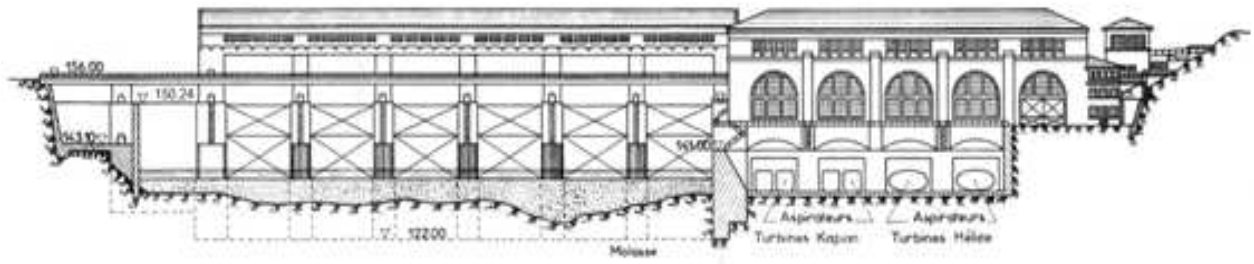
Les vannes évacuateur de crue du barrage de PIZANCON situé sur la Basse Isère sont en cours de remplacement. Après une description succincte de l'aménagement et des travaux de remplacement, cet article développe 3 thèmes : les données d'entrée, la technologie de la vanne et les moyens de manutention.
Données d'entrée : Leur définition et leur analyse sont primordiales afin d'éviter des conséquences importantes sur le projet ou l'exploitation.
Technologie de la vanne : les nouvelles vannes sont constituées d'éléments assemblés par boulonnage ce qui réduit les moyens à mettre en œuvre sur site mais nécessite en contre partie des moyens importants en usine.
Moyens de manutention : Ils sont nécessaires au remplacement des vannes et doivent être adaptés aux travaux à réaliser, il est décrit les moyens mis en œuvre et l'intérêt d'avoir des moyens de manutention spécifiques.

ABSTRACT

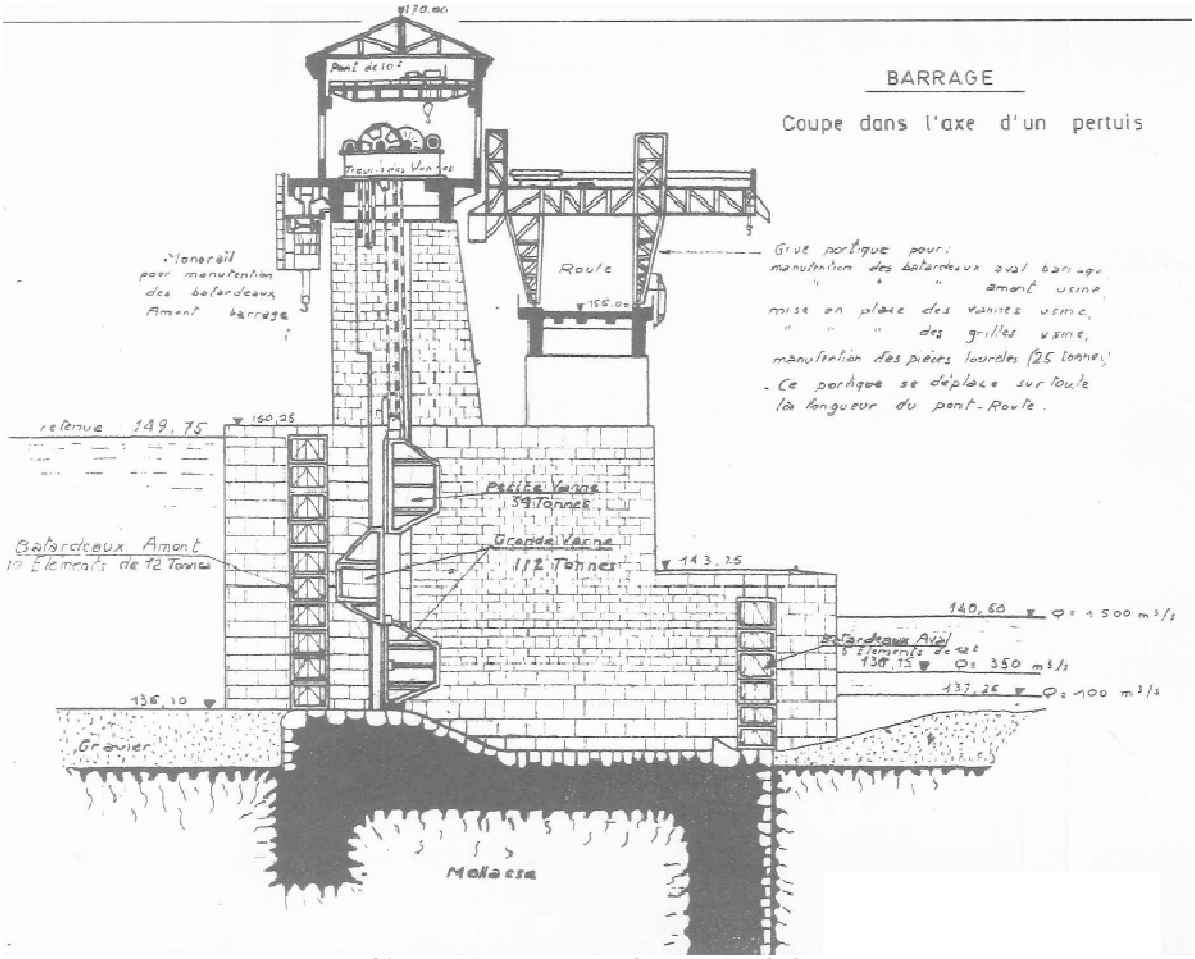
The spillway gates of Pizançon dam (Isere River) are being replaced. After briefly describing the plant and the replacement work, the article states 3 themes: the input data, the gates's technology and the handling means.
Input data: the importance of the input data definition and analysis in order to avoid serious consequences on the project or operation.
Gates's technology: The new gates consist of elements assembled by bolting. This solution reduces the works of on-site assembly but requires substantial resources in the factory.
Handling mean: The handling means required for gates replacement must be adapted. They are described and we show the interest of having specific handling means.

1. PRESENTATION DE L'AMENAGEMENT

L'aménagement de PIZANCON date de 1931, il est situé sur l'Isère, à proximité de la ville de Romans. Il s'agit d'un barrage mobile prolongé d'une usine de production de type fil de l'eau.



Graphique 1 : *Vue Aval de l'ouvrage*



Graphique 2 : *Vue en coupe d'une passe du barrage*

Caractéristiques Génie Civil

L'ouvrage comprend :

1 culée en rive droite,
1 tête d'écluse en rive droite,
6 piles en rivière,
1 bloc usine en rive gauche,
1 pont-route situé à l'aval,
1 passerelle supérieure en béton qui constitue la salle des treuils des vannes.

Hauteur :

14,15 m au-dessus du terrain naturel
23,25 m sur fond de fouille amont
28,25 m sur fond de fouille aval
Epaisseur à la base 30,75 m

Dimensions des passes :

Largeur du pertuis 15 m,
Profondeur des rainures 1,10 m
Largeur des rainures 2,00 m
Largeur des piles en rivière 4,50 m
Largeur des piles extrêmes en rive droite et rive gauche 8,00 m
Epaisseur radier amont 5,00 m
Epaisseur radier aval 3,00 m
Longueur couronnement : 147,70 m

Mur poids de la tête d'écluse :
Longueur 12,00 m
Epaisseur à la base 12,45 m

Le terrain sur lequel est réalisée la fondation est de la Molasse du Miocène. La fondation comprend une bèche amont et une bèche aval.
La surface du fond de fouille est recouverte d'un mortier gras. La construction entre les piles et le radier est monolithique.
Il n'y a pas de voile étanche. Un système de drainage est réalisé dans le corps du barrage.
A l'origine, le barrage ne comportait pas de dispositif d'auscultation : des dispositifs de suivi des sous pressions sont installés avant les travaux de remplacement des vannes.

1.2 Caractéristiques Mécaniques des « anciennes vannes »

Les 6 passes du barrage, de 15 m de large et de 14 m de hauteur, sont obstruées par 6 vannes évacuateur de crues identiques.
Chaque vanne est constituée :

- d'une vanne inférieure levante de type Stoney :
  bordée amont pour la partie inférieure et bordée aval pour la partie supérieure,
  profilés et tôles assemblés par rivets
  entraxe de roulement 16,44 m,
  hauteur obstruée 9,55m,
  masse 120 T,

- d'une vanne supérieure déversante de type wagon :
  bordée amont,
  profilés et tôles assemblés par rivets
  entraxe de roulement 15,34 m,
  largeur efficace 14,00 m,
  hauteur obstruée 4,10m,
  masse 40 T.

Les vannes sont actionnées par des treuils situés au dessus des passes dans la salle des treuils.

La vanne inférieure stoney est manœuvrée par l'intermédiaire de 2 chaînes Galles mouflées. Le treuil est constitué d'une motorisation centrale qui, par l'intermédiaire d'un arbre de synchronisation, vient entrainer les treuils de rive.
Force 170 000 daN
Vitesse 50 m/min
Moteur 28 kW - 960tr/min

La vanne supérieure wagon est manœuvrée par l'intermédiaire de 2 chaînes Galles simples. Le treuil est constitué d'une motorisation centrale qui, par l'intermédiaire d'un arbre de synchronisation, vient entrainer les treuils de rive.
Force 52 000 daN
Vitesse 50 m/min
Moteur 11 kW – 1000 tr/min

1.3 Mode de fonctionnement

Les fonctions des vannes évacuateurs de crues sont :

- maintenir la côte du plan d'eau amont,
- évacuer les corps flottants et les embâcles,
- gérer les crues,
- permettre le passage de l'eau en cas de déclenchement d'un ou plusieurs groupes.

Les modes de fonctionnement sont :

- soit automatiques via un Automate Programmable,
- soit manuels depuis la salle des treuils ou la salle de commande.

La manœuvre des vannes est réalisée :

- soit par les moteurs électriques via l'alimentation normale (3 sources différentes),
- soit par un dispositif autonome d'ultime secours,
- soit par gravité pour la vanne supérieure (affalage avec maintien de la vitesse au moyen d'un frein centrifuge).

2. REMPLACEMENT DES VANNES

2.1 Choix du remplacement des vannes

Le choix de remplacer les vannes plutôt que de les rénover a été fait au regard des résultats des expertises/diagnostics et des études de faisabilité. En effet, bien que l'état des vannes permettait d'envisager des travaux de rénovation, la complexité d'une telle opération, les risques, les coûts, la pérennité et les délais associées font privilégier le remplacement à neuf.
Pour la vanne inférieure, une rénovation nécessite une "découpe" par dépose des rivets. Outre cette opération délicate, c'est le ré assemblage qui présente le plus de risque puisque les éléments désassemblées présenteront probablement des déformations plastiques. La qualité de la réalisation est donc incertaine.
De plus, le délai d'indisponibilité des passes est plus faible lors d'un remplacement (environ 8 mois) que lors d'une rénovation (estimé entre 12 et 18 mois). Les coûts des deux solutions sont équivalents.

2.2. Consistance des travaux

Les travaux consistent à remplacer les 6 vannes, leur système de manœuvre et le contrôle commande associé. Les vannes actuelles, leurs pièces fixes, leurs systèmes de manœuvre et leur armoire de commande de 1er rang sont déposés et remplacés.

2.3 Caractéristiques des nouvelles vannes

Les nouvelles vannes possèdent les mêmes caractéristiques générales que les anciennes :

- Une vanne inférieure levante de type Stoney :
  bordée amont pour la partie inférieure et bordée aval pour la partie supérieure,
  6 éléments mécanosoudées assemblé par boulonnage,
  masse 122 T.

- Une vanne supérieure déversante de type wagon :
  bordée amont,
  structure mécanosoudée,
  masse 34 T.

La vanne inférieure Stoney est manœuvrée par l'intermédiaire de 2 chaînes Galles mouflées. Le treuil est constitué d'une motorisation centrale équipé d'un réducteur primaire et de 2 moteurs (Normale et Secours) qui par l'intermédiaire d'un arbre de synchronisation, vient entrainer les 2 réducteurs secondaire de rive.
Force 190 000 daN
Vitesse 50 m/min
Moteur 22 kW - 1500tr/min

La vanne supérieure wagon est manœuvrée par l'intermédiaire de 2 chaînes Galles simples. Le treuil est constitué d'une motorisation centrale équipé d'un réducteur primaire et de 2 moteurs (Normale et Secours) qui par l'intermédiaire d'un arbre de synchronisation, vient entrainer les 2 réducteurs secondaire de rive.
Force 65 000 daN
Vitesse 50 m/min
Moteur 11 kW – 1000 tr/min

2.4 Planning chantier

Le phasage des travaux prévoit la réalisation des passes successivement de 2014 à 2018.

	Durée	M1		M2		M3		M4		M5		M6		M7		M8	
Installation de chantier	1 mois																
Dépose des vannes actuelles	0,5 mois																
Dépose des pièces fixes	0,5 mois																
Dépose du système de manœuvre	1 mois																
Mise en place des pièces fixes	1,5 mois																
Mise en place de la vanne	2 mois																
Mise en place du système de manœuvre	2 mois																
Mise au point et Essais	2 mois																

***Tableau 1** : Macroplanning des travaux pour une passe.*

3. DONNEES D'ENTREES

Bien que les nouvelles vannes soient remplacées « à l'identique », il est primordial de bien redéfinir les données d'entrées :

- les besoins,
- les conditions de fonctionnement initiales, actuelles et souhaitées,
- l'état des lieux
- le point zéro…

En effet, il n'est pas rare que :

- les vannes aient subi des modifications,
- des fonctions aient été ajoutées,
- des erreurs subsistent (plans non conforme à exécution…),
- les conditions d'exploitation aient évoluées.

3.1 Réhausse du plan d'eau

En 1945, afin de permettre une élévation du plan d'eau de 50 cm, les vannes ont été rehaussées.
Une rehausse de 10 cm a été réalisée sur la vanne supérieure et une surélévation de 40 cm de la vanne inférieure. Ces évolutions de plan d'eau (élévation ou abaissement) sont assez courantes dans la vie d'un aménagement.

Dans le cas de Pizançon, ces modifications ont été faites dans les règles de l'art (renforcement et modifications des plans des vannes mais aussi des batardeaux…). La nouvelle cote apparaît clairement dans les documents d'exploitation bien que certains plans d'ensemble représentent encore les vannes non modifiées.

3.2 Ouverture maximum vanne inférieure

En cours de construction du barrage, un projet d'avenant à la concession a été établi, mais n'a pas été finalisé. Entre autre, il réduisait la crue de projet et par voie de conséquence redonnait une marge de débitance significative. L'ouverture maximum de la vanne inférieure a donc été réduite et la passerelle a été abaissée.

A priori, cette modification a été prise en compte dans l'avenant à la concession de 1949 mais sans faire référence au projet d'avenant réalisé en cours de construction et sans l'ajout des plans modifiés. De ce fait, le dossier de renouvellement de concession de 2007 comporte des incohérences au niveau des plans et cotes du barrage puisqu'il coexiste des plans non cohérents sur les cotes de la passerelle.

Ces inexactitudes de plans, associées à une volonté de remplacer rapidement (voir trop rapidement) les vannes ont conduit à consulter et passer un marché pour le remplacement des vannes avec des documents erronés.

Lors des prises de cotes demandées dans le cadre des études de remplacement du titulaire, cette anomalie a été relevée. Le niveau de la salle des treuils ayant un impact sur la course de levage mais surtout sur le montage des vannes, il a été nécessaire de revoir l'ensemble de la conception de la vanne. Le traitement de cet écart a engendré un décalage des travaux de plus d'un an.

3.3 Affalage de la vanne wagon

Dans les années 1990, la sûreté du barrage a été améliorée en créant un dispositif de sauvegarde qui utilise et sécurise la fonction d'affalage des vannes wagon.

Le dispositif de sauvegarde via la fonction affalage permet en cas de montée anormale du niveau amont d'ouvrir automatiquement les vannes wagon suivant un séquencement particulier.
Ce dispositif est une ultime protection : les vannes s'ouvrent de manière gravitaire (sans énergie), des batteries assurent l'alimentation des freins et le pilotage des manœuvres d'affalage.
Le séquencement comprend différents stades qui engendrent des manœuvres de 2 à 6 vannes suivant des temporisations spécifiques (Exemple : 45 secondes d'ouverture toutes les 3 minutes).

Du fait, de la complexité du comportement en transitoire hydraulique, la mise au point du séquencement a été réalisée d'une manière expérimentale : un déclenchement d'usine[1] a été réalisé afin de vérifier le comportement du plan d'eau amont et d'affiner les temporisations permettant de concilier la maîtrise des débits aval et le niveau amont.
Ce séquencement a été confirmé par une simulation par le calcul réalisée par l'INRIA.

La conception et les technologies utilisées dans les systèmes de manœuvre actuels (réducteur plus compact donc avec plus d'étages de réduction) ont tendance à dégrader les rendements et donc à réduire les vitesses de descente gravitaire par rapport aux vitesses existantes.

Dans le cadre d'une rénovation « à l'identique », il convient dans un premier temps de formuler les besoins correspondant au fonctionnement existant. La reconduction du fonctionnement existant peut s'avérer optimum, mais ce n'est pas toujours le cas.
Par exemple, le surdimensionnement, l'adaptation, la modification des systèmes de manœuvre « courant » afin de se conformer à un critère de vitesse d'affalage pourrait remettre en cause le fonctionnement normal de la vanne et/ou défiabiliser la fonction d'affalage. Dans ce cas, la fiabilité du dispositif de sauvegarde pourrait être remise en cause alors que la modification du séquencement peut répondre aux besoins : concilier les caractéristiques d'affalage et la sûreté.

Dans le cadre de PIZANCON, les propriétés de l'huile et le système de manœuvre ont été adaptés afin de garantir la vitesse d'affalage. En parallèle, une étude est en cours pour définir les conditions limites de fonctionnement de l'affalage afin de garantir la sûreté.

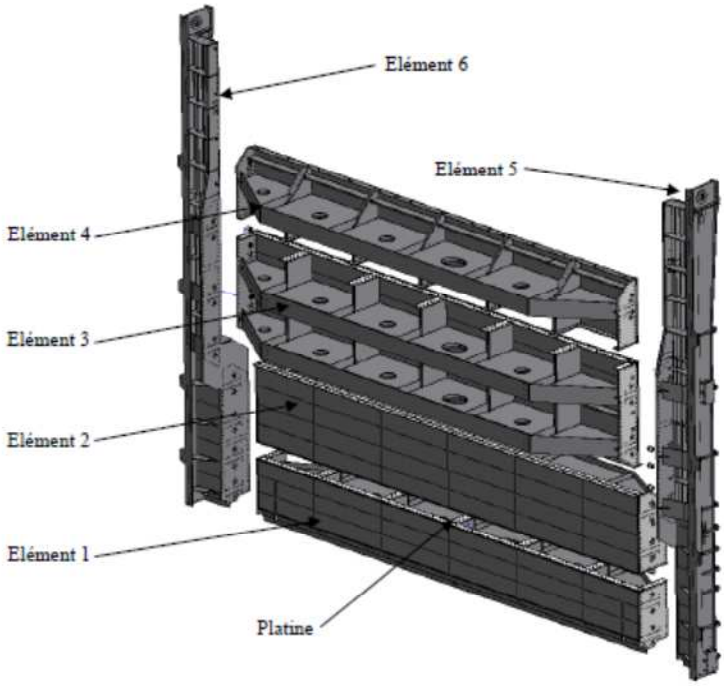
4. TECHNOLOGIE VANNE

La solution retenue par le titulaire du marché de remplacement des vannes a été de concevoir une vanne en plusieurs éléments préfabriqués en atelier.

4.1 Vanne Inférieure

La vanne inférieure Stoney est constituée de 6 éléments (2 têtiers et 4 éléments horizontaux) qui sont assemblés par boulonnage dans la passe.
Afin de garantir une bonne tenue mécanique et conformément à la DIN 19704, les assemblages boulonnés sont équipés de pions de cisaillement : ainsi aucun effort n'est transmis par frottement entre les éléments et les boulons ne sont pas sollicités en cisaillement.

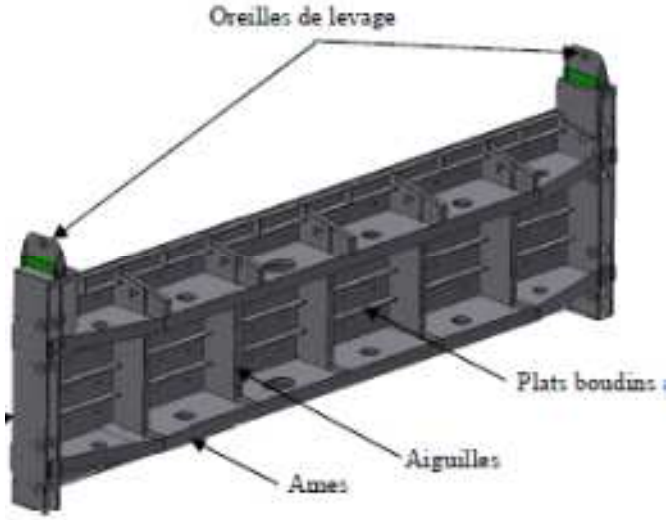
[1] Il s'agit du scénario le plus défavorable et le plus probable : une perte des alimentations de l'aménagement engendrant le déclenchement de l'usine et nécessitant un report du débit de tous les groupes par le barrage.



Graphique 3 : *Vue amont 3D éclatée de la structure de la vanne inférieure*

4.2 Vanne Supérieure

La vanne supérieure wagon est monobloc constitué d'un seul élément. Elle vient se glisser contre dans la vanne Stoney qui assure les fonctions de contre guidage et d'étanchéités.



Graphique 4 : *Vue aval 3D de la structure de la vanne supérieure*

4.3 Avantages

Les avantages principaux de ce type de conception sont :

- Le positionnement et le montage sur site sont plus faciles et rapides du fait de la présence de surface de référence plus importante (platines d'assemblage) et de moyens de positionnement (pions de centrage). Le montage des 6 éléments a été réalisé en 1 mois.
- L'assemblage par boulonnage est rapide avec des moyens légers. L'assemblage des 1332 boulons dont 822 à serrage contrôlé a été réalisé par une équipe de 2 personnes en 15 jours.
- Les retouches de peinture sur site sont limitées puisque les zones d'assemblage sont déjà métallisées et apprêtées (pas de sablage et de métallisation sur site).
- La possibilité de démonter la vanne pour réaliser des maintenances lourdes en particulier pour les éléments de guidage présents au niveau des têtiers, donc non accessibles.

4.4 Inconvénients

Les inconvénients principaux de ce type de conception sont :

- La fabrication des éléments qui nécessite des moyens d'usinage importants et un montage à blanc en usine (environ 50 jours d'usinage pour les 6 éléments).
- La mise en place d'un dispositif d'étanchéité entre éléments conciliant : la mise en œuvre, l'efficacité et la pérennité.
- La maintenance spécifique associée aux assemblages boulonnés.

5. MOYENS DE MANUTENTION

Les moyens de manutention sont indispensables tout au long de l'opération de remplacement des vannes. Ils sont nécessaires pour :

- le démontage et l'évacuation de la vanne,
- le démontage et l'évacuation des pièces fixes,
- le démontage et l'évacuation du système de manœuvre,
- l'acheminement des éléments de vanne,
- le montage des éléments de vanne,
- l'approvisionnement général du chantier…

Pour chacune de ces opérations, les besoins sont spécifiques : capacité de levage, zone de manutention, hauteur de levage, vitesse et précision de manœuvre, nombre de sollicitations…

Afin de répondre à ces besoins, le titulaire a choisi d'utiliser :

- le pont roulant EDF de la salle des treuils : il permet de réaliser les opérations de manutention dans la salle des treuils, mais aussi celles aux niveaux des rainures de vanne.
- Un portique de manutention, équipé de 2 palans à chaîne, positionné sur le pont route: il permet de charger/décharger les camions et de transférer les charges au dessus de la passe. De plus, la structure supérieure du portique est équipée d'une plateforme qui permet d'accéder à la salle des treuils.
- Un ensemble de 2 monorails équipés de palan à câble positionné sous la salle des treuils : il permet d'accéder en fond de passe.



Graphique 5 : *Portique de manutention et ensemble 2 monorails (entouré)*

La mise en place de ses propres moyens de manutention permet au titulaire de s'affranchir des problématiques liées aux moyens de manutention présents sur le site. En effet ces derniers peuvent :

- ne pas répondre aux besoins,
- être moins fiables (matériel vieillissant),
- être moins souples d'utilisation (absence de variateur de vitesse),
- être conçus pour des sollicitations moindres donc risque de vieillissement prématuré,
- être conçus pour des utilisations spécifiques.

L'ensemble de ces points peuvent être des facteurs de risque sécurité, d'aléas, d'indisponibilités, de retards, de litiges…

6. CONCLUSIONS

Les données d'entrées sont primordiales lors de la réalisation d'un projet. Dans le cas d'équipements remplacés « à l'identique », la définition et l'analyse de ces données d'entrées peuvent être omises. Or, une erreur, un doute sur les données d'entrées peut avoir des conséquences importantes dans le déroulement du projet ou dans l'exploitation de l'ouvrage.
Il est impératif que le maître d'ouvrage consacre du temps à l'expression de ses besoins et que le maître d'œuvre s'assure que les besoins soient bien exprimés, clairs et compris.

Le choix de la conception d'une vanne boulonnée permet de réduire les moyens à mettre en œuvre sur chantier. Par contre, cela nécessite une fabrication et des travaux préparatoires en atelier plus importants.

La mise en place de moyen de manutention spécifique permet de les adapter aux besoins et ainsi de garantir une certaine maîtrise des risques : QCD, SST…
Dans le cadre de PIZANCON, ce choix a été fait par le titulaire qui en assume les coûts.
Par contre, afin de garantir une certaine maîtrise des risques, il peut être intéressant dans le cadre d'un projet d'imposer au titulaire la mise en place de ses propres moyens de manutention.

INSTALLATION DE VANNES D'ISOLEMENT A L'ENTREE DU CANAL D'ORAISON

Installation of isolation valves at the entrance of the Oraison channel

Thomas DONIAS
EDF – CIH, 10 avenue Viton, Immeuble Le Goëland, 13009 Marseille
thomas.donias@edf.fr

MOTS CLÉS

Organe d'isolement, entrée canal, mise en transparence de barrage, transport solide en Durance.

RÉSUMÉ

Le canal d'Oraison est situé dans les Alpes de Hautes Provence. Il achemine les eaux de la Durance retenues dans le barrage de l'Escale vers l'usine d'Oraison
Dans le cadre de l'amélioration des transports solides en Durance, la mise en place de l'organe d'isolement du canal d'Oraison, va permettre la réalisation des « transparences » et des « effacements » du barrage de l'Escale en période de crues (débit > 500 m3/s). Ces transparences vont permettre, par les capacités accrues de décantation des sédiments sur la Durance, de réduire la teneur en sédiments de l'ordre de 10% en sortie de Cadarache et ainsi de diminuer de façon significative la concentration en sédiments dans l'étang de Berre.
En l'absence de cet organe d'isolement, la réalisation des transparences du barrage était délicate car nosive pour le canal (tenue du revêtement) et à l'exploitation (surdébits, gestion de la crue).
L'objectif est donc de permettre l'isolement du canal d'Oraison de la retenue de l'Escale.
L'organe installé est composé de deux clapets trapézoïdaux installés à l'aval immédiat de la prise d'eau du canal d'Oraison.
La largeur de la prise d'eau est de 54m. Les deux clapets représentent une surface d'environ 450 m². L'isolement du canal peut être effectué en 30 minutes maximum. L'organe d'isolement a été mis en service fin 2013.
Cet article présente les études de conception, la fabrication, le montage et la mise en services des vannes.

ABSTRACT

The canal of Oraison is located in the Alpes de Haute Provence. It carries the waters of the Durance retained in the dam of l'Escale to the plant of Oraison.
As part of improving solid transport Durance, the establishment of the isolation valves of Oraison channel, will enable the achievement of "transparency" and "deletion" of the dam in Escale during floods (flow > 500 m3/s). Such transparency will enable, for the increased capacity of sediment settling on the Durance, reduce sediment content of about 10% in output Cadarache and so significantly reduce the concentration of sediment in the pond of Berre.
In the absence of this isolation device, achieving the transparency of the dam was delicate because nosive for the channel (resistance of the coating) and exploitation (excess flow, flood management).
The target is to allow the isolation of Oraison channel of the retaining Escale.
The device is composed of two trapezoidal flaps installed immediately downstream of the inlet structure of Oraison channel.
The width of the inlet structure is 54m. Both valves represent an area of approximately 450 m². Isolation of the channel can be performed in 30 minutes or less. Isolation organ was commissioned in late 2013.
This article presents the design engineering, manufacture, installation and commissioning services of valves.

1. CONTEXTE ET FONCTION DE L'OUVRAGE

Le canal d'Oraison (classé A au sens du décret de 2007, 21.5 km de long, 5Mm3 de capacité environ) constitue l'ouvrage d'amenée de l'usine d'Oraison, située dans les Alpes de Hautes Provence (puissance de 175 MVA pour un débit d'équipement de 240 m3/s). Il permet de faire transiter les eaux de la Durance déviées par le barrage de l'Escale (24m sur TN, 3.5Mm3 de capacité actuellement). L'aménagement a été mis en service en 1964.

Le barrage de l'Escale possédait initialement une capacité de 15Mm3 à sa construction. En conséquence du très fort transport solide de la Durance, la capacité de la retenue était tombée à 5Mm3 au bout de 20 ans d'exploitation. Ce très fort taux d'engravement entraine une difficulté pour la conduite du barrage et deux problèmes environnementaux :

- L'impossibilité de vidanger complètement la retenue sans engendrer de très forts taux de MES (Matière En Suspension) à l'aval du barrage (culot très important),
- La perte d'une capacité de décantation des eaux de la Durance quand celles-ci sont aiguillées vers l'étang de Berre.

Le barrage de l'Escale avait été conçu comme un barrage mobile avec ses 5 vannes segment de fond et ses 5 clapets de surface, malgré une grande hauteur (24m), afin de pouvoir être effacé en crue et ainsi permettre le transit sédimentaire naturel. Toutefois, le canal d'Oraison ne pouvant pas être isolé de la retenue (aucune vanne à l'entrée du canal n'éxitait jusqu'à présent), un abaissement puis un remplissage de la retenue en crue signifiaient un cycle vidange/remplissage du canal, et donc des variations du niveau d'eau dans le canal préjudiciables pour sa structure ainsi qu'une perte d'exploitation de la chaîne de la Durance de plusieurs heures. La vidange du canal dans la retenue entraîne également une diminution de l'effet de chasse attendu de la crue.

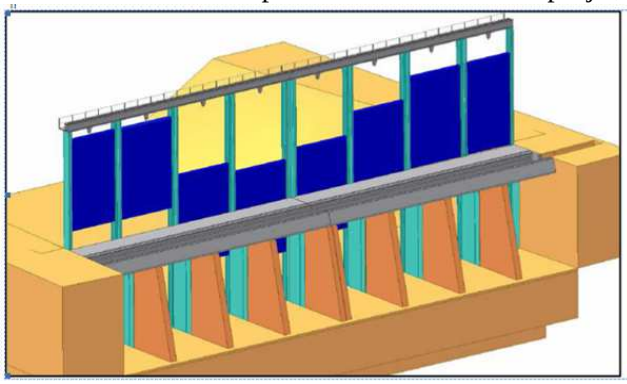
Ainsi, afin de pouvoir gérer le transit sédimentaire lors des crues, il a été décidé de construire à l'entrée du canal d'Oraison et juste à l'aval de la prise d'eau, un organe d'isolement du canal. Cet ouvrage a pour but de permettre l'abaissement du plan d'eau de l'Escale en crue sans vidanger le canal d'Oraison. Cet ouvrage doit donc résister à la poussée hydrostatique du canal vers la retenue.



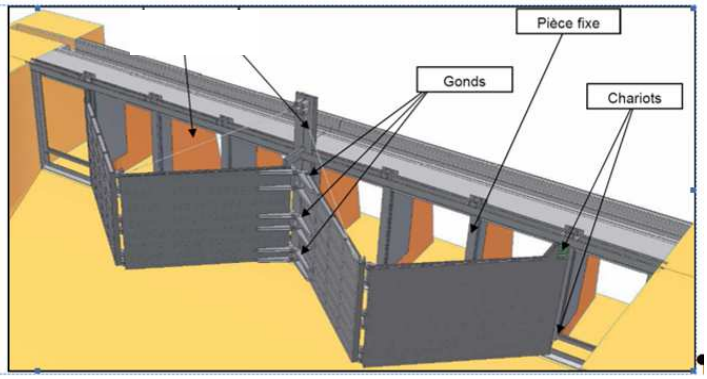
Photo 1 : Vue d'ensemble de la retenue de l'Escale et du canal d'Oraison

2. PARCOURS D'INGENIERIE

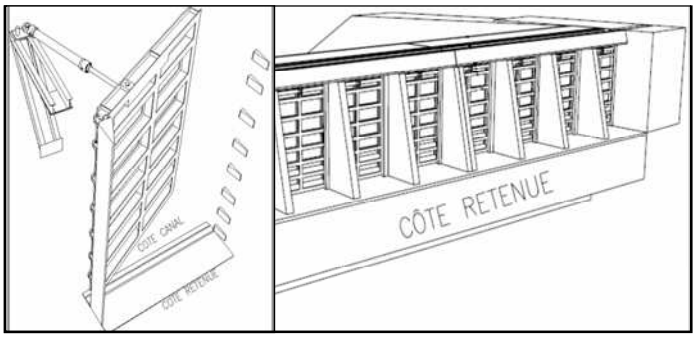
Le projet d'organe d'isolement du canal d'Oraison a vu le jour au niveau ingénierie EDF dans les années 2000. Les différentes études préliminaires et d'avant projet, ont permis l'analyse de 4 solutions techniques.



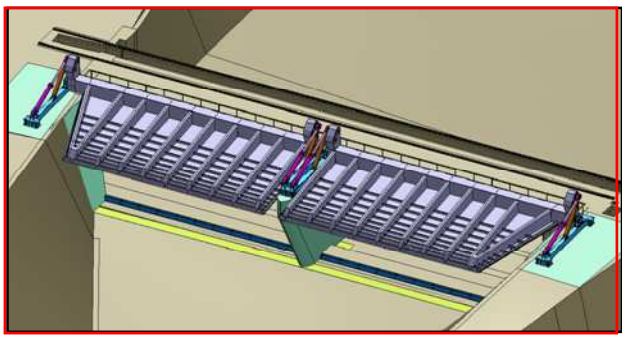
Solution A : 8 batardeaux



Solution B : 2 portes battantes articulées



Solution C : 8 portes battantes indépendantes



Solution D : 2 clapets trapézoïdaux

Photo 2 : Solutions étudiées en phase ingénierie (APS et APD)

2.1 Etudes d'APS

Les solutions A, B et C ont été étudiées au stade de l'APS en 2007. La solution C (8 portes battantes) est apparue comme étant la meilleure d'après l'analyse comparative suivante :

Les battants articulés (solution B) sont composés de nombreuses pièces en mouvement en comparaison aux battants indépendants (solution C) et batardeaux (solution A). Ce système est donc mécaniquement compliqué et sujet à des disfonctionnements. De plus, l'amplitude de mouvement est très importante (la moitié de la prise d'eau) ce qui facilite les désalignements et les mauvais guidages (axes, chariots). D'un point de vue sécurité, un grand nombre de pièces implique plus de risques de rupture, le système est donc moins fiable.

La solution à battants indépendants ne pose pas de problèmes d'encombrement contrairement aux battants articulés (motorisation sur berge) et aux batardeaux, ces derniers offrant une très importante prise au vent. La solution à battants indépendants est le seul système s'ouvrant naturellement (sécurité passive) avec la pression hydrostatique en cas de manque d'énergie lorsque le niveau de la retenue est plus haut que celui du canal. Ceci est un point de sécurité majeur et un critère fort de la MOA.

Les solutions à batardeaux et battants articulés nécessitent un rallongement des pilettes GC sur une importante longueur alors que les battants indépendants n'en nécessitent pas.

La mise en place des battants indépendants est complexe (utilisation d'un outillage) mais nécessite une grue de moindre capacité que pour les batardeaux et battants articulés.

L'organe de coupure sera mis en place dans une zone à forts aléas sismiques (zone sismique 1B). Par conséquence, la tenue sismique est un critère de choix.

Face à cette sollicitation, dans leur position ouverte (la quasi-totalité du temps) :

- Les batardeaux présentent un élancement très important et ils sont fixés en extrémité de pile et pilette qui sont des zones fragiles.
- Les battants articulés présentent un porte-à-faux et sont aussi fixés à l'extrémité de la pile centrale.
- Les battants indépendants, de part leur taille plus réduite, leurs nombreuses fixations et leur position centrale dans la pile, semblent beaucoup mieux adaptés.

Conclusion sur la solution retenue des battants indépendants :

Le système de battants indépendants est mécaniquement simple en comparaison aux battants articulés. La solution à battants indépendants est la mieux adaptée concernant la tenue sismique. Cette solution est également la seule à répondre au besoin d'une réouverture naturelle de l'organe sans énergie, sous un effort hydrostatique (delta H amont/aval).

La motorisation est directe entre le GC et la porte évitant ainsi toute pièce intermédiaire susceptible de rompre (bielles, etc.).

Aucun élément ne gênera le passage sur les berges ou sur le tablier. L'arase est la plus haute possible : 150mm sous le tablier. La section de passage perdue est nettement moins importante pour la solution à battants indépendants que pour la solution à battants articulés.

Le temps d'inactivité du canal (assec) est de 55 jours soit 15 jours de moins que les deux autres solutions (batardeaux et battants articulés).

La mise en place des battants indépendants est la plus aisée car les masses en jeu sont au maximum d'environ 20 tonnes par portes comparées aux 60 tonnes de la pièce fixes de battants articulés.

2.2 Etudes de « Pré-APD » (APS Bis)

Après de nouvelles études en 2009 et la reprise du dossier par un nouveau chargé d'affaire, le CIH a décidé de confronter la solution d'APS, à une autre conception qui est celle de la solution D (2 clapets trapézoïdaux).
Cette dernière étude a permis de dégager **la solution finale de ce projet qui est celle de la solution D (2 clapets trapézoïdaux)** d'après l'analyse comparative suivante :

Critères de jugement	Pondération des critères	Solution Battants Note/10	Observations	Solution clapets Note/10	Observations
Respect des critères de fonctionnement	0.25	9	Les deux solutions respectent les critères imposés au cahier des charges de la MOA. La solution battants obtient une meilleure note compte tenu du fait qu'en cas de défaillance des organes de manoeuvre portes fermées,il est possible d'ouvrir le barrage avec des matériels courants (tire-forts). La priorité à l'ouverture est donc mieux respectée que pour la solution clapets.	8	Dans cette solution, il est possible de procéder à la fermeture des clapets même en cas de manque d'énergie. En cas de panne à l'ouverture, le clapet s'ouvrira partiellement, sans pour autant libérer la totalité de la section de la passe. Cependant, les organes de manoeuvre ont été doublés, 1 seul vérin pouvant réaliser la manoeuvre. De même les groupes hydrauliques sont doublés, il est également possible d'installer un GE. La probabilité de ne pouvoir ouvrir un clapet fermé peut donc être considéré comme très faible.
Fiabilité	0.2	7	La fiabilité des portes à battants est jugée plus faible que celle des clapets pour deux raisons principales : - Le nombre de composants est sensiblement plus élevé que pour les clapets, - Les actionneurs sont soit immergés soit en zone de marnage. Ils seront donc plus sujets aux dysfonctionnements. Le démontage des composants électromécaniques (paliers, vérins, etc.) nécessite la mise à sec du canal.	9	Le nombre de composants est sensiblement réduit par rapport à la solution portes.
Risques chantier / incertitudes GC	0.2	6	Dans cette solution, une incertitude forte pèse sur l'état des structures BA qui supporteront les nouveaux organes	6	Incertitudes liées à la géotechnique et à l'étanchéité du parement du canal.
Cout global	0.15	7	La solution battants semble légèrement moins couteuse que la solution clapets. Les écarts restent cependant mesurés.	6	La solution clapet semble légèrement plus couteuse que la solution battants. Les écarts restent cependant mesurés.
Maintenabilité	0.1	5	La position des portes ainsi que de leurs organes de manoeuvre rendent difficiles les opérations de manutention et d'entretien. La mise à sec du canal est un préalable nécessaire à toute intervention d'ampleur.	8	Dans cette solution, tous les composants de manoeuvre sont accessibles, inspectables, remplaçables sans nécessiter la mise à sec du canal.
Risque environnement	0.05	6	Les vérins sont dans l'eau, l'huile sera du type biodégradable. Il n'y a donc pas de risque environnemental majeur.	8	Les vérins sont hors d'eau, l'huile sera du type biodégradable. Il n'y a donc pas de risque environnemental majeur
Esthétique	0.05	9	Cette solution ne présente aucun impact visuel. L'ensemble des nouvelles structures étant sous l'eau. Seul le local de commande sera visible.	7	Les nouvelles structures ne dépassent pas du niveau du sol. Elles seront cependant visibles depuis la RN à proximité.
TOTAL non pondéré		49 pts		52 pts	
Moyenne avec pondération		6,15/10		**7.45/10**	

3. CONCEPTION ET ETUDES D'EXECUTION

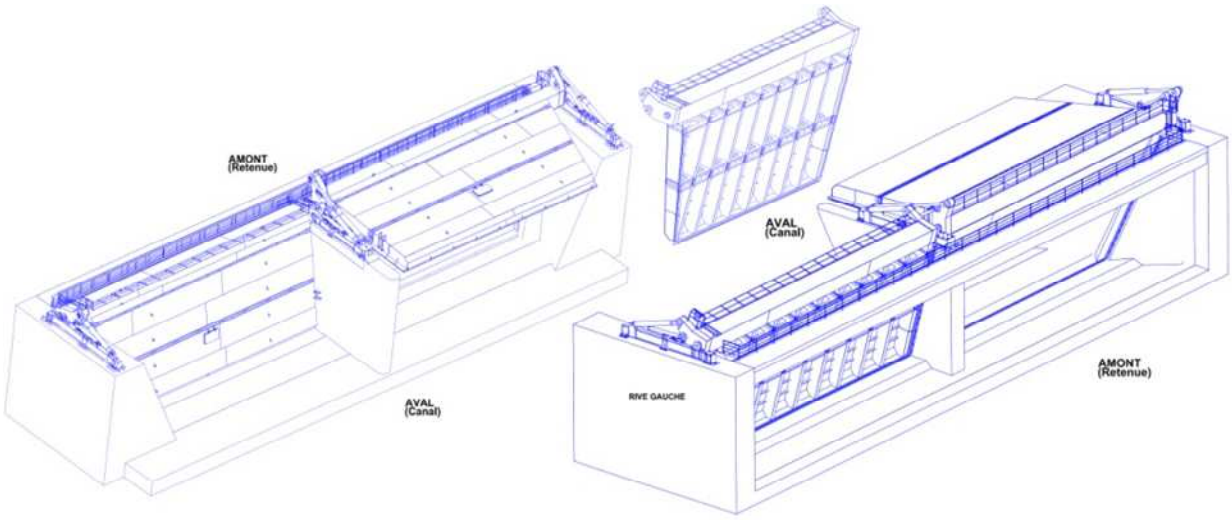
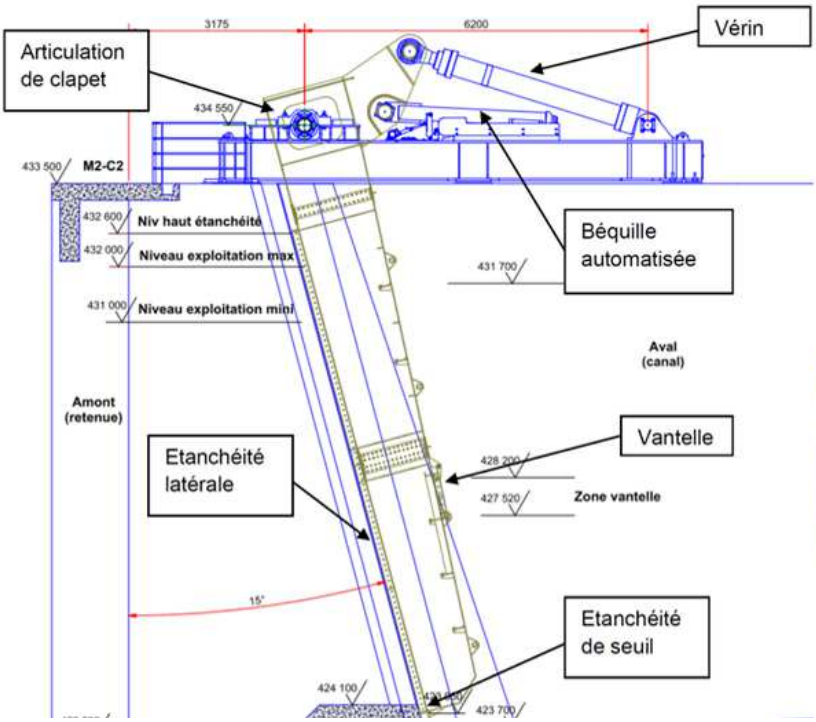


Photo 3 : Vue d'ensemble de l'organe d'isolement



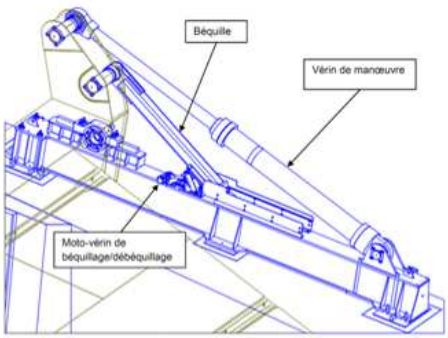


Photo 4 : Vue en coupe : Clapet fermé (15°/verticale) *Photo 5 : Vue d'ensemble châssis de rive*

3.1 Fonctionnalités attendues

- Isolement du canal :
  - Clapet fermé avec un canal plein et une retenue vide.
- Temps de fermeture de l'organe d'isolement :
  - 30 minutes pour l'ensemble de la prise d'eau à partir d'un équiniveau et d'une vitesse nulle.
- Réalimentation du canal :
  - Possibilité de réalimenter le canal jusqu'à 3 m3/s via une vantelle par clapet.
- Maintien d'un delta H amont-aval (retenue vers canal) pour l'exploitation :
  - Mise en place d'une surpression oléohydraulique à la fermeture pour permettre de conserver les clapets fermés jusqu'à un delta H amont-aval de 30 cm.
- Ouverture intrinsèque et naturelle de l'organe d'isolement :
  - Mise en drapeau des clapets à partir d'un delta H amont-aval de 30 cm.

3.2 Chargements

Voici les principaux cas de chargement dimensionnants pour le projet (chaudronnerie, vérins, pièces fixes, oléohydraulique) :

- Isolement du canal :
  - Niveau amont (retenue « vide ») : 423.50 m NGF
  - Niveau aval (canal en eau) : 431.70 m NGF
  - Surpression oléohydraulique
  - Poids propre
- Clapets fermés et retenue plus haute que le canal (Scénario possible en fin de crue) :
  - Niveau amont (retenue) : 432.00 m NGF
  - Niveau aval (canal en eau) : 431.70 m NGF
  - Surpression oléohydraulique
  - Poids propre
- Clapet hors d'eau (position béquillée ou non) :
  - Charge hydrostatique : Aucune
  - Vent
  - Neige
  - Poids propre
- Des cas particuliers ou accidentels ont bien entendu été également étudiés :
  - Manœuvre d'un clapet bloqué en position fermée + 2 vérins en fonctionnement - Début d'ouverture
  - Ouverture d'un clapet fermé depuis le point d'accroche fixe sur la structure au moyen d'une grue
  - Ouverture et fermeture d'un clapet avec des niveaux amont et aval à sec
  - Dimensionnement des béquilles et des verrous en position fermée avec une manœuvre de fermeture engagée

3.3 Conception

3.3.1 Structure générale des clapets et des châssis

Les dimensions de chaque clapet sont de 27 m x 12 m x 3 m pour un poids unitaire d'environ 90 tonnes.
Chaque clapet repose sur un châssis de rive et sur un châssis (commun aux deux clapets) sur la pile centrale.
Les dimensions d'un châssis sont de 8.5 m x 1 m x 1 m pour un poids unitaire de 10 tonnes.
Chaque clapet est composé de 3 tronçons liaisonnés par des éclisses.
La liaison entre le « tronçon bas » et le « tronçon milieu » est immergée. Les liaisons éclissées ont dues être étanchées par l'usinage de gorges dans chaque éclisse et l'ajout d'un joint torique.
La matière des clapets et des châssis est S355 J2 suivant la norme NFEN 100025.
Les clapets sont revêtus d'une peinture PED 204 (ACQPA C5ANV avec tenue pour une surface chaude : 60°C<t<120°C). Le choix d'un PED 204 a été fait car les clapets seront en très grande majorité hors d'eau.

3.3.2 Vérins et centrale oléohydraulique

- Chaque clapet est équipé de deux vérins
- Caractéristiques des vérins :
  - Fût ⌀380 mm, tige ⌀220 mm en acier inoxydable, course = 3.15 m,
    Longueur totale 100% ouvert = 7.4 m, poids à vide = 3.8 T
- Les vérins fonctionnent en tirant pour la fermeture (72 900 daN) et en poussant pour l'ouverture (174 600 daN).
- Réservoir de la centrale oléohydraulique = 1200 litres.
- Huile bio acceptable TOTAL PX 5702

3.3.3 Vitesse d'eau dans le canal

L'organe d'isolement doit être fermé avec une vitesse nulle à la prise d'eau, afin de ne pas soumettre les ouvrages mécaniques à des efforts considérables. Nous avons donc mis en place 2 sondes immergées Nivus

(US) à l'aval de l'organe d'isolement afin de mesurer la vitesse de l'eau dans le canal et ainsi autoriser ou non, l'ordre de fermeture des clapets.

3.3.4 Impact du vent

Lors d'une manœuvre (surtout au début lorsque les clapets sont hors d'eau), l'intégralité du poids propre des clapets est repris par les paliers et les vérins. C'est pourquoi, un seuil de vitesse de vent maximal a été fixé à 90 km/h, afin de ne pas mettre en péril la struture, et principalement la tenue des vérins.

3.3.5 Mise en surpression du réseau oléohydraulique lors de la fermeture des clapets

Lors d'un effacement du barrage de l'Escale, le niveau de la retenue va être amené à baisser de manière significative. Les clapets seront fermés et le canal restera donc lui en eau.
En fin de crue, l'exploitant remontera la cote de la retenue de l'Escale et arrivera, in fine, à équiniveau entre le la retenue et le canal « isolé ».
Un des buts de l'organe d'isolement est de conserver le maximum d'eau dans le canal durant l'effacement du barrage. L'ouverture des clapets n'est donc autorisése qu'à partir de cet équiniveau.
Cependant, pour donner de la flexibilité à l'exploitant (gestion difficile du niveau de la retenue) et s'affranchir de problématiques telles que d'éventuelles vagues ou des mouvements d'eau, l'organe d'isolement pourra rester fermé même avec un niveau de retenue supérieur de 30 cm à celui du canal.
Pour cela, lors d'une fermeture des clapets, il est appliqué dans le réseau oléohydraulique et donc dans les vérins, une surpression oléohydraulique équivalente à une pression hydraulique d'un delta H de 30 cm dans le sens retenue vers canal.

3.3.6 Mise en sécurité de l'organe d'isolement

Une des demandes de la maitrise d'ouvrage était de répondre au besoin de « réouverture intrinsèque et naturelle » de l'organe d'isolement.
Ainsi, lors d'une phase d'isolement et quand le niveau de la retenue dépasse celui du canal, l'organe d'isolement doit avoir une capacité intrinsèque à la réouverture.
Le but de tout cela est bien évidement la pérennité des matériels et des ouvrages, mais aussi garantir un niveau du canal toujours le plus haut possible.
Nous avons donc mis en œuvre, au niveau de la conception des clapets (dimensionnent, cinématique…) ainsi qu'au niveau oléohydraulique, une mise en sécurité des clapets assimilable à une mise en drapeau.
Cette mise en drapeau consiste à mettre en communication les 2 chambres de chaque vérin, afin que les clapets se mettent à l'équilibre et hors contraintes mécaniques. Des gicleurs ainsi qu'une valve d'équilibrage garantissent constamment les vitesses de manœuvre, même lors d'une mise en sécurité, en drapeau.
Cette mise en drapeau est réalisée sur la détection d'un seuil de pression finement défini et qualifié équivalent à un delta H de 30 cm retenue vers canal.

3.3.7 Déplacement de la pile centrale (Génie Civil)

La conception du génie civil, impose que la pile centrale soit indépendante mécaniquement des seuils des clapets.
Dans le cas d'isolement du canal, sous la poussée hydrostatique appliquée aux clapets (via le seuil et les paliers), nous avons un mouvement de la pile centrale vers l'amont :

- 7.2 mm en pied de la pile. Soit 7.2 mm de décalage par rapport aux pièces fixes de seuil des clapets
- 13 mm en tête de pile

Solutions trouvées vis-à-vis de ces déplacements :

- 7.2 mm en pied :

Pièces fixes : La pièce fixe latérale (liée à la pile centrale) et la pièce fixe de seuil étant des éléments rigides en acier inoxydables, et afin de garantir la liaison entre ces éléments, nous avons mis en place un bloc néoprène de liaison entre ces deux éléments (shore 50, longueur 160 mm et longueur utile de déformation de 30 mm).
Etanchéités des clapets : Les clapets devant être étanches dans cette zone, un raccord en joint cornière néoprène 60 shore équipé d'un raidisseur, a été mis en œuvre.

- 13 mm en tête de pile :

Mise en place de rotule sur les paliers (un palier fixe et un palier mobile pour reprendre également la dilation thermique). Les jeux entre les clapets et les pièces fixes ont également été étudiés finement. Les joints type cornière des clapets peuvent également reprendre tous ces mouvements.

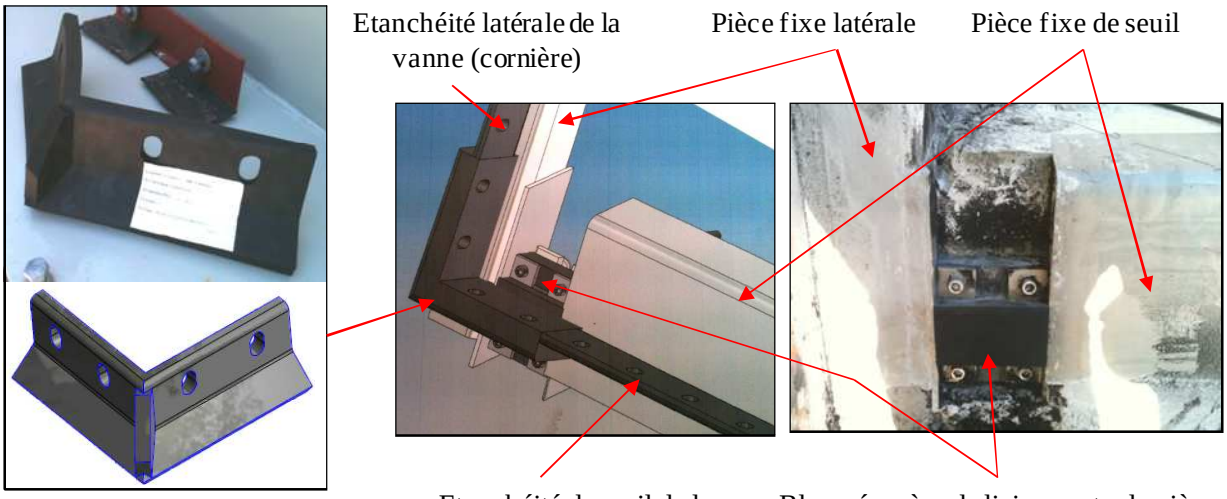


Photo 6: Gestion des déplacements de la pile centrale vis-à-vis de l'étanchéité des clapets

4. FABRICATION DE L'ORGANE D'ISOLEMENT

Les 2 clapets ont été fabriqués simultanément et en parallèle dans les ateliers de Joseph Paris (44).
Pour des raisons de transport et de levage sur site, chaque clapet est composé de 3 tronçons (découpes horizontales), qui seront ensuite éclissés sur site.
JPSA a fait le choix, de fabriquer, dans un premier temps, l'intégralité du bordé des clapets, au sol.
Une fois le bordé fabriqué, JPSA est ensuite venu ajouter l'ensemble du réseau d'aiguilles et des raidisseurs sur le bordé.
Le tronçon Haut est celui sur lequel est monté les paliers et sur lequel viendront se connecter les vérins et les béquilles.
Ce tronçon comporte des caissons étanches. Ces caissons ont été intégralement inertés à l'azote.
Les deux clapets (composés de 3 tronçons) ont fait l'objet d'un montage à blanc complet en atelier afin de garantir les dimensions des clapets finis et aussi garantir le bon éclissage des éléments sur site.
Un essai à blanc de la cinématique de béquillage a également été réalisé.
L'ensemble de la peinture des clapets a été effectué dans les ateliers de JPSA par la société Cryo West. Les zones de circulation sur les clapets ont été identifiés par une peinture anti dérapante d'un RAL légèrement plus foncé.
Un modèle réduit des liaisons éclissées a été également réalisé en atelier. Ce modèle comportait un caisson qui a été mis en pression afin de valider le montage par éclissage et déterminer de taux d'étanchéité de ce dernier.

5. CHANTIER DE MONTAGE DES CLAPETS

5.1 Chantier de Génie Civil – Intégration des pièces fixes - 2012

La très grande majorité des travaux de génie civil a été réalisée lors de l'AFD4 (Arrêt de file Durance n°4) de 2012. La partie Génie Civil du projet a consisté en la construction des ouvrages suivants :

- Une pile centrale appuyée sur une semelle fondée sur micro pieux pour supporter le châssis des deux vérins centraux des clapets et les pièces fixes verticales d'étanchéités,
- Deux seuils en radier pour assurer la reprise des efforts des clapets et l'étanchéité, fondés sur micropieux,
- Des bajoyers pour assurer le raccordement avec l'existant et prendre en compte la forme de convergent du Génie Civil existant,
- Deux culées sur chaque rive pour recevoir les châssis des vérins de rive.

L'opération Génie Civil s'est déroulée sur 4 à 5 mois, pour la mise en œuvre de 900m de micro-pieux, 1300 m^3 de béton et 150 tonnes d'acier. Il a également été effectué la mise en place de toutes les pièces fixes, la création de tous les caniveaux de passages des câbles électrique et des tuyauteries oléohydraulique, et la réalisation soutènement et de la dalle local technique.



Photo 7: Chantier de Génie Civil (2012)

Outre les travaux directement liés au futur organe d'isolement, le chantier de 2012, nous a contraint à réaliser les opérations suivantes.

5.1.1 Désenvasement de la prise d'eau et batardage amont du chantier (500 m²) – Isolement vis-à-vis de la retenue de l'Escale

Le profil hydraulique de la prise favorise malheureusement l'envasement de cette dernière en amont du plan de grille. Dans l'optique du batardage de ce dernier, il était impératif de désenvaser la partie basse du plan de grille.
Un grappinage et un désenvasement se sont donc déroulés en septembre 2011 avec une grue treillis de 40 tonnes équipée d'une benne preneuse hydraulique et des équipes de scaphandriers. Cette opération a permis d'évacuer près de 1150 m3 de bois et de vase.
Une fois l'intégralité du plan de grille dégagé, une expertise complète de celui-ci a pu être conduite, des réparations effectuées et un accord pour la phase de batardage a pu être prononcé.
La mise en place d'un batardeau sur l'ensemble du plan de grille de la prise d'eau a donc ensuite été réalisée. Ce dernier était composé de 93 panneaux en aluminium qui ont été installés en poste de 2 x 8h, par plongeurs et cordistes. Ce batardeau était également l'unique verrou d'isolement pour l'ensemble des travaux effectués dans le canal durant l'AFD 4.

5.1.2 Batardage aval du chantier – Isolement vis-à-vis du canal resté temporairement en eau.

Mise en place d'environ 1500 big bag afin d'isoler le chantier à l'aval, du canal resté temporairement en eau.

5.1.3 Siphon de longueur 150 m pour restitution dans le canal de 3 m3/s maximum

Mise en place de 3 tuyauteries indépendantes en PEHD diamètre 800 mm permettant de restituter de 1 à 3 m3/s pour le débit conventionné du canal d'Oraison. Soutirage de l'eau dans la retenue de l'escale et rejet dans le canal par phénomène de siphonnage. Des pompes d'amorçage étaient nécessaires pour amorcer le phénomène.



Photo 8: Grappinage et désenvasage – Batardage amont du plan de grille - Batardeau Big bag aval et siphons

5.2 Montage des clapets - 2013

5.2.1 Pré-montage du clapet RD et Montage du clapet RG au sol

Les 6 tronçons des 2 clapets, ainsi que les châssis et les vérins ont été livrés sur site en avril 2013.
Le transport de chaque tronçon a nécessité un transport exceptionnel sachant que les plus gros colis avaient les caractéristiques suivantes :

- Tronçon haut (caisson) : lg : 28 m x 3 m² pour un poids de 31 tonnes
- Tronçon bas : lg : 26 m x 2 m x 4.7 m pour un poids de 25 tonnes

Le clapet RG a été intégralement monté au sol.
Seul les tronçons inférieurs et milieu du clapet RD ont par contre été pré-montés au sol. Le clapet RD étant le plus éloigné, il n'était pas possible de le gruter entièrement.
Les 3 tronçons de chaque clapet ont été raccordés au moyen d'éclisses positionnées à l'amont et à l'aval des liaisons.
L'ensemble des liaisons éclissées représente plus de 6000 boulons HV serrés au couple puis à l'angle.
L'ensemble des retouches peinture a été effectué au niveau des éclisses et des raccordements des tronçons.
Toute la serrurerie embarquée sur les clapets a été montée lorsque cela était possible avant le levage.



Photo 9: Montage des tronçons des clapets – laisons éclissées

5.2.2 Grutage des clapets

Les clapets ont ensuite été grutés depuis leur zone de montage au sol, jusqu'au dessus du canal, au moyen d'une grue Médiaco CC2800 (300 tonnes de grue et 300 tonnes de contre poids : 35 camions semi-remorques).

Le grutage s'est effectué sur plusieurs jours début juin 2013. Durant toutes les manœuvres, le canal d'Oraison est resté en service.

Voici les principaux colis qui ont été grutés :

- Clapet RG (clapet entièrement monté) : 87 tonnes gruté à 54m
- Clapet RD Tronçon haut (caisson) : 33 tonnes gruté à 81 m
- Clapet RD Tronçons Milieu et bas prémontés : 54 tonnes gruté à 79 m

Le « clapet rive gauche » a été intégralement monté au sol puis gruté et mis en place en un seul morceau.



Photo 10: Grutage du clapet RG

5.2.3 Fin du montage au dessus du canal + raccordement

Pour le clapet rive gauche, seuls les tronçons 2 et 3 ont été prémontés au sol. Le clapet rive gauche (le plus éloigné de la grue) a donc été gruté en 2 fois. Le raccordement de la jonction éclissée restante ainsi que la finition de la peinture ont donc été effectués au dessus du canal resté en service (utilisation d'un ponton flottant et d'un chariot sur rail en dessous du clapet).



Photo 11: Vue d'ensemble de l'organe d'isolement

5.2.4 Local technique

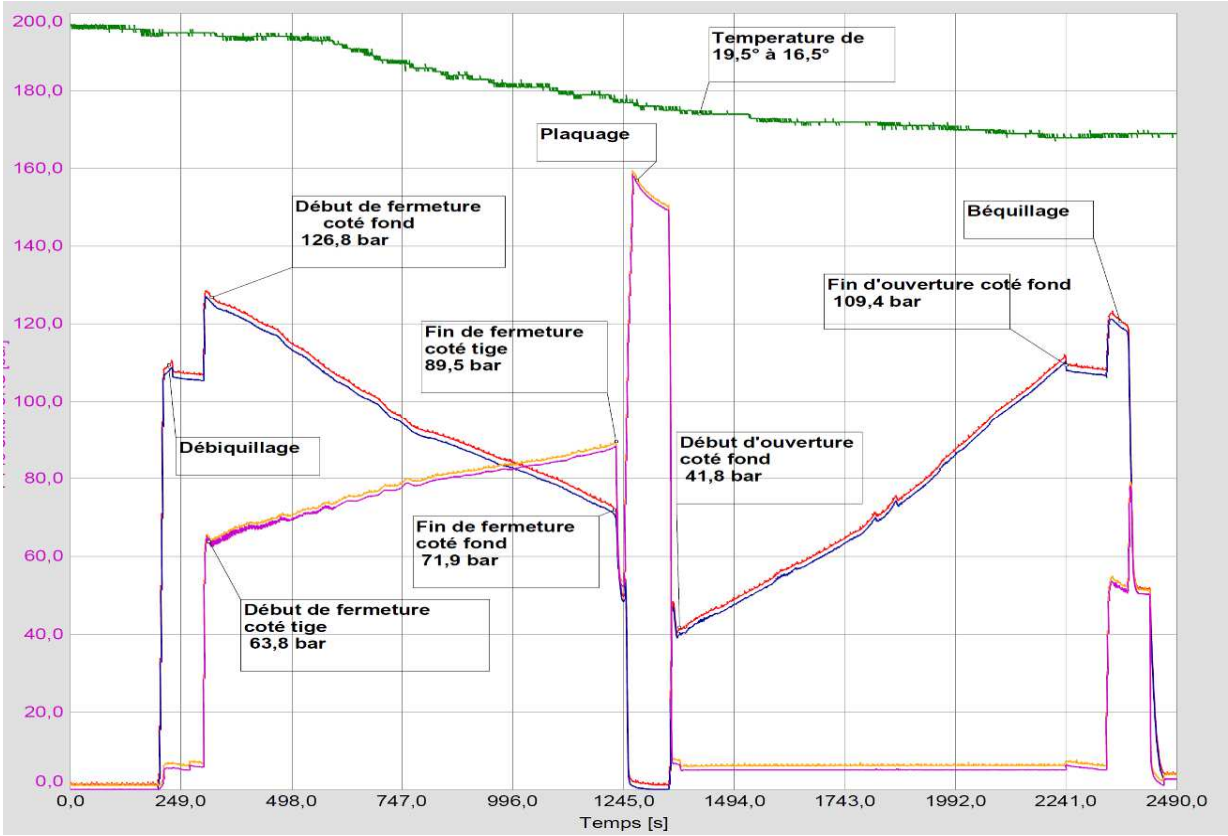
Un local technique neuf a été construit, équipé et intégré à la prise d'eau, spécifiquement pour l'organe d'isolement.
Réalisé à partir d'une structure légère type conteneur, le local technique a été complètement équipé avec la centrale oléohydraulique et l'intégralité du contrôle commande, avant d'être livré et installé sur site.

6. QUALIFICATION DE L'ORGANE D'ISOLEMENT

6.1 Essais en eau morte et en assec coté amont

6.1.1 Essais de manœuvre en eau morte

Afin de valider la cinématique des clapets et l'interaction entre ces derniers et les pièces fixes, des essais en eau morte (vitesse nulle et équiniveau) ont été réalisés. Ces essais avaient également pour but de valider l'ensemble des chaînes cinématiques et fonctionnelles (mécanique et C/C).



Graphique 1 : Relevés de pression lors d'un cycle complet d'ouverture – fermeture d'un clapet

6.1.2 Essais d'étanchéité et déformation des clapets

Des essais d'étanchéité ont été conduits après avoir remis en place le batardeau amont composé de 93 plaques fixées sur le plan de grille de la prise d'eau.

Taux de fuite (yc compris 50% d'incertitude sur la mesure) :

- Clapet RD : 3.45 l/min mesurés pour 144 l/min prévs au marché : 2 % de l'objectif
- Clapet RG : 13.5 l/min mesurés pour 144 l/min prévus au marché : 9 % de l'objectif

Les taux de fuite mesurés sont excellents et l'étanchéité des clapets peut quasiment être qualifiée de parfaite, étant donné qu'il existe environ 39 m linéaires d'étanchéité pour chaque clapet



Photo 12 : Constat du taux de fuite des clapets
Photo prise entre le batardeau installé sur le plan de grilles, et l'organe d'isolement (clapet RG sur la photo)

Mesure de flèche : Nous avons mesuré 34 et 35 mm de flèche au centre de chaque clapet pour une valeur théorique de 32mm.
Etant donné la valeur des flèches et les taux de fuite quasiment négligeables, les essais en assec ont été validés.

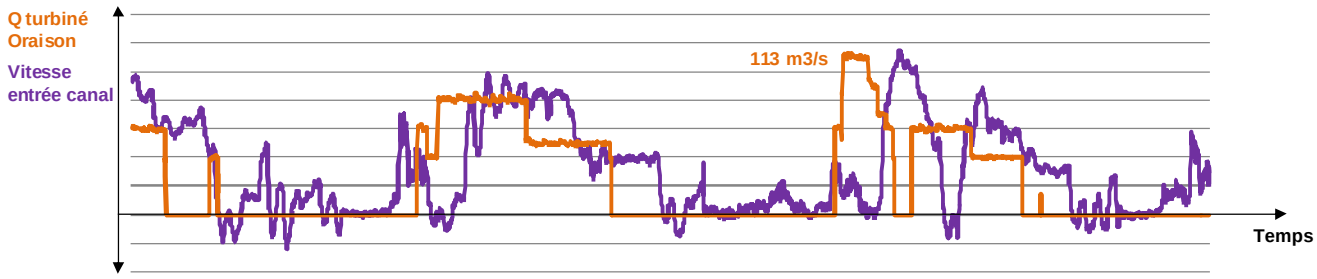
6.2 Essais en réel de l'organe d'isolement

6.2.1 Fermeture en réel de l'organe d'isolement et ouverture intrinsèque/naturelle

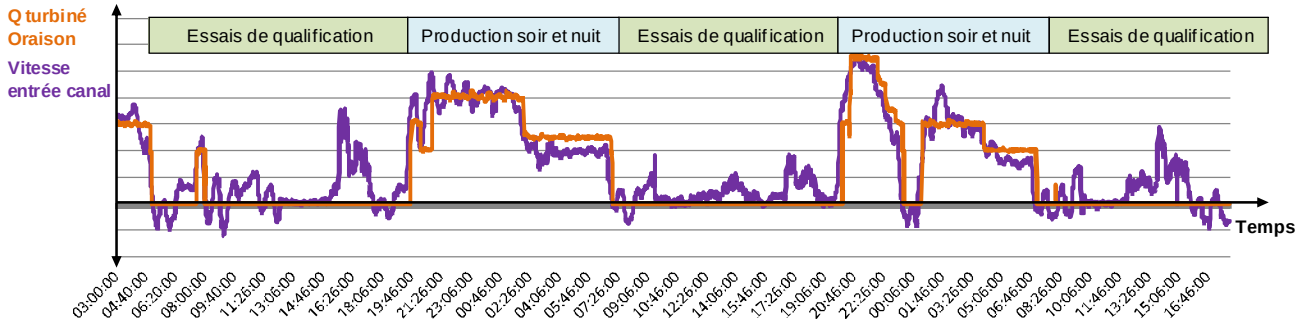
Suite aux essais de qualification en eau morte et en assec, nous avons conduit des essais de qualification en situation réelle et conformes à une exploitation normale de l'organe d'isolement.
Après un programme de turbinage, les groupes d'Oraison ont donc été arrêtés. Nous avons attendu que la vitesse d'eau soit nulle à la prise d'eau pour ensuite engager la fermeture de l'organe d'isolement et ainsi isoler complètement la retenue du canal.
Le Centre de Conduite Hydraulique ainsi que les divers Groupement d'Usine impactés par cet essai, ont réalisé une baisse du niveau de la retenue de l'Escale de plusieurs dizaines de cm afin de simuler un effacement du barrage lors d'une crue (baisse du plan d'eau).
Une fois la baisse de la retenue effectuée, le CCH et les GU ont remonté le niveau de la retenue de l'Escale plus haut que le niveau du canal afin d'obtenir un delta H de 30cm. Les clapets sont parfaitement restés en place jusqu'à un delta H mesuré à 29 cm. La protection intrinsèque d'ouverture s'est ensuite déclenchée sur lecture de pression et les clapets se sont mis en drapeau et en sécurité.
Cet essais en réel s'est avéré être un franc succès tant sur la tenue des clapets que pour la validation des diverses sécurité actives et passives.

6.2.2 Temps de parcours, intumescence, vitesse d'eau

Phénomène de propagation de l'onde et d'intumescence dans le canal d'Oraison long de 21.5 km.
Les courbes ci-dessous montrent le débit turbiné à l'usine d'Oraison (orange) ainsi que la vitesse instantanée à la prise d'eau de l'escale, c'est à dire à l'entrée du canal d'Oraison (en violet).
Le graphique 13, nous montre qu'en décalant une courbe de 3h, les 2 courbes se superposent. Nous pouvons ainsi valider que le temps de parcours est de 3 heures entre l'entrée du canal et l'usine d'Oraison et qu'il faut ensuite environ 2 heures avant d'obtenir une vitesse nulle à la prise d'eau. Ces informations sont très importantes pour la conduite du nouvel organe d'isolement dans l'exploitation globale des ouvrages du GU d'Oraison.
Nous voyons également quelques passages où la vitesse est négative à la prise d'eau ce qui signifie que l'eau se déplace du canal vers la retenue (phénomène d'intumescence suite à l'arrêt des groupes).



Graphique 2 : Courbes : Débit turbinés usine Oraison / vitesse d'eau entrée canal



Graphique 3 : Courbes avec décalage de 3 heures : Débit turbinés usine Oraison / vitesse d'eau entrée canal

7. MACRO PLANNING DU PROJET

2007: APS
2009: Pré APD (« APS Bis »)
2010: APD + Dossier de Consultation des Entreprises
2011: Signature marché + début des études mécaniques et Génie civil
2012: Chantier GC dans le canal (+Pièces fixes mécanique) + Début de la fabrication des clapets
2013:

- Janvier à février : Fin de fabrication des clapets
- Avril : Livraison des clapets sur site
- Avril à juin: Pré-montage des clapets au sol
- Fin juin : Mobilisation de la grue
- 01 au 15 juin: Grutage des clapets
- Fin juin à septembre: Fin de montage des clapets, raccordement oléohydraulique et C/C
- Septembre: Travaux préparatoires aux essais de manœuvre + Essais préliminaires
- Octobre et novembre : Essais de qualification + formation + Mise en service industrielle

8. CONCLUSION

La construction de l'organe d'isolement du canal d'Oraison a dû être réalisée avec des contraintes environnementales et d'exploitation très importantes. Ces contraintes ont eu des impacts directs sur l'organisation du chantier puisque le délai de réalisation des travaux GC a été diminué d'environ 1/3 pour minimiser le coût d'indisponibilité des usines (File 4 Durance) et l'ensemble des montages mécaniques a dû être effectué intégralement avec un canal en service, pour les mêmes raisons.

L'ensemble des choix techniques mécaniques se sont avérés payants et en parfait accord avec le niveau d'exigence attendu. Les résultats des essais en sont la meilleure preuve, notamment au niveau des taux de fuites et des déformations. Les géométries de la mécanique et du GC se sont parfaitement accordés. Ceci est d'autant plus remarquable que les clapets ont été entièrement montés alors que le canal était en eau et en service. La qualité des études et de la fabrication a également grandement contribué à la réussite de ce projet.

Pour en témoigner, gardons en mémoire que sur les 6000 boulons HV montés des éclissages, quasiment aucun perçage n'a du être retouché pour réaliser les assemblages.

Par ailleurs, la réussite technique de ce projet tient aussi dans sa capacité à répondre au besoin de la MOA d'une ouverture intrinsèque et naturelle de l'organe d'isolement sous un delta H de 30 cm de la retenue vers le canal. La solution technique oléohydraulique mise en œuvre a répondu parfaitement à cette contrainte de sureté des ouvrages et des matériels.

REMERCIEMENT

Merci à H. Roupioz (CIH), L. Bonte (CIH), JL Menjard (GU Oraison), P. Izoard (GU Oraison), N. Schaltenbrand (GEH Durance), J. Corti (Orys), C. Palermo (NGE), S. Renoux (JPSA), R. Glemain (JPSA) pour leur contribution au bon déroulement et à l'atteinte des objectifs de ce projet.

RÉFÉRENCES ET CITATIONS

[1] DIN 19704 : Hydraulic steel structures, Edition 1998 (Calcul des constructions hydrauliques en acier),

[2] DIN 18 800 : Structural stellwork, Edition 1990 (calcul des constructions métalliques,

[3] NF EN 1991-1-3 (Eurocode 1-3) et Annexe Nationale : Actions sur les strucutures – Charge de neige (Calcul des sollicitations de neige),

[4] NF EN 1991-1-4 (Eurocode 1-4) et Annexe Nationale : Action sur les structures – Actions du vent (Calcul des sollicitations de vent),

[5] F.E.M. : Fédération Européenne de la Manutention : Section l : Appareils lourds de levage et de manutention - Règles pour le calcul des appareils de levage,

[6] NF EN 10025 : Produits laminés à chaud en aciers de constuction – Partie 2 : Conditions techniques de livraison pour les aciers de construction non alliés,

[7] NF EN 10088-3 – Aciers inoxydables – Conditions techniques de livraison pour les demi-produits, barres, fils machines, fil tréfilés, profils et produits transformés à froid en acier résistant à la corrosion pour un usage général.

[8] NF EN 1993 – Calcul des structures en acier (combinaison de charges),

[9] RRC-MH : Règle de réalisation et de contrôle des matériels hydrauliques, Edition septembre 1992 [document EDF],

[10] CCTR : Cahier des Charges pour Travaux de Revêtement N°91.C.031.06, Edition novembre 2010 [document EDF],

[11] XMA 09 03 : Commandes oléo-hydrauliques des vannes et vannages – Documents de prescription, Recommandations du 03/2007 [document EDF],

[12] XMA 03 01 : Règles de calculs pour les structures et composants mécaniques des matériels en aciers destinés aux aménagements hydro-électriques, Doctrine du 10/1990 [document EDF],

[13] XMA 01 05 : Spécification concernant l'application du R.R.C.M.H – Règle de mise en oeuve et de classement des soudures, Doctrine du 06/1987 puis du 02/1992 [document EDF],

[14] XMA 03 03 S : Spécifications pour l'emploi des matériaux autolubrifiants, Doctrine du 12/1994 [document EDF],

REMPLACEMENT DES PORTES AVAL DES DEUX SAS DE L'ECLUSE DE KEMBS

Downstream gates replacement on the Kembs navigation lock

Jean-Baptiste DURY, Gaël GRAS
20 rue du Pâturage - 68069 MULHOUSE
jean-baptiste.dury@edf.fr, gael.gras@edf.fr

MOTS CLÉS

Manutention, Interfaces, Etanchéité, Déconstruction, Montage

RÉSUMÉ

L'écluse de Kembs date de 1932. Les tabliers des portes avals des deux sas présentent des niveaux de corrosion avancés qui motivent leur remplacement.
Leurs caractéristiques principales sont les suivantes :
Vannes de type Stoney, tablier en treillis riveté,
Dimensions : 20 x 26 m,
Masse : 600 tonnes et 2 x 250 tonnes de contrepoids,
Manœuvres : environ 20 cycles ouverture-fermeture / jour, 365 jours /an.
Les mécanismes de manœuvre et d'équilibrage ont été remplacés en 1992 et donnent satisfaction. Ils sont conservés.
Les nouvelles portes sont de type wagon. Elles sont équipées d'un système de déplacage pour éviter l'usure des joints pendant les manœuvres. La porte n'est plus posée en fond de sas à chaque manœuvre, mais l'étanchéité de seuil est réalisée par placage sur une poutre liée au génie civil du radier.
Parallèlement au remplacement des portes, une nouvelle poutre pare chocs redimensionnée est mise en place.
Les travaux ont été réalisés sur le sas Ouest entre mars 2013 et août 2014. Les difficultés rencontrées sont essentiellement liées à l'impact des évolutions de conception sur les éléments conservés et le génie civil d'origine (modifications des étanchéités, évolution des descentes de charge sur le génie civil).
Des travaux identiques sont prévus en 2016 pour le sas Est.

ABSTRACT

Kembs navigation lock is the first french lock on the Rhine river.The commissioning was in 1932. Both downstream lock gates are too much corroded to be renewed, and also need to be replaced.
Their main characteristics are:
Stoney gates (riveted steel fabric),
Size: 20 x 26 m,
Mass: around 600 tons for the gate only, and two times 250 tons counterweights
Operating frequency: 20 cycles (opening-closing) a day, 365 days a year
The operation mechanisms have already been replaced in 1992.
The new gates are fixed wheel gates.
The gate isn't put down any more on the concrete base when closing. The lower watertightness is made on a concrete low wall built especially for the works.
A new bumper beam has been set up.
Works on the west-side lock took place from March 2013 to august 2014. The main difficulties were due to impacts of design changings on existing components (watertightness changing, loading changing).
Similar works are planned in 2016 for the east-side lock.

1. CONTEXTE

L'écluse de Kembs est l'ouvrage d'entrée du Grand Canal d'Alsace. Elle a été mise en service en 1932, avec l'usine attenante, et le barrage situé à l'amont. C'est un ouvrage particulièrement sollicité du fait de la navigation importante sur le Rhin (env. 20 cycles de manœuvre par jour et par sas). Les mécanismes de manœuvre des portes aval ont été remplacés en 1992, mais les tabliers des portes sont d'origine.

Les remises en peintures n'étant plus suffisantes pour garantir le maintien en état des portes, leur remplacement a été décidé.

Parallèlement au remplacement des portes aval, de nouvelles poutres pare-chocs ont été conçues afin de mieux protéger ces portes vis-à-vis des bateaux circulant actuellement sur le Rhin.

Le chantier de remplacement des portes a été scindé en deux campagnes :
- remplacement de la porte aval du sas Ouest (2013-2014),
- remplacement de la porte aval du sas Est (prévu en 2016-2017).

2. APERÇU DE L'ANCIENNE CONCEPTION

Les anciennes portes aval étaient constituées :
- d'un tablier en treillis riveté,
- d'un guidage principal constitué de trains de galets avals,
- de 4 galets de contre-guidage (amont) et de 4 galets de guidage latéral,
- de deux contrepoids d'équilibrage (un amont et un aval) constitués d'une poutre métallique placée dans le sens transverse du sas et lestée de béton.

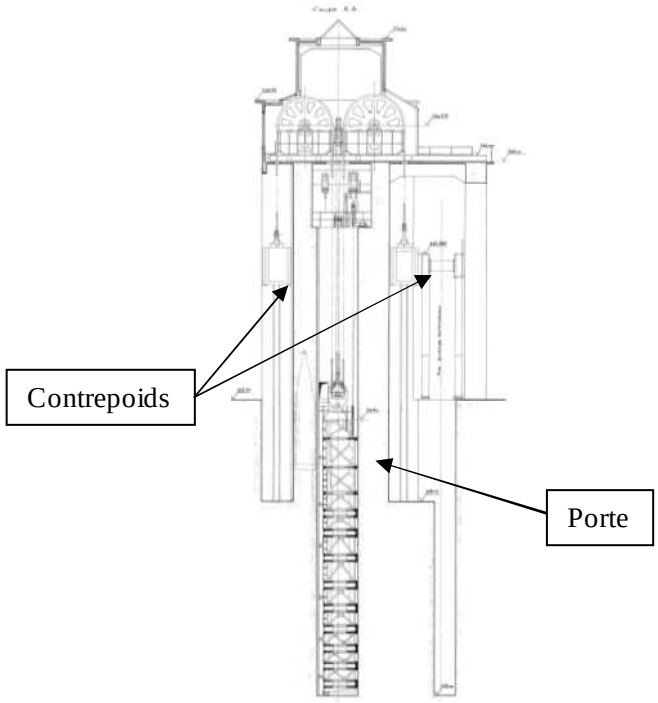


Graphique 1 : Tablier de l'ancienne porte vu depuis l'aval



Graphique 2 : Contrepoids de l'ancienne porte

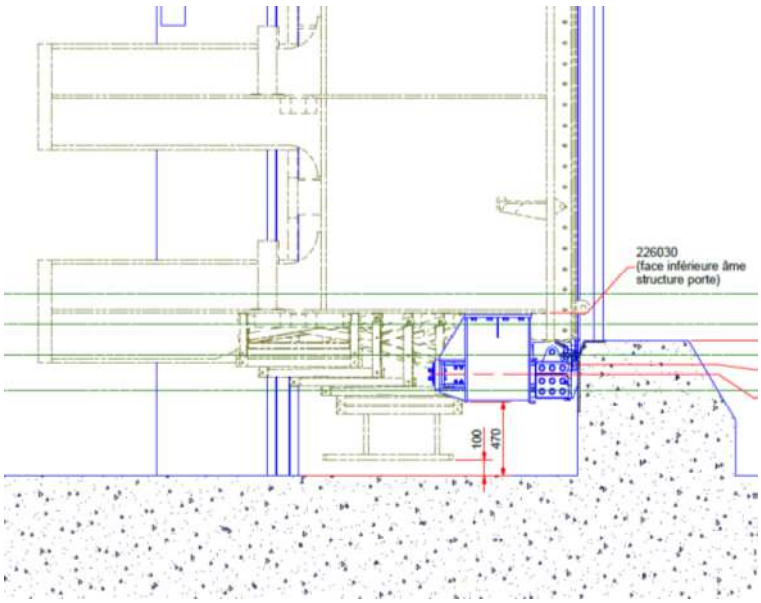
L'ensemble était manœuvré par un système de treuil constitué d'un tambour placé en position centrale au-dessus de la porte autour duquel s'enroulaient 2 paires de câbles (une par rive) de manœuvre liés à la porte par l'intermédiaire d'un palonnier. Porte et contrepoids étaient également liés par l'intermédiaire de câbles passant sur des poulies placées à l'étage du treuil (cf. Graphique 3).



Graphique 3 : Vue en coupe de la porte et des contrepoids amont et aval

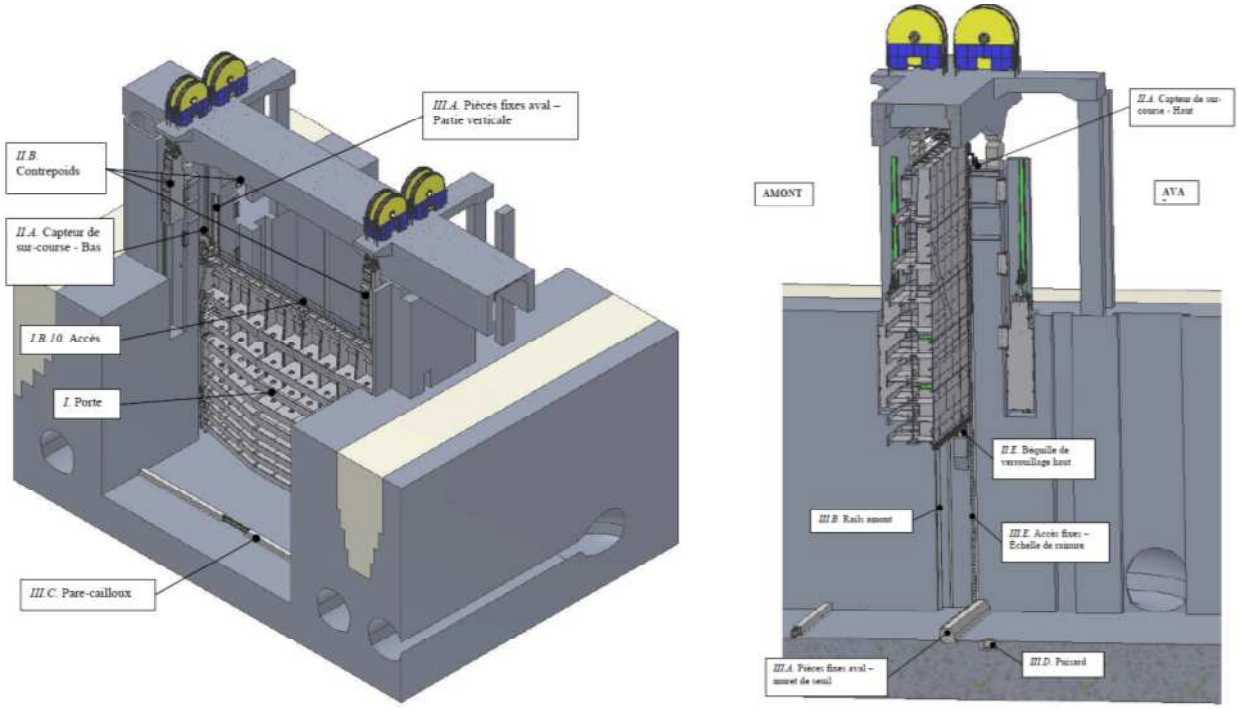
3. NOUVELLE CONCEPTION

Les nouvelles portes avals sont des vannes wagon. L'étanchéité est conçue de façon à ce que la porte ne soit plus posée en fond de sas à chaque manœuvre, afin de limiter la fatigue des mécanismes. L'étanchéité de seuil est réalisée par l'intermédiaire d'une poutre mobile par rapport au tablier de porte, venant en appui (dans le sens amont-aval) sur un muret construit dans ce but en fond de sas (cf. Graphique 4).



Graphique 4 : Vue du bas de la porte et de l'appui de la poutre de seuil sur le muret

Cette conception permet au tablier de porte de se déformer librement sous la pression hydrostatique, sans impacter la qualité de l'étanchéité de seuil.
L'étanchéité latérale est située dans la continuité de l'étanchéité de seuil, dans le même plan (celui du bordé de la porte), et venant en appui sur une lisse située sur chaque rive.



Graphique 5 : Vues de la porte et du muret de seuil

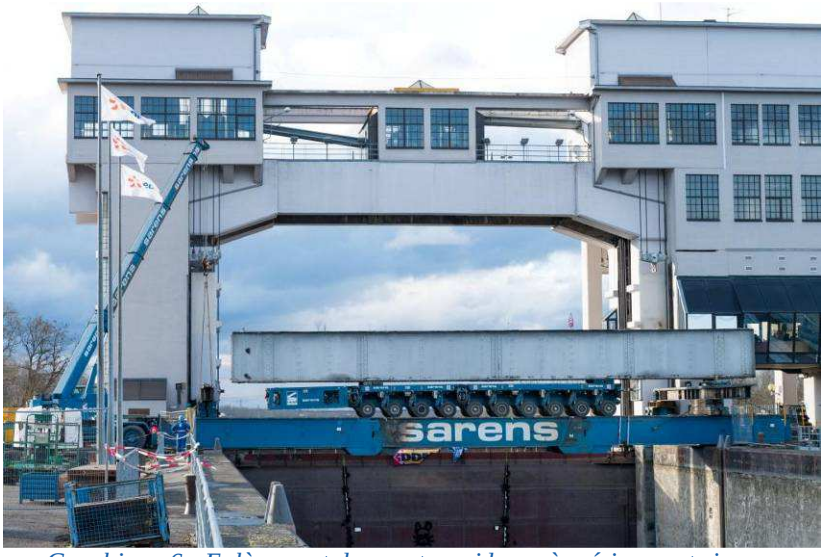
Le tablier est constitué de cinq éléments assemblés entre eux par éclissage des raidisseurs verticaux, et boulonnage des bordés.
Le guidage de la vanne est assuré par 3 types de guidages différents :
- les galets de déplacage aval (4 x 2 galets). Montés sur ressorts, ils permettent de déplaquer les étanchéités de leurs surfaces d'appui lors de manœuvre de la porte,
- les galets amont (4 galets),
- les galets latéraux (4 galets).

La conception des contrepoids a également évoluée. La poutre transverse au sas est remplacée par 4 contrepoids indépendants logés dans les rainures des anciens contrepoids, ce qui permet de limiter les charges directement en suspension au-dessus des bateaux. Ceux-ci sont en acier massif de façon à obtenir une masse suffisante à l'équilibrage de la porte.
Un muret piège à cailloux a été placé en amont de la porte afin de limiter l'accumulation de cailloux et de bois devant le muret de seuil de la porte (cf. Graphique 5).

4. LE CHANTIER DU SAS OUEST

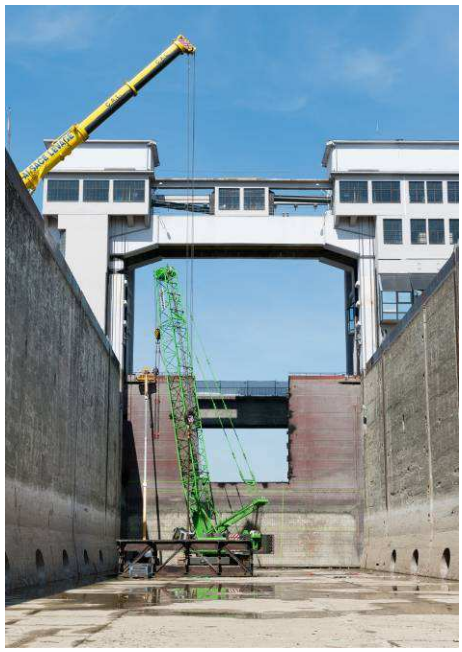
4.1 Déconstruction de l'ancienne porte

La première étape du chantier de remplacement de la porte aval du sas Ouest a été la déconstruction de l'ancienne porte, de ses contrepoids, ainsi que de ses rails de guidage. La dépose des contrepoids a été réalisée par vérinage puis ripage de chaque poutre. Une fois sortie de sa rainure, celle-ci a été déposée sur une remorque de type KAMAG pour l'évacuer de l'emprise du sas. Un pont provisoire constitué de poutres assemblées avait auparavant été monté pour permettre à la remorque d'accéder à la zone (cf. Graphique 6).



Graphique 6 : Enlèvement des contrepoids après vérinage et ripage

Le tablier de porte a ensuite été déconstruit, tout d'abord par découpes successives du tablier en 9 éléments. Pour cela, une grue chenille a été descendue en fond de sas pour reprendre le poids puis déposer ces éléments. Une deuxième grue de 200 tonnes était disposée en bord de sas pour évacuer les éléments après une première découpe en fond de sas (cf. Graphique 7).



Graphique 7 : Découpe de la porte pour dépose

Les éléments de porte découpés ainsi que les poutres métalliques des contrepoids ont ensuite été évacués en décharge pour être retraités.

4.2 Remplacement des pièces fixes amont et aval

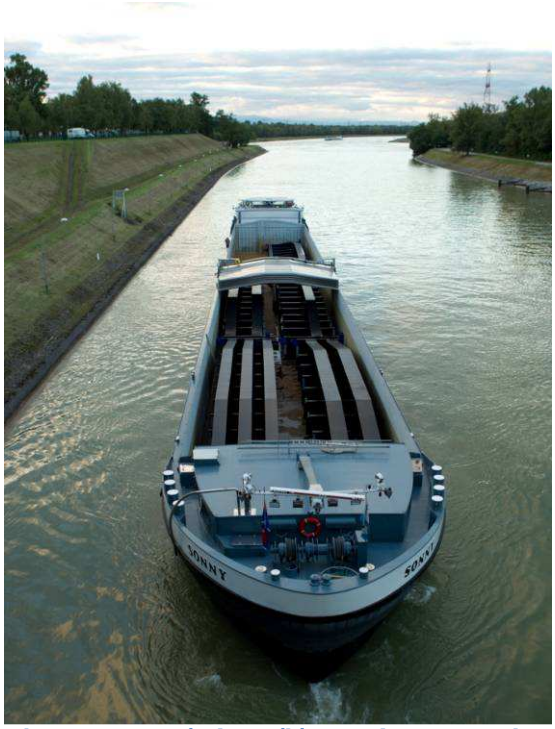
Les rails de guidage amont at aval de la porte ont été remplacés. La première étape a consisté en la dépose des anciens rails. Une partie des tiges d'ancrage existantes ont pu être conservées, mais de nouveaux ancrages ont dû être mis en place pour la majorité. La surface d'accroche du béton de calage a été retravaillée mécaniquement pour permettre un bon positionnement des pièces fixes et une bonne qualité d'accroche.
Les mécanismes de manœuvre étant conservés, ils ont servi de repère pour positionner les pièces fixes de guidage de la porte vis-à-vis de l'axe de levage.



Graphique 8 : Remplacement des rails de guidages amont et aval

4.3 Montage de la nouvelle porte

Une fois les pièces fixes en place, les éléments de porte ont été mis en place sur site. Les 5 éléments constitutifs du tablier de porte ont été fabriqués en Belgique, puis acheminés jusqu'aux écluses de Kembs par bateau (cf. Graphique 9).



Graphique 9 : Arrivée des 5 éléments de porte par bateau

Afin de réaliser le déchargement sans perturber le trafic fluvial, le sas concerné par les travaux a été remis en eau et débatardé spécifiquement pour cette opération.
Le déchargement des éléments a nécessité l'emploi simultané de 2 grues automotrices de capacité 500 tonnes et 700 tonnes (cf. Graphique 10). Une remorque avec plateau sur vérins a également été utilisée pour déplacer les éléments vers une zone de stockage temporaire.



Graphique 10 : Déchargement des éléments de porte avec les grues 500T et 700T

Une fois les éléments déchargés sur site, le sas a été batardé de nouveau, puis mis à sec. La mise en place des éléments de porte ne pouvant se faire que depuis le fond de sas (la superstructure béton située au-dessus de la porte empêche les manutentions au droit de celle-ci), une grue automotrice de 500 tonnes a été descendue en fond de sas par une grue de 700 tonnes (cf. Graphique 11).



Graphique 11 : Descente de la grue 500T en fond de sas

Les éléments de porte ont ensuite été assemblés un par un en débutant par l'élément bas, la liaison inter-éléments étant réalisée par éclissage (cf. Graphique 12).



Graphique 12 : Montage du dernier élément de porte

Une fois le tablier totalement assemblé, les pièces de guidage (galets de déplacage aval, galets amont et galets latéraux), patins d'appuis et pièces d'accès (caillebotis, lignes de vie, échelles) ont été montés.

4.4 Montage du nouveau pare-chocs

La poutre pare-chocs est un système protégeant la porte aval des chocs de bateaux entrant dans le sas dans le sens amont vers l'aval. L'ancienne poutre a été remplacée par un système dimensionné de façon plus conséquente afin d'être mieux adapté au trafic actuel sur le Rhin.



Graphique 13 : Montage de la poutre pare-chocs

4.5 Accroche porte-contrepoids

La porte et les contrepoids ayant été montés chacun en position basse, il a été nécessaire de réaliser une manutention afin d'accrocher les câbles de liaison porte-contrepoids. Le Titulaire a conçu dans ce but un outil visant à tirer pas à pas les contrepoids pour réaliser l'accroche des câbles. Cet outil n'a cependant pas pu être utilisé pour des raisons de conformité d'une part et de difficultés de mise en œuvre d'autre part.

Le Titulaire a fait le choix de vériner le tablier de porte jusqu'en position haute, par vérinages et calages successifs (cf. Graphique 14).



Graphique 14 : Vérinage du tablier de porte

4.6 Essais et première mise en eau

Une fois porte et contrepoids accrochés, des manœuvres ont pu être réalisées de façon à vérifier le bon fonctionnement de la porte d'une part, et les modifications du contrôle-commande des treuils de porte d'autre part. La dernière phase des essais est réalisée en eau, afin de vérifier le fonctionnement des organes en conditions normales d'exploitation, et l'étanchéité de la porte. Dès la première mise en eau du sas, des sorties d'eau ont été constatées sur les bajoyers à l'aval de la porte (cf. Graphique 15). Les essais ont donc été interrompus.

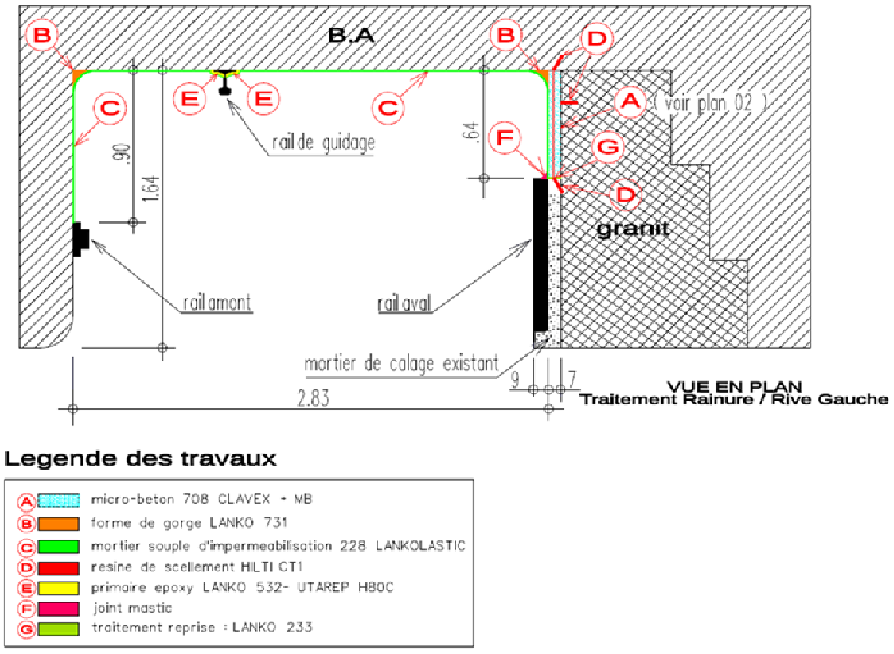


Graphique 15 : Mise en eau et constat de fuites à l'aval de la porte à travers les bajoyers

Une analyse rapide a conclu que l'eau passait principalement par les joints entre les moellons de granit constitutifs des bajoyers à l'aval immédiat de la porte. Sur l'ancienne porte, l'étanchéité était réalisée côté amont de la porte, entre le bordé et le rail de guidage amont, la rainure et les blocs de granit n'étaient donc pas en eau. La solution proposée par le CIH pour remédier au problème a été d'étancher la rainure afin de conserver la conception générale de la porte.

4.7 Travaux complémentaires

Pour cela, un bétonnage de la surface de la rainure constituée de blocs de granit a été réalisé (dans le prolongement du béton de calage des rails aval). L'ensemble de la surface des rainures de porte a ensuite été recouverte d'un mortier souple d'imperméabilisation.



Graphique 16 : Etanchéification des rainures

4.8 Mise en service

Suite à ces travaux, les essais en eau ont repris, l'étanchéité des rainures étant satisfaisante. Une surveillance régulière a été mise en place pour les bajoyers en granit. Le retour en exploitation du sas a été effectif le 11 Août 2014.



Graphique 17 : Mise en service du sas et éclusée du premier bateau

4.9. Macro planning des travaux

	2013												2014											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Démolition ancienne porte et contrepoids			■	■																				
Dépose et repose de nouveaux rails					■	■	■	■																
Montage des contrepoids								■	■															
Montage porte et guidages									■	■	■	■												
Remplacement des câbles													■											
Construction muret de seuil												■	■											
Montage du pare-chocs												■	■	■										
Accroche porte - contrepoids															■									
Premiers essais															■									
Travaux complémentaires de GC																■	■	■						
Essais porte et essais de sas																			■	■				

5. CONCLUSION

Les travaux de remplacement de la porte aval du sas Ouest de Kembs se sont déroulés de mars 2013 à août 2014. Ils ont nécessité la mise en œuvre d'importants moyens de manutention, que ce soit pour la phase de déconstruction de l'ancienne porte, ou pour le montage de la nouvelle. Les difficultés majeures de ce chantier n'ont cependant pas été rencontrées dans le domaine de la manutention, qui avait été suffisamment préparé par les entreprises. Mais plutôt dans les impacts des évolutions de conception sur le fonctionnement de la porte sur un site d'origine, et en particulier aux frontières entre les domaines mécaniques et génie-civil.

REMERCIEMENTS

Nous souhaitons remercier en premier lieu les collègues du service génie-civil, en particulier pour leur implication en cours de chantier dans la gestion des aléas.
Nous remercions également de manière plus générale toutes les personnes qui ont été impliquées dans le suivi de cette affaire, ainsi que dans la réalisation du chantier du sas Ouest.

GUIDE DES BARRAGES GONFLABLES : UN OUTIL POUR LA RENOVATION DES BARRAGES DE NAVIGATION

French guidelines on Inflatable dams: a tool to renew mobile weirs for navigation

Julien AUBONNET
BRL ingénierie 1105 av Mendès France BP 94001 30 001 Nîmes Cedex 5
Téléphone : +33 (0) 466 87 5000, Fax : +33 (0) 466 87 5059
julien.aubonnet@brl.fr

Jean-Pierre SEGUIN
Voies Navigables de France
Subdivision de Gray, Service Navigation Rhône-Saône
Téléphone : +33 (0) 384 65 6948, Fax : +33 (0) 384 65 2509

MOTS CLÉS

Seuil, barrage mobile, barrage manuel, hydroélectricité, membranes, ancrages, volets métalliques

RÉSUMÉ

Guide des barrages gonflables : un outil pour la rénovation des barrages de navigation
Bien que mondialement très répandue, la technologie gonflable est longtemps restée confidentielle en France. Voies navigables de France (VNF) gère un patrimoine de barrages dont une partie est à reconstruire dans les prochaines années.
Parmi les solutions envisageables, la technologie des barrages gonflables s'avère être une solution techniquement et économiquement intéressante, tant en investissement qu'en exploitation et maintenance. Dans ce contexte, le « guide des barrages gonflables avec ou sans volets métalliques » est un outil indispensable pour faire la synthèse de retours d'expérience dans le domaine. Sous Maîtrise d'Ouvrage VNF, le guide publié en 2012 a été rédigé par BRL Ingénierie sous la supervision d'un comité de pilotage associant VNF, ses directions territoriales et le CETMEF. Cet article présente les grandes lignes du guide, délibérément orienté en amont des études de conception, avec quelques détails technologiques indispensables à la maîtrise d'ouvrage. Il permet d'évaluer l'opportunité de la technologie « gonflable » pour un site donné, et de concevoir son utilisation lors de la rénovation d'un barrage de navigation. L'article conclut sur une étude de cas : le barrage d'Auxonne mis en service en 2011 sur la Saône. Ses bouchures mobiles, de 1,40m de hauteur, sont constituées de membranes gonflées à l'air sur lesquelles s'appuient des volets métalliques. Elles équipent un barrage de navigation de 4 passes sur une longueur de 220 mètres de long.

ABSTRACT

French guidelines on Inflatable dams: a tool to renew mobile weirs for navigation
Although globally widespread, inflatable solutions for mobile weirs were kept confidential in France for years. The "French Waterways Company" VNF owns a lot of dams of which have to be rebuilt in the coming years. Among the possible solutions, inflatable dams' technology proves to be a technically and economically attractive solution, both in investment and operation and maintenance. In this context, the "French guidelines for inflatable dams" is a useful tool to start in that field. Commissioned by VNF, the guide published in 2012 was written by BRLingénierie under the supervision of a steering committee involving VNF, its territorial directions, and CETMEF.
This article outlines the main chapters of the guide, which is deliberately oriented upstream design studies, with some technological details. It assesses the appropriateness of the inflatable technology to a given site. The article concludes with a case study: the Auxonne Dam commissioned in 2011 on the Saone river. It consists of air inflated bladders which raise steel panels. It is a 1.40m height and 4 spans navigation dam, for a total length of 220 meters.

L'objet de cet article est de présenter quelques notions essentielles de la technologie gonflables. Celles-ci sont décrites de façon plus exhaustive dans le « guide des barrages gonflables avec ou sans volets métalliques », publié par Voies Navigables de France en 2012 [1] auquel le lecteur pourra se référer.

1. BREF HISTORIQUE DU BARRAGE GONFLABLE

1.1 Une conception d'origine ancienne

Le principe d'un barrage constitué d'une membrane souple est inventé puis breveté par M.Mesnager, ingénieur français, dès 1947 [1]. La conception du barrage se caractérise par une paroi souple attachée par ses deux extrémités et gonflée à l'eau ou à l'air.

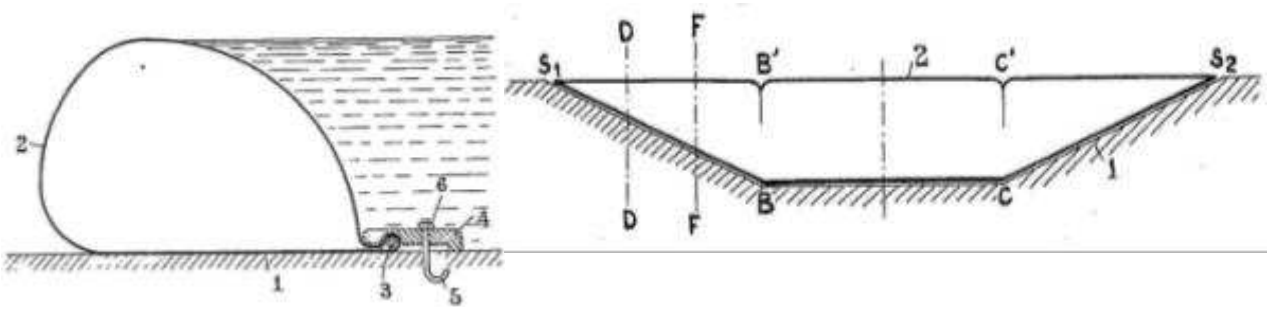


Figure 1 : extrait de brevet figurant le principe de barrage gonflable dans les années soixante [source INPI]

1.2 Un développement au fil des décennies variable selon les pays

En 1956, aux Etats-Unis, M. Imbertson fait breveter le « Fabridam », avec le concours de la société Firestone. Le premier barrage gonflable voit ainsi le jour en 1959 pour l'alimentation en eau de la ville de Los Angeles. Le gonflage se fait alors uniquement à l'eau [1]. Entre 1959 et 1978, 39 sites aux Etats-Unis sont équipés de ce type d'ouvrages.

En Europe, de nombreux projets voient le jour à la fin des années soixante. En France, dix barrages gonflables sont installés entre 1960 et 1970, dont certains sont toujours en fonctionnement. Après 1970, les nouvelles réalisations sont quasiment inexistantes. Le Service Technique Central des Ports Maritimes et des Voies Navigables s'intéresse à nouveau à ce type de projets à partir de 1979. Un prototype est installé sur le barrage de Villers devant Mouzon sur la Meuse en 1985 [1]. Le barrage est malheureusement emporté par une crue, ce qui met fin à l'expérimentation.

Cette technologie revêt un fort engouement en Asie. La société Sumitomo Electric installe son premier barrage au Japon en 1964. En 1978, le japonais Bridgestone développe une membrane gonflée à l'air qui intègre un déflecteur et limite les phénomènes de vibrations. Le Japon compte à ce jour près de 4000 sites équipés de barrages gonflables.

En 1988, aux Etats-Unis, M. Obermeyer dépose un nouveau brevet ajoutant un volet métallique à la traditionnelle membrane gonflable [1]. Sa société installe un premier barrage de ce type la même année dans le New Hampshire.

Ce type de bouchure est expérimenté sur les voies navigables françaises, toujours sur la Meuse, en 2005. Cette expérience concluante menée pendant plus de deux ans est suivie par la réalisation de deux autres ouvrages de ce type : le barrage d'Auxonne mis en service en 2011, d'une longueur de 220 mètres répartie sur quatre passes, et le barrage de Gray, d'une longueur de 20 mètres répartie sur deux passes.

Quelques années plus tard, Voies Navigables de France engage en France un projet de partenariat public privé, pour la construction et l'exploitation de 29 barrages sur les rivières Aisne et Meuse en laissant la possibilité aux candidats de proposer des solutions innovantes.

2. UNE ALTERNATIVE AUX BOUCHURES USUELLES

2.1 Un vaste champ d'application

Bien que cette technologie soit restée confidentielle pendant près d'un demi siècle en France, les bouchures gonflables ont trouvé dans le monde de multiples domaines d'application, tels que l'hydroélectricité, le stockage d'eau en facilitant la rehausse d'ouvrages existants, l'irrigation, la protection contre les inondations, la régulation de cours d'eau,…



Figure 2 : exemple de barrage à usage d'irrigation de Kamo, Japon [crédit image ©J.Aubonnet]

Ces installations, pour certaines en service depuis plus de 40 ans, ont permis de fiabiliser la conception et constituent aujourd'hui une véritable alternative aux bouchures usuelles, en particulier pour des hauteurs inférieures à trois mètres environ et de forts élancements.

2.2 Eléments de comparaison avec d'autres bouchures

Le principal avantage des barrages gonflables par rapport au traditionnel clapet réside en des coûts d'installation réduits. Cet intérêt est d'autant plus vrai que les longueurs déversantes à équiper sont longues. L'infrastructure est simple ; piles de faible hauteur, charges réparties sur le radier. Les équipements sont rustiques et permettent de limiter les coûts d'exploitation- maintenance : aucun organe de manœuvre sur pile, matériel standard regroupé dans le local technique.

La capacité d'effacement en cas de crue est améliorée par la faible rigidité de la bouchure. Toutefois, la grande déformabilité de la membrane implique des contreparties : le système est plus sensible aux vibrations, et la régulation peut s'avérer moins précise, surtout dans le cas d'un gonflage à l'air et en l'absence de volets métalliques.

2.3 Un savoir faire porté par les fournisseurs

En comparaison des bouchures métalliques usuellement installées dans les soixante dernières années, pour l'essentiel actionnées à l'aide de vérins hydrauliques ou de treuils à chaîne, la technologie des barrages gonflables concerne un nombre d'ouvrages moins important. Le régime normatif est quasiment inexistant. Le savoir faire est limité, et reste essentiellement porté par quelques fournisseurs dans le monde.

Avant de concrétiser un projet, ce constat implique pour un Maître d'Ouvrage comme pour un Maître d'œuvre de comprendre les principaux enjeux de cette technologie.

3. QUELQUES ELEMENTS TECHNOLOGIQUES

Afin d'améliorer la sûreté de ce type d'ouvrages, il est important de disposer d'un maximum d'éléments pour établir un cahier des charges puis comparer des propositions techniques et financières qui seraient présentées par les entreprises. C'est un des aspects développé par le guide des barrages gonflables.

3.1 Le type de bouchure

Il s'agit dans un premier temps de déterminer si la technologie gonflable est compatible avec le site à équiper.
Le guide propose un recensement des dimensions de bouchures les plus fréquemment installées, ce qui permet de dessiner les contours de la géométrie la plus propice à ce type de bouchures.

La bouchure gonflable peut présenter un intérêt lorsque le barrage à équiper présente un fort élancement (rapport longueur sur hauteur important). Les bouchures dont la hauteur n'excède pas trois mètres sont parmi les plus fréquentes.

La première distinction peut porter sur le choix :

- d'une membrane équipée d'un volet métallique, dans ce cas la bouchure est un « clapet » dont l'actionneur est constitué de vessie(s) gonflable(s) ;
- d'une membrane seule, dans ce cas la bouchure se confond avec son actionneur, elle est uniquement constituée de l'élément gonflable.

Les coupes ci-dessous illustrent pour une même hauteur de retenue la différence de périmètre de membrane selon la technologie envisagée.

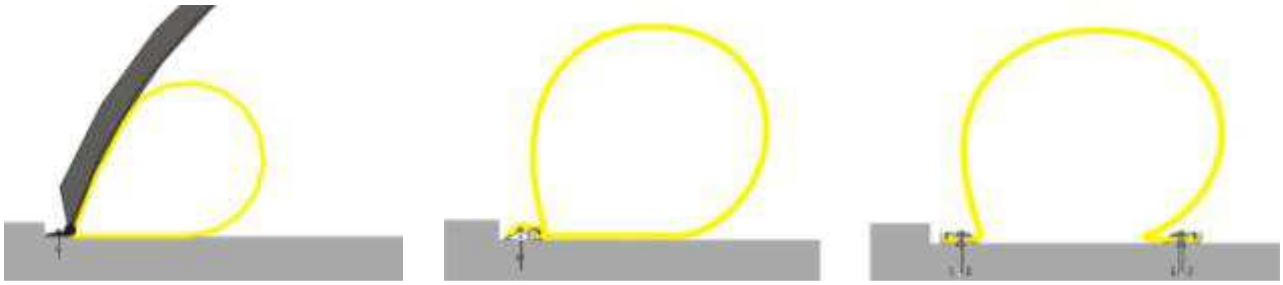


Figure 3 : coupes types des différentes technologies de bouchures [crédit image ©BRLingénierie]

De gauche à droite : une bouchure gonflable à volet métallique qui implique une membrane plus petite mais qui doit reprendre les efforts apportés par le clapet ; une bouchure gonflable à l'air qui nécessite une étanchéité parfaite au radier ; une bouchure gonflable à l'eau qui peut s'affranchir d'une membrane sur le radier mais implique un périmètre entre ancrage plus important du fait du fluide de remplissage.

3.2 Les limites de fonctionnement

Le choix entre barrage gonflable seul et barrage équipé de volets métalliques doit être établi en fonction des contraintes propres à chaque site. Un élément important est que ce dernier est constitué d'éléments modulaires de six mètres environ, tandis qu'une membrane seule couvre la longueur totale de chaque passe.
Les barrages gonflables sont des structures souples. Les plages de fonctionnement du barrage peuvent avoir une incidence sur le choix de fluide de gonflage : la membrane peut vibrer et progressivement être endommagée par ses battements contre les parties fixes du barrage constituées de béton.
L'utilisation de l'air implique des vibrations pour certains cas de charge [2] : il est recommandé que la bouchure soit affalée dès lors que la surverse est supérieure à 20% de la hauteur du barrage. Le gonflage à l'eau, bien que moins sensible, n'est pas exempt de vibrations. Dans tous les cas, il est recommandé de positionner des déflecteurs sur la crête de bouchure [3 et 4].
Certains retours d'expérience conduisent à renforcer la sûreté de ces ouvrages. Le nombre d'incidents recensés et liés à la membrane reste très faible. En 2010, la rupture d'une bouchure gonflée à l'air de type Bridgestone à Tempe (Etats-Unis) conduit à une expertise de la membrane [5]. Il s'agit d'une membrane particulière, dont le joint principal est transverse au cours d'eau. Le fournisseur japonais ne propose plus ce type de bouchure pour des hauteurs supérieures à 1,20 mètres.

3.3 La caractérisation de la membrane

En fonction du type de bouchure envisagé, il convient de caractériser la membrane, et notamment la tension qui s'exerce en son sein. Cela permet de fixer des exigences pour celle-ci, mais également de définir les efforts appliqués aux ancrages.
Le dimensionnement d'un barrage équipé d'un volet métallique repose sur un bilan des forces et des moments appliqués au volet métallique en considérant la poussée hydrostatique amont, le poids propre du volet métallique et la pression exercée par le coussin sur le volet [1]. Pour le barrage gonflable, différentes méthodes de calcul existent dans la littérature. Un système d'équation permet de déterminer la tension dans la membrane [6].
A charge d'eau amont égale, la pression de gonflage d'une membrane supportant un volet métallique est un peu plus de deux fois plus élevée que la pression nécessaire au maintien d'une membrane seule. De ce fait, la tension dans la membrane est généralement moins importante pour ce dernier type de structures.
La membrane est constituée d'un assemblage entre une ou plusieurs couches de polymère et de matériaux de type élastomère. La fibre est généralement constituée d'un maillage en polyamide ou polyester. Chaque couche de textile est nommée « pli ». Ces fibres assurent principalement la résistance à la traction. Les couches d'élastomère assurent l'étanchéité d'ensemble et d'autres fonctions [1] :

- La couche extérieure assure principalement la protection des couches de textile contre l'abrasion, les UV et l'ozone ;
- La ou les couche(s) intermédiaire(s) permettent d'assurer l'adhésion entre les différents plis de textile ;
- La couche intérieure permet la protection vis-à-vis du fluide de remplissage.



Figure 4 : membrane deux plis polyamide et EPDM [crédit image © J.Aubonnet]

La caractérisation de la membrane peut s'appuyer sur les recommandations existantes. A ce jour, celles-ci proviennent de deux sources, les valeurs émises dans les standards japonais et les valeurs émises dans les publications du BAW, institut de recherche du ministère allemand en charge des transports [7].

Les caractéristiques générales à contrôler sont la résistance à la traction - le facteur de sécurité observé pour les ouvrages courants est de 8 - l'allongement sous charge et la résistance aux déchirures. Les élastomères doivent également faire l'objet de tests après vieillissement et de tests d'adhésion.

Fournisseur		A			B	C	D	E
Epaisseur de membrane (mm)		9	12	15	14	8	6	12
Nombre de nappes de polymère		3			2	2	1	2
Résistance moyenne à la rupture (kN/m)	Longitudinale	593	338	433	422	540	225	550
	Transversale	173	320	366	340	196	114	364
Allongement moyen à la rupture (%)	Longitudinale	16	38	26	35	26	31	18
	Transversale	40	32	32	81	52	31	26

Tableau 1: essais sur membranes de différents fournisseurs réalisés par le BAW en Allemagne [1]

Il convient de rappeler que, s'agissant d'un matériau composite, les performances à atteindre constituent un tout. La mise en exergue d'un critère particulier peut nuire à un autre : la recherche d'une résistance à la traction par l'ajout de nappes de textiles, par exemple, augmente l'épaisseur de la membrane au détriment de sa flexibilité.

3.4 Evaluation du risque de vandalisme sur les membranes

Des essais de perforation au couteau et de tir avec différentes armes à feu sur des membranes ont été réalisés pour le compte des Voies Navigables Allemandes en utilisant différents types d'armes à feu.

Arme utilisée	Cartouche	Calibre		Distance de tir
 Fusil olympique		.22 lr	balles 22 lr	10 m
 Arme de point		9 mm x 19	balles à tête ronde	5 m
 Winchester		7.62mm x 51	balles à tête ogivale	10 m
 Fusil air comprimé		4.5 mm	balles air comprimé	10 m

Figure 5 : exemples d'armes à feu utilisées pour tester les baudruches équipant des barrages gonflables [7]

Les échantillons de baudruche auscultés au stéréo-microscope pour définir l'impact du tir sur la baudruche montrent que le comportement élastique du matériau et son renforcement par une maille en polymère lui confèrent d'excellentes caractéristiques mécaniques. L'impact de la balle laisse une ouverture résiduelle très faible, d'un diamètre de 65 à 75% inférieur à celui du calibre utilisé.

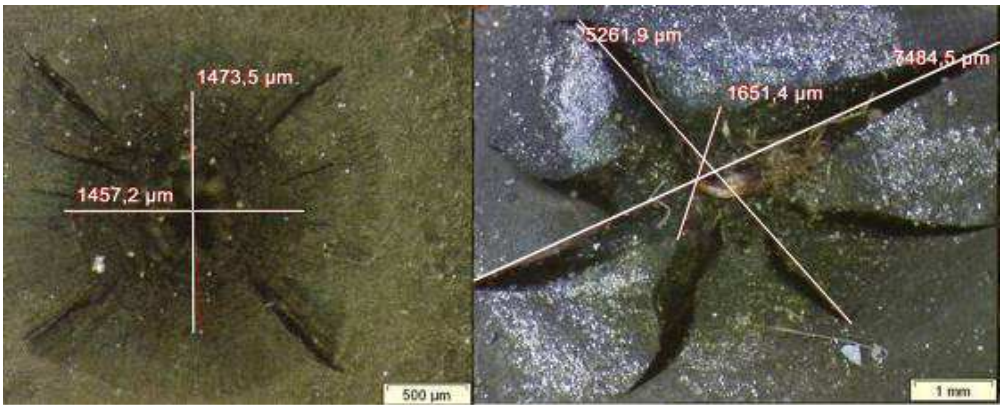


Figure 6 : Mesure de l'impact de Winchester calibre .308 sur une membrane face extérieure/face intérieure [7]

Afin de juger du comportement d'une bouchure gonflable qui ferait l'objet de vandalisme, deux tests ont enfin été menés : l'un pour vérifier le comportement mécanique du matériau (résistance à la traction) et l'autre pour vérifier sa perméabilité. Les essais d'élongation jusqu'à la rupture montrent que les impacts de balles sur une baudruche ont un effet négligeable sur sa résistance à la traction.

La perméabilité est quand à elle très faible : pour une membrane remplie d'eau, le débit de fuite est compris entre 0,01 l/h et 1,3 l/h suivant l'arme utilisée. Ceci équivaudrait, pour vidanger une bouchure de L 25m x h 2m de 128 000 litres de contenance du seul fait de la fuite, à patienter plus de 10 ans. Ce délai est plus court pour un remplissage à l'air, mais la fuite générée peut être compensée par le système de gonflage en attendant la réparation.

La plupart du temps, les réparations s'effectuent sans démontage de la bouchure. La réparation consiste à mettre en place une pièce de caoutchouc armé qui est vulcanisée à froid. Dans le cas du barrage gonflé à

l'eau, la réparation nécessite la mise en place d'un obturateur provisoire pour permettre le travail au sec. En fonction des dommages recensés, la membrane peut également être envoyée en atelier, ce qui reste un cas exceptionnel sur le parc d'ouvrages installés [1].

3.5 Le choix des ancrages

La membrane est ancrée au génie civil par un ensemble de pièces métalliques. L'ancrage est généralement constitué de deux rails, l'un étant fixé au radier, l'autre permettant de pincer la membrane. La géométrie des pièces métalliques peut varier en fonction de la hauteur du barrage et des efforts à reprendre.

Les rails d'ancrages possèdent deux fonctions principales :

- Le transfert des charges de traction de la bouchure au béton armé ;
- La génération de la force de serrage entre les rails dans lesquelles la membrane est insérée.

Le type d'ancrage peut varier en fonction des fournisseurs, notamment dans le cas de l'adjonction d'un volet métallique. Dans tous les cas, l'ancrage est un élément essentiel pour le dimensionnement du système bouchure : ses caractéristiques doivent être éprouvées (retour d'expérience, essais en laboratoire).

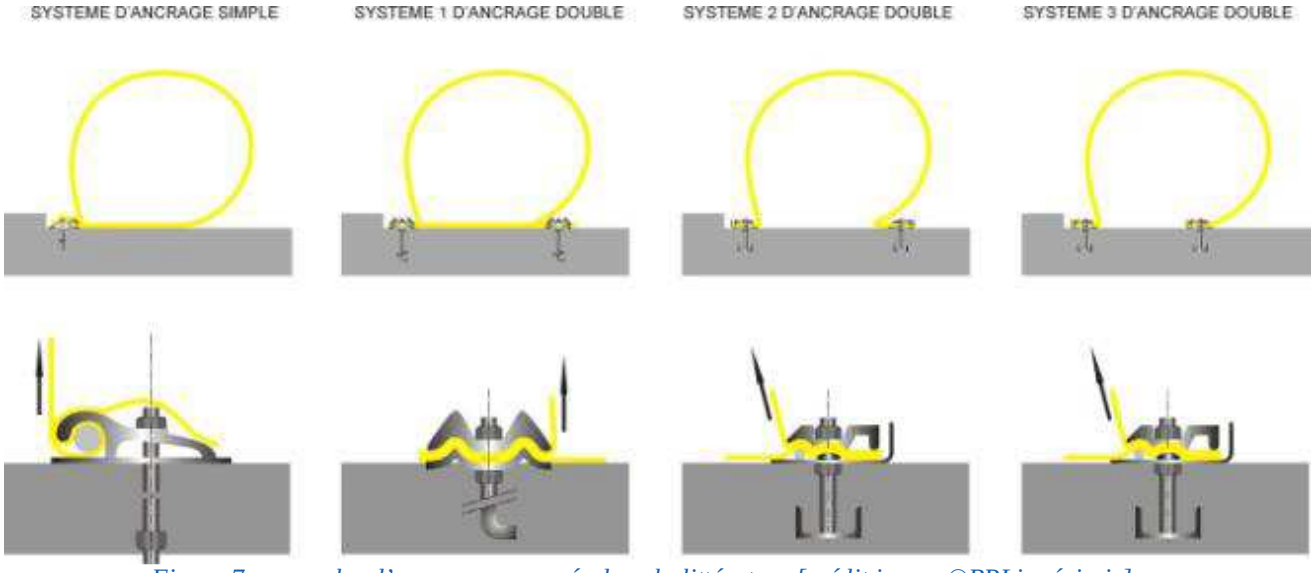


Figure 7 : exemples d'ancrages recensés dans la littérature [crédit image ©BRLingénierie]

Les ancrages sont dimensionnés selon les efforts de traction et les contraintes de cisaillement. Ces efforts sont principalement induits par la membrane soumise à sa pression interne et aux poussées hydrostatiques.

3.6 Le local de commande et le système de manœuvre

Le système de manœuvre d'un barrage gonflable est assez rustique et permet une faible consommation d'énergie. Le système diffère selon le fluide de remplissage, air ou eau, et les caractéristiques de l'ouvrage.

Le matériel de commande est rapporté dans un local technique implanté sur une rive du barrage. La membrane est reliée à ce local technique par des canalisations qui courent dans le radier du barrage, et dont le diamètre dépend essentiellement des exigences fixées par les temps de manœuvre. Les barrages gonflés à l'eau nécessitent un délai de gonflage et dégonflage nettement supérieur aux barrages gonflés à l'air.

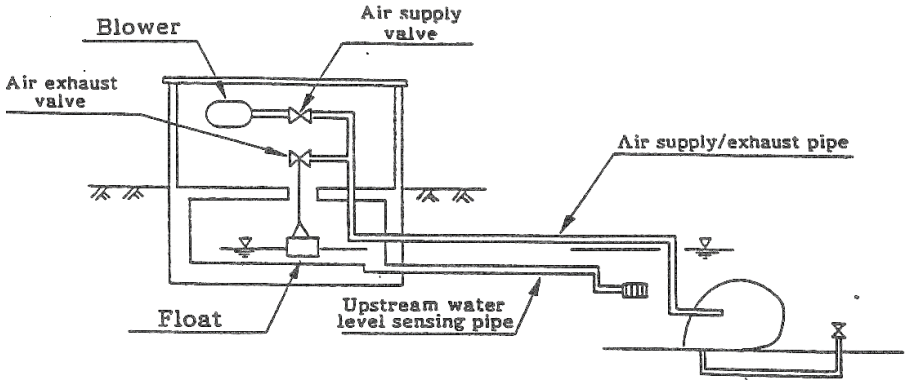


Figure 8 : schéma des différents organes constituant le système de manœuvre [8]

Outre le matériel habituel de secours de puissance (groupe électrogène, ensemble chargeur batteries) et de contrôle commande (armoires automates, interface homme-machine, sondes) les composants nécessaires au fonctionnement d'un barrage gonflable sont usuels.



Figure 9 : exemple de local technique barrage gonflable de Toyama [crédit image © J.Aubonnet]

L'utilisation de produits courants du commerce renforce la fiabilité du système, d'autant qu'un vannage approprié des canalisations peut permettre la mise en place de secours par bypass. Certains organes peuvent être redondés pour améliorer la sûreté de l'ouvrage.



Figure 10 : exemple de local technique, barrage gonflable de Lechbruck [crédit image ©J.Aubonnet]

Il est à noter que le barrage gonflé à l'eau fonctionne à l'aide de cheminées d'équilibre. Ceci implique un local technique de plus grandes dimensions, fondé plus profondément, à implanter autant que possible à proximité immédiate des bouchures.

Le fait de rapporter tout le matériel de commande sur une rive permet de s'affranchir d'actionneurs sur piles. Dans certains cas, et même si un accès aux piles doit toujours être possible, cela permet d'éviter l'installation d'une passerelle d'exploitation à demeure.

4. LE BARRAGE D'AUXONNE

4.1 Présentation

Le barrage d'Auxonne, situé sur la commune du même nom au Sud Est de Dijon, est un barrage de régulation sur la Saône. Le barrage initial, construit en 1840-1841 sur la « Petite Saône », était implanté en biais (environ 45°) par rapport à l'axe de la Saône.

D'une longueur de 220m, il était constitué de 4 passes de 52,50m chacune, supportant au total 1040 aiguilles de bois. Cet ouvrage a été implanté au droit d'un ancien déversoir en maçonnerie, aménagé afin de recevoir le système de bouchures manuelles. Une centrale hydroélectrique a été aménagée sur site au XXe siècle.



Figure 11 : barrage manuel d'Auxonne avant travaux [crédit image ©Voies Navigables de France]

En position verticale, les aiguilles, s'appuient sur un heurtoir en bas du radier et sur des barres de liaison en partie haute de fermettes (supports amovibles) métalliques. Les fermettes sont surmontées par un platelage en aluminium jouant le rôle de passerelle pour les manœuvres des aiguilles et l'entretien du barrage. La mise en place ou le retrait des aiguilles par le barragiste et son équipe permet la régulation du plan d'eau amont pour la navigation.

Les bouchures manuelles de ce barrage ont été remplacées en 2011 par un barrage automatisé, dont les volets métalliques sont actionnés par des baudruches gonflables. La conception et le suivi des travaux ont été réalisés par le groupement BRLingénierie/ISM/Grontmij.

Les travaux ont été confiés sous Maîtrise d'Ouvrage VNF au groupement CBRTP / TOURNAUD. La fourniture des bouchures gonflables, ancrages et équipements a été assurée par DYRHOFF représentant Europe de la société Obermeyer Hydro.

4.2 Caractéristiques générales

Les niveaux hydrauliques caractéristiques retenus pour la réalisation du nouveau barrage sont les suivants :

Barrage d'Auxonne	Cote en mNGF
Niveau amont normal (RN) ou nominal	180,85
Niveau d'exploitation de la micro centrale	180,85
Plus Hautes Eaux Connues (1965)	183,95
Plus Hautes Eaux Navigables	182,06
Débit d'effacement ~	400 m3/s

Tableau 2 : niveaux d'exploitation du nouveau barrage d'Auxonne [Dossier Projet – BRLingénierie/ISM 2009]

Les bouchures effacées sont arasées sous la cote 179,90 m NGF. Levées, elles atteignent la cote 181,30 m NGF.

Les débits caractéristiques et niveaux associés sont les suivants :

	débit (m3/s)	niveau amont	niveau aval	chute (m)
étiage sévère (T10 ans)	15	181,30	179,00	2,30
étiage courant	50	181,30	179,20	2,10
module annuel	126	181,30	179,57	1,73
crue juste débordante	550	182,00	181,75	0,25
crue T 2 ans	670	182,45	182,30	0,15
crue T 5 ans	900	183,38	183,30	0,08
crue T 10 ans	1060	184,00	183,95	0,05
crue T 50 ans	1380	184,08	184,08	0,00

Tableau 3 : débits caractéristiques au droit du barrage d'Auxonne [Dossier Projet – BRLingénierie/ISM 2009]

4.3 Génie civil

Le nouveau barrage, équipé de 4 passes d'une longueur totale de 220 mètres, est construit sur les fondations de celui existant. Ces dernières ont été consolidées à l'aide d'ancrages et injection de coulis. Les piles, culées, et parties maçonnées de l'ancien ouvrage ont été restaurées. Le radier du nouveau barrage est composé :

- D'un gros béton de première phase définie par la ligne de déconstruction des maçonneries, comprise entre 50 et 80 cm.
- D'une dalle d'assise du système de clapets (Coursier), d'une épaisseur constante de 30 cm et une longueur développée totale de 3,90 m répartie en une section horizontale de 1,75 m et une section de 2,15 m inclinée selon une pente de l'ordre de 3/1.

Ce radier a trois fonctions principales :

- Il sert d'assise aux coussins du système de clapets type Obermeyer,
- Il constitue une protection mécanique pour les conduites d'air comprimé,
- Il remplace les moellons retirés dans la fonction de coursier aval du barrage.

Afin de reprendre les efforts de poussée sur les clapets, des ancrages ont été réalisés tous les 6 m sur une profondeur de 5 m à travers les maçonneries de moellons et d'enrochements existants jusqu'aux alluvions du lit.

- Des réservations sont réalisées dans le coursier du barrage pour :
  - La connexion d'air au droit de chaque baudruche,
  - Le raccordement entre vannes et clapets anti-retour,
  - La fixation de la cale de chômage ou de la sangle de retenue,
  - Le raccordement des inclinomètres.

- Pour respecter l'espacement des boulons d'ancrage de fixation des panneaux métalliques, des profilés munis desdits boulons sont positionnés lors du ferraillage du coursier. Avant le bétonnage un géomètre contrôle l'alignement des boulons d'ancrage ainsi que leurs altimétries. Le fournisseur des bouchures valide l'alignement lors de la pose des panneaux métalliques.

4.4 Equipements

Le barrage est équipé de 35 clapets d'épaisseur 16 mm, de largeur 6 m environ et de baudruches comme suit :

- 9 pour une passe de 52,50 m
- 8 pour la passe de 46,50 m

Chaque passe est alimentée en air par une conduite d'arrivée et une conduite de départ raccordées aux armoires pneumatiques situées dans local de commande. Au total, 8 conduites d'air cheminent dans le radier du barrage en partie aval. Des conduites de purge sont fixées au droit de chaque pile.

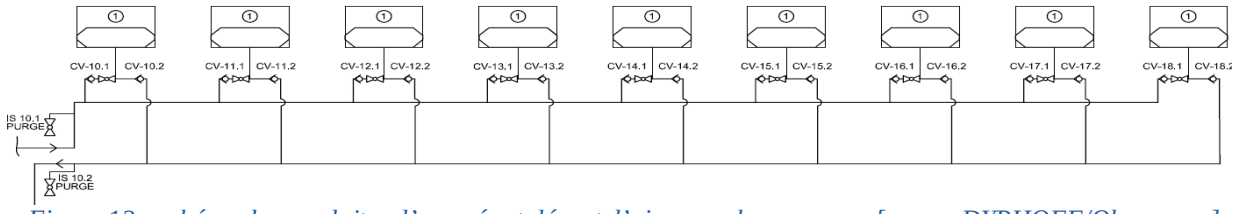


Figure 12 : schéma des conduites d'amenée et départ d'air pour chaque passe [source DYRHOFF/Obermeyer]

Les conduites d'alimentation sont en inox 316L de diamètre 51/54mm soudées. Par sécurité, chaque conduite d'alimentation est équipée au droit de chaque module de clapets anti-retour. Les essais de réception ont consisté en des essais pression portés à 7 bars durant 15 minutes.

Les équipements installés dans le local de commande permettant de gonfler les baudruches pour le fonctionnement du barrage sont : un groupe électrogène, 2 compresseurs d'air identiques, ainsi que 2 ballons de 3000 litres installés en extérieur.

Pour répondre au cas accidentel correspondant à la crevaison d'une baudruche, DYRHOFF a proposé la mise en place d'un profilé métallique 150 x 150 x 10 soudé sur toute la longueur des clapets.
Il permet de répondre aux exigences du cahier des charges pour maintenir en position des clapets latéraux en cas de crevaison de l'élément gonflable correspondant.



Figure 13 : stock de volets métalliques équipés de poutres de renfort [crédit image © J.Aubonnet]

Cette solution a imposé de réaliser une réservation supplémentaire dans le radier et à déplacer les boites accueillant le système de vannage des boudins et les points d'accroche des sangles de maintien.

Un câble de liaison entre les panneaux des clapets métalliques a été réalisé afin de permettre le maintien en position d'un panneau supporté par ses voisins lorsque la bouchure du panneau concerné est dégonflée. Ce câble est fusible en cas de dépassement des efforts admissibles.
Chaque clapet est équipé d'un brise lame conçu en PEHD et muni d'une contre plaque en inox au niveau de sa fixation.

4.5 Principaux modes de fonctionnement

Les quatre passes sont indépendantes en termes de manœuvrabilité, on distingue 2 modes de fonctionnement différents pour chaque clapet : le mode manuel et le mode automatique. Compte tenu du régime hydraulique du cours d'eau, le temps de manœuvre total des clapets a été fixé à une heure.
Le barrage peut fonctionner en mode manuel : utilisation de boutons poussoirs « montée » ou « descente » pour atteindre la position choisie.
En mode automatique, c'est l'automate qui gère les mouvements des clapets, en fonction du niveau d'eau amont et de la consigne, ainsi que les défauts présents sur l'installation.

- Doublement de la mesure de niveau amont : la valeur du niveau est récupérée par l'automate via deux sondes. Il est possible de choisir la valeur que l'on souhaite utiliser (moyenne des deux sondes, sonde n°1 ou sonde n°2).
- Calcul de position du clapet : pour réguler le niveau l'automate agit sur la position des différents clapets. Leur position est donnée par des inclinomètres (un gauche et un droit par passe). L'opérateur aura plusieurs choix d'utilisation de ces inclinomètres dans la régulation (moyenne des deux inclinomètres, l'inclinomètre droit ou l'inclinomètre gauche).

Mode secouru : dans le cas d'une coupure de l'alimentation, l'automatisme continue de fonctionner grâce à une alimentation secourue par batterie, en attendant le démarrage du groupe électrogène.
Exemple de modes dégradés :

- Défaut de clapet ou clapet indisponible : un clapet est considéré indisponible si celui-ci est en défaut ou en mode manuel. Lorsque l'automate considère un inclinomètre indisponible, la régulation calcule la valeur de débit passant par ce clapet grâce à la dernière valeur obtenue de l'inclinomètre. Elle retranche ensuite cette valeur à la valeur de débit de consigne et répartit la valeur obtenue sur les autres clapets disponible.
- Compresseur en défaut : les compresseurs ne fonctionnent jamais ensemble. Si un des compresseurs est en défaut le système bascule automatiquement sur l'autre. Si les deux compresseurs sont en défaut deux cuves de 3000 litres permettent de fonctionner en attendant la disparition des défauts et le retour à la normale des compresseurs.

5. RETOUR D'EXPERIENCE DE L'EXPLOITANT

Le barrage est exploité par VNF Direction Territoriale Rhône Saône, Subdivision de Gray depuis plus de 4 ans, avec un bon niveau de satisfaction. Pour déterminer les axes d'amélioration à observer sur ce type d'ouvrage, l'exploitant a toutefois recensé les principales interventions réalisées pendant cette période :

- Quelques semaines après son inauguration, un incident sans conséquence majeure survient sur une passe du barrage. A l'issue des dernières mises au point, une vanne d'alimentation d'une bouchure n'a pas été réouverte. La pression dans la bouchure a lentement diminué, le volet métallique a été maintenu en position par son voisin jusqu'à ce que le câble de jonction cède à la fatigue. La remise en état est réalisée dans le cadre de la garantie du marché. A défaut de disposer de l'inclinomètre fixé sur le volet incriminé, l'exploitant gère l'ouvrage en mode manuel pendant un mois.



Figure 14 : barrage d'Auxonne, incident du 25 juillet 2011 [crédit image ©Voies Navigables de France]

- Après quelques mois, pendant lesquels des interventions courantes sont réalisées (maintenance et réglages compresseurs, paramétrage de l'automatisme, nettoyage électrovannes, dépannage groupe électrogène), un défaut récurrent conduit au remplacement d'un inclinomètre. Cette pièce est une fourniture spécifique Obermeyer, le remplacement est effectué après 5 mois en juillet 2012.
- Au mois de décembre 2012, au cours d'une crue le mode automatique cherche à relever le barrage. Le problème est identifié, le calcul du débit dans l'automate est différent des conditions réelles en rivière : le paramétrage est repris.
- En février 2013, un nouvel incident se produit : un nouveau joint inter-panneaux cède. Après un diagnostic approfondi, il est déterminé que les clapets anti-retour sur le circuit d'air sont à modifier.
- En juin 2013, un bateau de plaisance à la dérive passe sur le barrage qui n'est pas totalement abaissé. Les passagers sont saufs, et après inspection, aucun désordre majeur n'est identifié.
- En septembre 2013, un nouvel inclinomètre est hors service : son boitier de connexion présente un défaut d'étanchéité. Il sera remplacé.
- En novembre 2013, un nouvel incident de navigation se produit : un bateau de plaisance heurte à nouveau le barrage. Après inspection, il est identifié qu'un joint inter panneaux est déchiré : il devra être remplacé.



Figure 15 : barrage d'Auxonne, incident de navigation juillet 2013 [crédit image ©Voies Navigables de France]

- Au premier semestre 2014, des interventions de simplification du mode automatique sont réalisées. Il s'avère que la gestion de la régulation par le calcul des débits est mal maîtrisée.
- En juillet 2014, deux interventions ont lieu sur des joints inter panneaux.
- Au deuxième semestre 2014, des modifications de l'automatisme de régulation sont engagées.

CONCLUSION

Sans recenser d'incident majeur, et malgré les deux accidents de navigation subis, l'exploitant renvoie une image positive de cet ouvrage. Les quatre années d'exploitation qui ont suivi la mise en service du barrage gonflable d'Auxonne montrent notamment que les principaux points faibles du système ne se situent pas sur les éléments gonflables des bouchures à proprement parler, mais sur les matériels annexes auxquels il convient d'apporter le plus grand soin tant lors de la conception que lors de l'exécution des travaux :

- Difficulté à maintenir en position un clapet lors d'une baisse de pression significative d'un élément gonflable voisin, l'expérience montre que le joint inter panneaux proposé au catalogue fournisseur ne répond pas à cet objectif et nécessite un renforcement pour cet usage spécifique,
- Défaillance des inclinomètres ou de leur connectique, avec un délai de remplacement trop long. L'absence de pièces détachées en stock peut être préjudiciable à l'exploitation,
- Sensibilité de l'étanchéité des conduites d'alimentation et de la fiabilité des vannes en rivière, peu accessibles en maintenance courante,

Enfin, la recherche d'une régulation par les débits initialement souhaitée par le Maître d'Ouvrage s'est avérée difficile à mettre en œuvre, principalement du fait des défauts dans le calcul de position des bouchures et d'un paramétrage qui devrait, dès la mise en service, se baser sur le retour d'expérience.

Les barrages gonflables s'avèrent être une réelle alternative aux bouchures traditionnelles. Le guide des barrages gonflables constitue un très bon outil pour juger de leur pertinence et comprendre les principaux enjeux liés à cette technologie.

Voies Navigables de France concrétise cet intérêt en engageant en 2015 la construction de 29 ouvrages de ce type sur les voies d'eau de l'Aisne et de la Meuse. Ce projet, pour lequel BRLingénierie est mandataire du groupement conception, est réalisé dans le cadre d'un contrat de partenariat public privé confié au groupe Vinci-SHEMA. Les premières mises en services sont prévues dès 2017, pour une livraison de l'ensemble des barrages mobiles à l'horizon 2020.

RÉFÉRENCES ET CITATIONS

[1] VNF-BRLingénierie (2012) Guide technique Barrages gonflables avec ou sans volets métalliques

[2] Al-Brahim (1994) Free vibration of membrane dams

[3] H.Chanson (1998) Hydraulics of Rubber Dam Overflow

[4] M.Gebhardt, B. Kemnitz (2007) Hydraulische Bemessung von Schlauchwehren, BAW n°91

[5] Tempe town Lake (2010) Location of bladder sections examined by SEA Ltd.

[6] M.Gebhardt (2006) 31st PIANC Congress, Principles of structural design of the inflatable dams

[7] M.Maisner (2007) Werksstoffe für Schlauchmembrane, BAW N°91

[8] Japanese Institute ID (1989) Engineering manual for irrigation and drainage

Thème D

Rénovations et remplacement des contrôle-commandes, système de télécommunications et installations électriques des barrages



Vanne du barrage de Pizançon
© EDF – Philippe GROLLIER

MODERNISATION DU CONTROLE COMMANDE DU BARRAGE DE VILLEREST (LOIRE)

Distributed control system modernization of the Villerest dam

Anthony LYSIMAQUE
BRL Exploitation
1105, avenue Pierre Mendès France, BP 94001, 30001 Nîmes cedex 5
anthony.lysimaque@brl.fr

Mamy TOMBOZAFY
Etablissement public Loire
2, quai du Fort Alleaume, CS 55708, 45057 Orléans Cedex
mamy.tombozafy@eptb-loire.fr

MOTS CLÉS

Calculateur, supervision, algorithme, architecture réseau, débit entrant

RÉSUMÉ

Modernisation du contrôle commande du barrage de Villerest (Loire)
Le système de conduite du barrage de Villerest, dit calculateur, représente un des organes les plus sensibles de l'aménagement puisqu'il assure la conduite permanente des vannes et de l'usine hydroélectrique. Le barrage peut restituer par ses organes plus de 5600 m3/s selon la cote d'exploitation.
Une partie des équipements, mis en service en 1987, a fait l'objet d'une modernisation partielle des matériels en 2002. Le maintien du système en conditions opérationnelles est devenu difficile dans les années suivantes, en raison du manque de pièces de rechange, des générations différentes d'équipement, et de problèmes de conception qui n'ont pas été résolus par la modernisation de 2002.
C'est pourquoi le maitre d'ouvrage, l'Établissement Public Loire, accompagné de son exploitant et maitre d'œuvre BRL Exploitation, a décidé de moderniser la totalité du contrôle commande du barrage.
Après une longue phase de définition des besoins et de conception des algorithmes, ces derniers ont été simulés sur plateforme permettant une mise en service sur site rapide et sans dysfonctionnement notable. L'architecture réseau a été conservée et les équipements modernisés avec du matériel communément utilisé en industrie pour garantir la pérennité de l'installation. La mise à disposition des informations à destination de l'opérateur a été dynamisée par la refonte globale du superviseur et l'intégration d'IHM sur toutes les armoires locales.

ABSTRACT

Distributed control system modernization of the Villerest dam
The Distributed control system of the Villerest Dam, represents one of the most sensitive element of the dam since it permits the daily control of gates and hydroelectric power plant. The dam can restitute up to 5600 m3/s (depending the water level).
A part of its material, launched in 1987, has been partially upgraded in 2002. Keeping the system efficient was difficult the following years, because of:
- *Lacking of spare part,*
- *Different system versions*
- *And conception problems that have not been solved since the update of 2002.*

That is why Etablissement Public Loire – Contracting authority – and BRL Exploitation – both water operator and project manager – have decided to update the entire S control system of the dam. The following report details the followed steps to achieve the upgrade of the entire SCADA system.
After a long first stage of definition of needs and algorithm conception, the program was subjected to a number of simulations, ensuring a quick implementation without major dysfunction. The network infrastructure was preserved end the equipment was upgraded using industrial standards to guarantee its durability. The supervisor was completely remade and GUI (Graphical User Interface) were placed on each electrical control cabinet so that the operator can have all the information.

1. INTRODUCTION

1.1 Présentation de l'ouvrage

Le barrage de Villerest est situé sur la Loire, à cinq kilomètres en amont de la ville de Roanne. Il s'agit d'un barrage poids, arqué en béton, d'une hauteur de 59 mètres et d'une longueur de 469 mètres. Il assure trois fonctions :

La première fonction concerne l'écrêtement des crues, et plus particulièrement les crues d'automne. Toutes les crues supérieures à 1000 m3/s sont écrêtées. Les objectifs de débit maximal sortant sont fixés à 1000 m3/s pour les crues inférieures à 2000 m3/s , à la moitié du débit entrant pour les crues entre 2000 et 4000 m3/s , au débit entrant réduit de 2000 m3/s pour les crues supérieures. Le volume stocké dans la retenue peut alors atteindre 180 millions de m^3avec un plan d'eau à la cote 320 m NGF.

La deuxième fonction concerne le soutien des étiages de la Loire en période estivale par déstockage d'une partie des volumes d'eau de la retenue. Ainsi un volume de 120 à 130 millions de m^3 peut être restitué à l'aval du barrage.

La troisième fonction concerne la production d'électricité. Une centrale hydroélectrique installée en dérivation sur le barrage assure, en situation normale et dans les limites de sa capacité, la restitution des débits à l'aval du barrage.

Le barrage est équipé de :

- cinq vannes segment de demi-fond, dont le seuil est situé à la cote 290 m NGF et qui permettent, chacune, de régler des débits compris entre 0 et 1 000 m³/s ;
- une vanne segment de fond dont le seuil est situé à la cote 274 m NGF et qui permet de faire passer un débit maximal de 1250 m³/s. Cette vanne segment est associée à une vanne wagon de sectionnement amont ;
- une vanne segment de restitution des faibles débits dont le seuil de prélèvement est situé à la cote 280 m NGF et qui permet de faire passer des débits jusqu'à une valeur maximale de 100 m³/s. Cette vanne est associée à une vanne wagon de sectionnement amont.

Le barrage comporte également un déversoir à surface libre dont le seuil est situé à la cote 320 m NGF.

La centrale hydroélectrique est équipée de deux turbines de type Kaplan à pales et directrices variables. Chacune de ces machines peut turbiner des débits compris entre 10 et 80 m³/s.

Le maître d'ouvrage du barrage est l'Etablissement Public Loire, BRL Exploitation son exploitant. L'usine hydroélectrique est gérée par EDF.

1.2 Présentation du contrôle commande de l'ouvrage avant modernisation

Le système de conduite du barrage, dit calculateur, représente un des organes les plus sensibles de l'aménagement puisqu'il assure la gestion permanente des vannes et de l'usine hydroélectrique. Il pilote l'ouverture des vannes en situation normale dans le respect du règlement d'eau et permet d'assister le barragiste en situation de crue.

Le système, avant l'opération de modernisation de 2010, était composé de 2 automates programmables fonctionnant en secours l'un de l'autre, et de plusieurs modules d'entrée/sortie qui étaient reliés par fibre optique ou réseau Ethernet. Tous les échanges Homme/Machine : choix du mode de fonctionnement, visualisation des trames, application de consignes, visualisation des états des vannes, se faisaient par l'intermédiaire de 2 PC redondants installés en salle de commande. Des armoires locales au niveau des vannes permettaient leur manœuvre.

Le système assurait également les fonctions de communication avec le Centre de Gestion des Crues et des Etiages (CGCE) d'Orléans, le barrage de Roanne et les exploitants d'astreinte (Diffuseur d'Alarme Parlée).
A noter qu'une partie des équipements, mis en service en 1987, a fait l'objet d'une modernisation partielle des matériels en 2002. Dans les années suivantes, le maintien du système en conditions opérationnelles s'est avéré difficile en raison d'une maintenance devenue délicate (matériel obsolescent) et de problèmes de conception qui n'ont pas été résolus par l'opération de 2002.

C'est pourquoi le maître d'ouvrage, l'Etablissement public Loire a décidé de moderniser l'ensemble du contrôle commande du barrage et éviter une modernisation par strate.

2. PHASE D'AVANT-PROJET

2.1 Audit préalable

Le maître d'ouvrage a d'abord missionné BRL Exploitation pour analyser le fonctionnement du calculateur et, plus globalement, l'organisation du contrôle commande de l'ouvrage. L'objectif était de cerner les problèmes existants et de définir les nouveaux besoins.
A l'issue de l'audit, les points suivants ont été mis à jour :
- Difficulté pour débugger simplement le programme automate
- Mode de gestion du barrage défini dans le programme automate non conforme aux exigences d'exploitation (entraînant une conduite manuelle du barrage la plupart du temps)
- Difficulté pour réaliser toute opération de modification mineure
- Peu de remontée d'information au niveau des commandes locales
- Supervision très difficile à s'approprier
- Matériel et protocole de communication vieillissant voire obsolète

Face à ce constat, le projet de modernisation s'est fixé les objectifs suivants :
- Fiabiliser le calculateur et l'automatisme de l'ensemble du barrage
- Fiabiliser l'ensemble du contrôle/commande
- Intégrer de nouvelles fonctionnalités au système actuel
- Moderniser les armoires locales de commande des vannes
- Moderniser le pupitre opérateur et le superviseur
- Redéfinir le lien et communication avec l'usine
- Déplacer l'armoire du calculateur
- Conserver le maximum d'équipements de la récente modernisation, afin de limiter les dépenses
- Maintien et sécurisation des barrières de sécurité (voir ci-après)

2.2 Maintien et renforcement des barrières de sécurité

Il s'agissait de conserver les sécurités existantes et de compléter le dispositif par de nouveaux contrôles.

Ainsi, les sécurités suivantes ont été maintenues, voire renforcées :
- Commandes manuelles locales et déportées (pupitre) sans passer par l'automate
- Commutateur de limitation d'ouverture de la vanne (seuils de 100 à 1000m3/s limitant chaque vanne)
- Contrôle de la position de vanne doublé (relais par palier et codeur angulaire)
- Contrôle de la vitesse de variation de la vanne
- Auto maintien de commande manuelle avant manœuvre
- Sélection manuelle de la source de commande de chaque vanne (auto/ local /distant)
- Sauvegarde aval reconduite (contrôle par poire de seuils de débits – système prioritaire sur l'automatisme)
- Mesure de niveau amont doublée (+ secours par saisie manuelle) et contrôlée
- Sources d'énergie en commande et manœuvre doublées (ajout sur la commande)
- Vérification en continu du fonctionnement du dispositif de transfert d'alarmes

Ce dispositif a été complété par l'ajout d'un radar au pont aval pour un contrôle de la cohérence des débits restitués.

2.3 Procédure de consultation des entreprises

Compte tenu de la complexité de l'opération de modernisation du contrôle commande et du nombre de solutions possibles, il a été décidé de réaliser une procédure de consultation par dialogue compétitif.
Parmi onze candidatures, les quatre meilleurs candidats ont été retenus selon leurs références et leurs moyens techniques et humains.
La phase de dialogue s'est déroulée sur 3 mois, avec 3 réunions par entreprise. La première réunion a permis de présenter aux entreprises le contexte et la problématique. La deuxième réunion était consacrée à la présentation de la solution technique de l'entreprise et l'échange technique entre les différents participants. La dernière réunion avait pour objectif de faire la dernière mise au point technique et administrative.
Tout au long de la phase de dialogue, la confidentialité des solutions a été garantie par le maître d'ouvrage et le maître d'œuvre (chaque candidat restant propriétaire de sa solution technique jusqu'à la remise des offres).

Suite à la phase de dialogue compétitif, le maître d'ouvrage a notifié le marché à l'entreprise SCATE Automation pour les travaux suivants :

- Analyse fonctionnelle complète du contrôle commande de l'ouvrage
- Rédaction du programme automate comprenant les algorithmes de gestion de l'ouvrage
- Modernisation de l'architecture réseau
- Simulation en plateforme et sur site de tous les algorithmes
- Renouvellement de l'armoire principale dans la contre cloison
- Renouvellement des armoires locales de commande des vannes (x9)
- Modernisation de la supervision
- Renouvellement du pupitre de commande
- Adaptation temporaire des automatismes pour la phase chantier

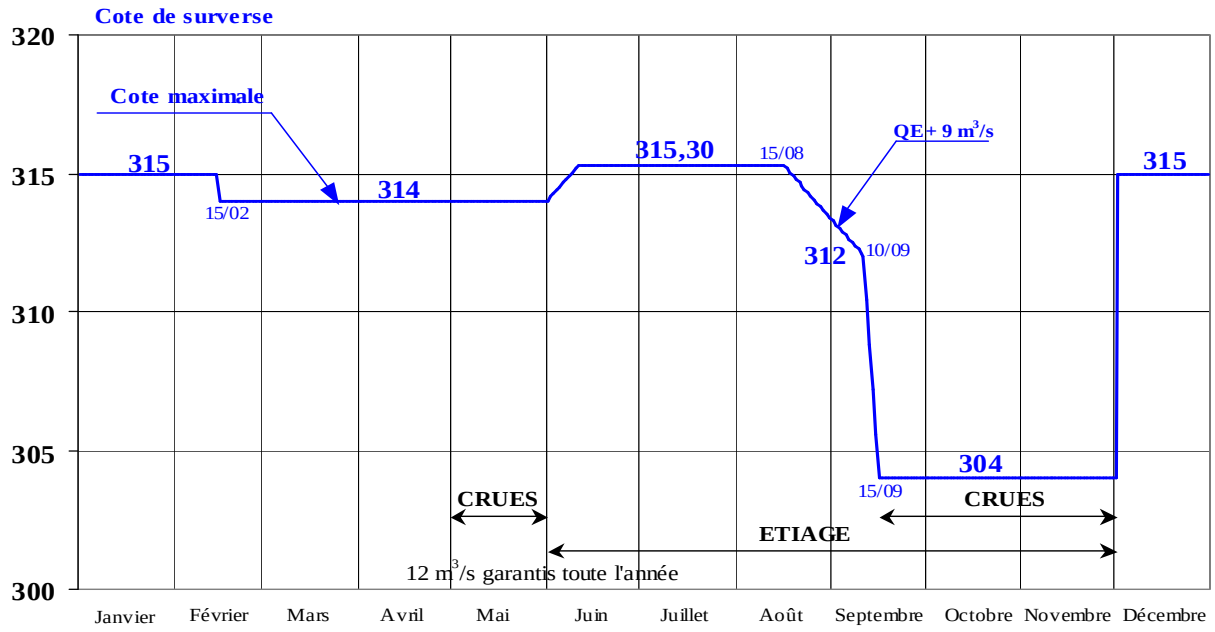
3. ETUDE ET MODERNISATION DES ALGORITHMES

Cette partie de la modernisation a été la plus chronophage, mais essentielle dans la réussite du projet. Deux façons de procéder ont été envisagées pour cette phase, la première était de repartir des algorithmes existants et debugger point par point les problèmes connus. La deuxième, qui a été rapidement privilégiée, était de reconcevoir la totalité des programmes et algorithmes des automates.

3.1 Fonctionnement ancien calculateur

Le calculateur est un système d'automates capable de piloter l'ouverture des vannes et de donner les consignes de débits à l'usine en suivant les contraintes du règlement d'eau, notamment :

- les cotes maximales du schéma d'exploitation en période normale (ci-après)
- le marnage maximum de 50 cm (en maintien de cote)
- le respect des règles de variations du débit sortant prévues au règlement d'eau (variations instantanées du débit sortant, temporisation entre 2 manœuvres, palier).
- le respect d'un débit minimum de 12 m3/s en pied d'ouvrage (débit réservé)
- le déstockage en cas de situation de risque de crue : si la cote au barrage est supérieure à 314 m NGF, il est procédé à un déstockage à 314 m NGF. Ce déstockage est déclenché manuellement par le barragiste en cas de dépassement de seuils pluviométriques et débitmétriques à l'amont.



Graphique 1 : Cote d'exploitation normale

Le calculateur comprenait plusieurs algorithmes traduisant plusieurs modes de fonctionnement (mode normal, opérateur ou usine). Le mode normal était conçu pour fonctionner en automatique (sans l'intervention d'un opérateur) en dehors des situations de crue, pour des débits entrants inférieurs à 1 000 m3/s .

On distinguait 4 situations : normal, étiage, risque de crue et crue.
En étiage et en crue : la gestion était réalisée en mode opérateur (débit sortant imposé par l'opérateur et assistance du système pour son application),
En période normale : la gestion était réalisée en automatique. Elle consistait :
- A gérer l'ouvrage à cote constante, avec un marnage de 50 cm lorsque le débit entrant était suffisant pour maintenir la cote maximale définie au schéma d'exploitation,
- A procéder à des stockages/déstockages correspondant à la montée ou à la descente de la cote maximale prévue par le schéma d'exploitation.

Les algorithmes utilisés étaient « cote stable » ou « cote à atteindre », avec un passage automatique de l'un à l'autre suivant les périodes prévues au schéma d'exploitation.
En risque de crue : le barragiste était alerté en cas de dépassement de seuils pluviométriques. La gestion consistait :
- A déstocker jusqu'à 314 m NGF si la cote au barrage était supérieure à cette valeur,
- A gérer à cote constante sinon.

Si la cote au barrage était inférieure à 314 m NGF, la gestion en risque de crue consistait à laisser l'automate en mode d'exploitation normal (algorithme « cote stable »), en modifiant éventuellement la cote maximale.

3.2 Limites de fonctionnement de l'ancien calculateur et problèmes identifiés

Le programme automate de l'ancien calculateur comprenait des algorithmes ne donnant pas satisfaction, L'exploitant devait souvent gérer l'ouvrage manuellement en déconnectant le calculateur, supprimant ainsi des sécurités et des contrôles de cohérence Les dysfonctionnements identifiés étaient :
- Problème de calcul du débit entrant après un déstockage (remise en automatique difficile) - Instabilités ponctuelles constatées sur le débit entrant calculé.
- En cas de débit entrant important avec fort gradient, lorsque l'algorithme à cote stable ne permet pas d'augmenter le débit sortant suffisamment rapidement pour maintenir la cote, il y a un risque de dépassement de la cote max +25 cm (dépassement constaté par exemple en février 2009).
- Divergence entre les débits sortants calculés et les débits mesurés par jaugeage

3.3 Définitions de nouvelles fonctionnalités

Le débit entrant observé au barrage est soumis à des fluctuations importantes, notamment dans la gamme de débits 0 - 120 m³/s (éclusées du barrage de Grangent situé en amont). Afin de limiter les impacts sur l'aval, la demande du maître d'ouvrage consistait à mener la gestion de façon à :
- Ne pas créer de variations artificielles significatives de débit à l'aval par amplification des variations artificielles pouvant venir de l'amont, et dans la mesure du possible à atténuer celles-ci.
- Pouvoir paramétrer un déstockage moins violent que ce qui était prévu par l'ancien algorithme (objectif : Qe + 300 m³/s), et en laissant à l'utilisateur la possibilité de choisir d'autres débits objectifs (exemple : Qe + 50/100/200 m³/s).
- Adoucir la fin des phases de stockage et déstockage par un amortissement des débits sortant car le passage de l'algorithme « cote à atteindre » à celui de « cote stable » conduisait à des variations trop brutales en cas de fort débit entrant.
- Pouvoir modifier par l'opérateur, les valeurs de marnage, débit minimum sortant et cote maximum, les valeurs par défaut étant celles du règlement d'eau. Ces modifications permettent d'anticiper d'éventuelles adaptations dans la gestion liées aux évolutions des textes ou à des décisions exceptionnelles. En effet, compte tenu de la mise à jour du règlement d'eau en cours lors de la définition des besoins, le maître d'ouvrage a souhaité qu'un maximum de données puisse être paramétrable dans la supervision.

3.4 Nouveaux algorithmes

3.4.1 Calcul du débit entrant

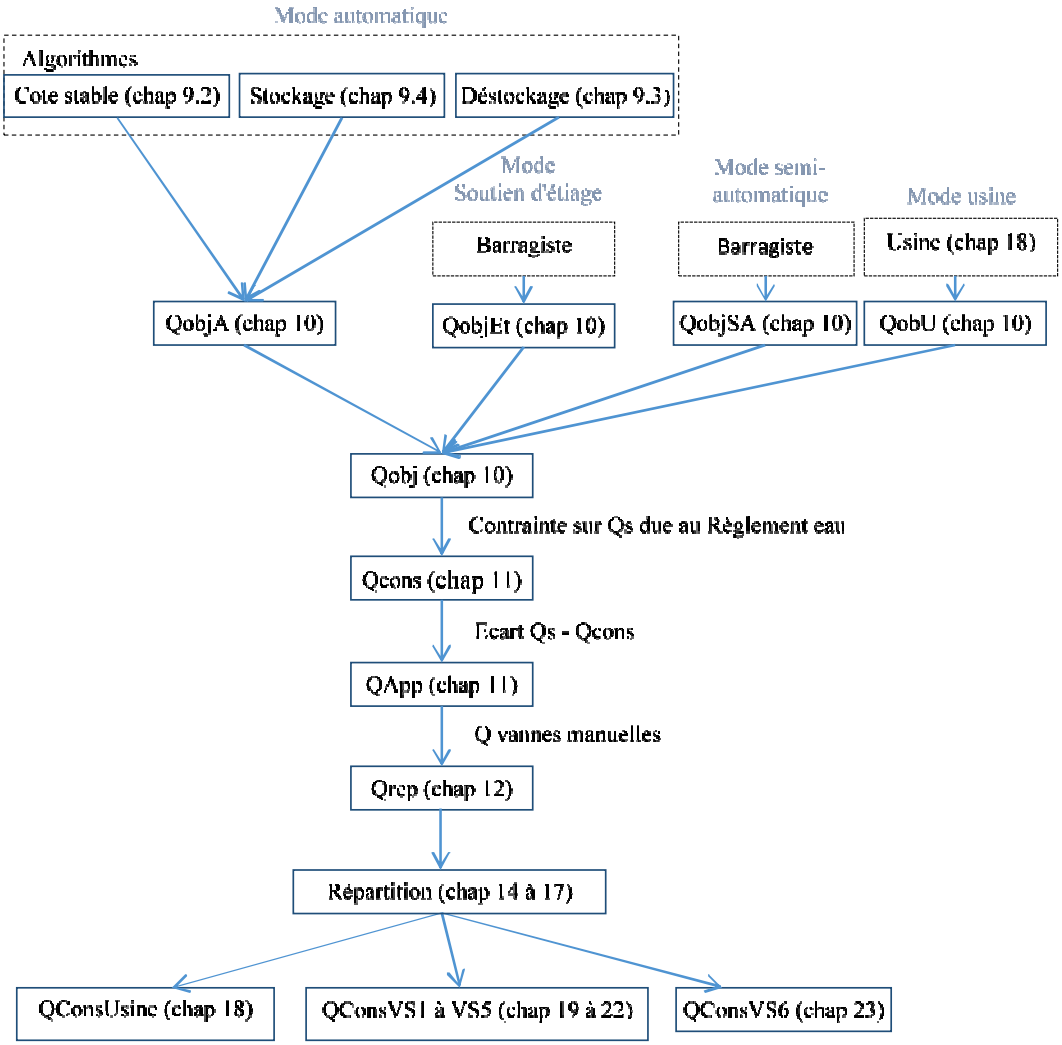
L'estimation du débit entrant est une valeur stratégique car elle sert de donnée d'entrée à de nombreux algorithmes. Dans l'ancien calculateur, cette donnée ne suivait pas forcément la réalité hydraulique de l'ouvrage. En effet un seul type de calcul était fait à partir de la variation de cote et du débit moyen sortant sur un pas de temps fixe. Or, selon si l'ouvrage est en configuration étiage ou en crue, la réactivité du plan d'eau n'est pas la même.

Dans le nouveau programme, le débit entrant est donc évalué à partir de la variation de cote et du débit moyen sortant sur des **pas de temps variables**.
Pour les faibles débits, les pas de temps importants ont été privilégiés pour lisser les variations effectives du débit entrant et réduire les instabilités liées aux incertitudes sur les mesures de la cote. Le pas de temps a été progressivement réduit à mesure que le débit augmente pour pouvoir tenir compte des variations liés à « un coup d'eau ».
Le lissage des débits a été recherché dans les gammes de débits fortement influencées par le fonctionnement du barrage à l'amont, essentiellement pour des débits entrant inférieurs à 120 m³/s, puis dans une moindre mesure inférieurs à 300 m³/s.
Ainsi, le débit entrant de référence correspond au débit entrant moyen sur 24h pour des débits inférieurs à 120 m3/s, et à une moyenne sur 4h pour un débit supérieurs à 300 m3/s .
Désormais, le pas de temps de calcul dépend de la valeur du débit entrant, il ne dépend plus de la cote au barrage et de sa position par rapport à une cote objectif. Cette méthode permet de ne pas introduire d'instabilités liées aux incertitudes sur la cote pour les faibles débits. Dans tous les cas, le débit entrant moyen est calculé au minimum sur 4 h pour privilégier la stabilité du débit et réduire les incertitudes liées à la mesure de la cote. Cette méthode tend à sous-estimer l'entrant instantané en montée des débits et à le surestimer en période de baisse.

3.4.2 Modes de gestion

Le mode de gestion de l'ouvrage a été modifié pour coller à la réalité de l'exploitation. Le logigramme ci-dessous définit la logique du calculateur. Il existe :
- un mode automatique qui gère en fonction du débit entrant et de la période hydraulique, le débit calculé objectif à sortir selon 3 algorithmes : Cote stable, stockage et déstockage.
- un mode soutien d'étiage et un mode semi-automatique, c'est le barragiste qui doit entrer le débit objectif
- un mode usine : c'est EDF qui définit le débit objectif passant par la centrale hydraulique.

Trois algorithmes permettent de calculer le débit objectif sortant pour une gestion en automatique en période normale ou en risque de crue :
- **Cote stable** : L'objectif est de maintenir une cote stable comprise dans une zone autorisée. Le débit sortant est ainsi, en moyenne, égal au débit entrant. L'algorithme à cote stable bascule automatiquement sur l'algorithme de stockage si le débit entrant ne permet pas de maintenir la cote. L'algorithme à cote stable est utilisé en période normale et en risque de crue lorsqu'un déstockage n'est pas nécessaire (cote au barrage inférieure à 314 m NGF).
- **Déstockage** : L'objectif est d'abaisser le niveau de la retenue. Le débit sortant est porté à une valeur supérieure au débit entrant, paramétrable par l'opérateur. L'algorithme de déstockage bascule automatiquement sur l'algorithme à cote stable lorsque la cote dite de déstockage est atteinte (valeur paramétrable par l'utilisateur). L'algorithme de déstockage est utilisé pour suivre les diminutions de la cote maximale prévues au schéma d'exploitation, ainsi qu'en risque de crue.
- **Stockage**. L'objectif est de laisser remonter le niveau de la retenue. Le débit sortant est porté à une valeur inférieure au débit entrant, paramétrable par l'opérateur. L'algorithme de stockage bascule automatiquement sur l'algorithme à cote stable lorsque la cote dite de stockage est atteinte (valeur paramétrable par l'utilisateur). L'algorithme de stockage est utilisé pour suivre les augmentations de la cote maximale prévues au schéma d'exploitation.



***Graphique 2** : grafcet principal de l'automate extrait de l'analyse fonctionnelle*

Le suivi des variations de cote du schéma d'exploitation est déclenché par l'opérateur, avec une modification éventuelle des paramètres de stockage/déstockage. Ces dispositions, permettent :

- D'éviter les problèmes éventuels de transition automatique entre deux algorithmes (constatés sur l'ancien) en période normale (ex : débit entrant de 400 m3/s le 1er juin et passage de « cote stable » à « cote à atteindre » pour suivre le schéma d'exploitation, qui se traduit par une baisse puis hausse du débit sortant de 400 m3/s à 12 m3/s),
- D'utiliser l'algorithme de déstockage, y compris pour la descente à 304, tout en définissant la vitesse de déstockage souhaitée,
- Impliquer plus fortement le barragiste dans la gestion de l'ouvrage.

4. TRAVAUX DE MODERNISATION DES EQUIPEMENTS DE CONTROLE COMMANDE

4.1 Modernisation de l'architecture réseaux

4.1.1 Principes retenus

L'architecture réseau constitue un autre point important discuté lors des réunions de dialogue compétitif. Le choix de conserver l'architecture existante a été rapidement validé : deux automates redondants centraux et des borniers d'entrées/sorties déportées.

Les raisons invoquées sont les suivantes :
- Pas d'automatisme complexe sur les postes locaux (armoire de commande des vannes),
- Nécessité de fonctionnement permanent pour les algorithmes de gestion hydraulique de l'ouvrage
- Conservation du réseau fibre optique

Compte tenu de l'obsolescence des borniers d'entrées sorties TBX et des contraintes liées au protocole de communication FIPIO (protocole propriétaire du constructeur et donc non ouvert avec du matériel d'une autre marque), il a été décidé de changer complètement les ilots d'entrées/sorties déportés existants (TBX) et le protocole de communication des données.

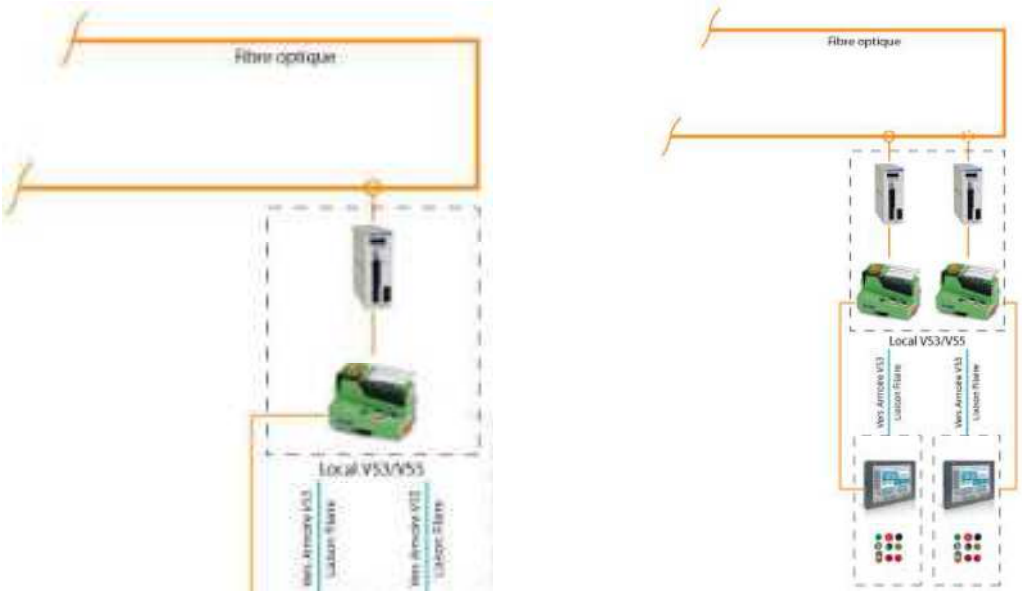
Aujourd'hui, de nombreux équipements tiers sont compatibles avec des interconnexions réseau de type Ethernet. Par conséquent, en vue de pérenniser l'installation, il a été décidé d'évoluer du réseau actuel FIPIO vers un réseau Ethernet (protocole Modbus TCP-IP) avec conservation des fibres optiques en place. Les borniers d'entrées sorties déportés ont été remplacés par des modules compatibles Modbus TCP/IP. Ils sont plus modulaires et facile à dépanner que la solution existante.

La boucle réseau fibre optique a été paramétrée pour s'autocicatriser en cas de coupure d'une fibre.

4.1.2 Travaux effectués

Ces choix ont engendré les changements suivants :
- remplacement des modules spécifiques OZD FIP G3 (le réseau FIP imposait ce matériel sans autre alternative possible) par des switchs Ethernet industriels de grande diffusion (plusieurs modèles de marque différentes peuvent convenir). Ils assurent :
  - o l'interconnexion des réseaux Ethernet cuivre avec les réseaux Ethernet fibre optique
  - o la gestion de la redondance de l'anneau réseau fibre optique (basculement automatique du chemin réseau en cas de défaillance détectée)
  - o l'adaptation de la connectique des fibres optiques existantes aux nouveaux switchs
- le remplacement des modules d'entrées/sorties déportées TBX par des modules communicants sur Ethernet.

Afin de limiter l'impact d'une panne sur un switch ou un module d'entrées/sorties, la modernisation a prévu l'installation d'un switch et d'un ilot déporté par organe de vantellerie (l'ancienne architecture pouvait en cas de panne sur un switch ou un module d'E/S provoquer la perte de l'usage de 2 vannes).

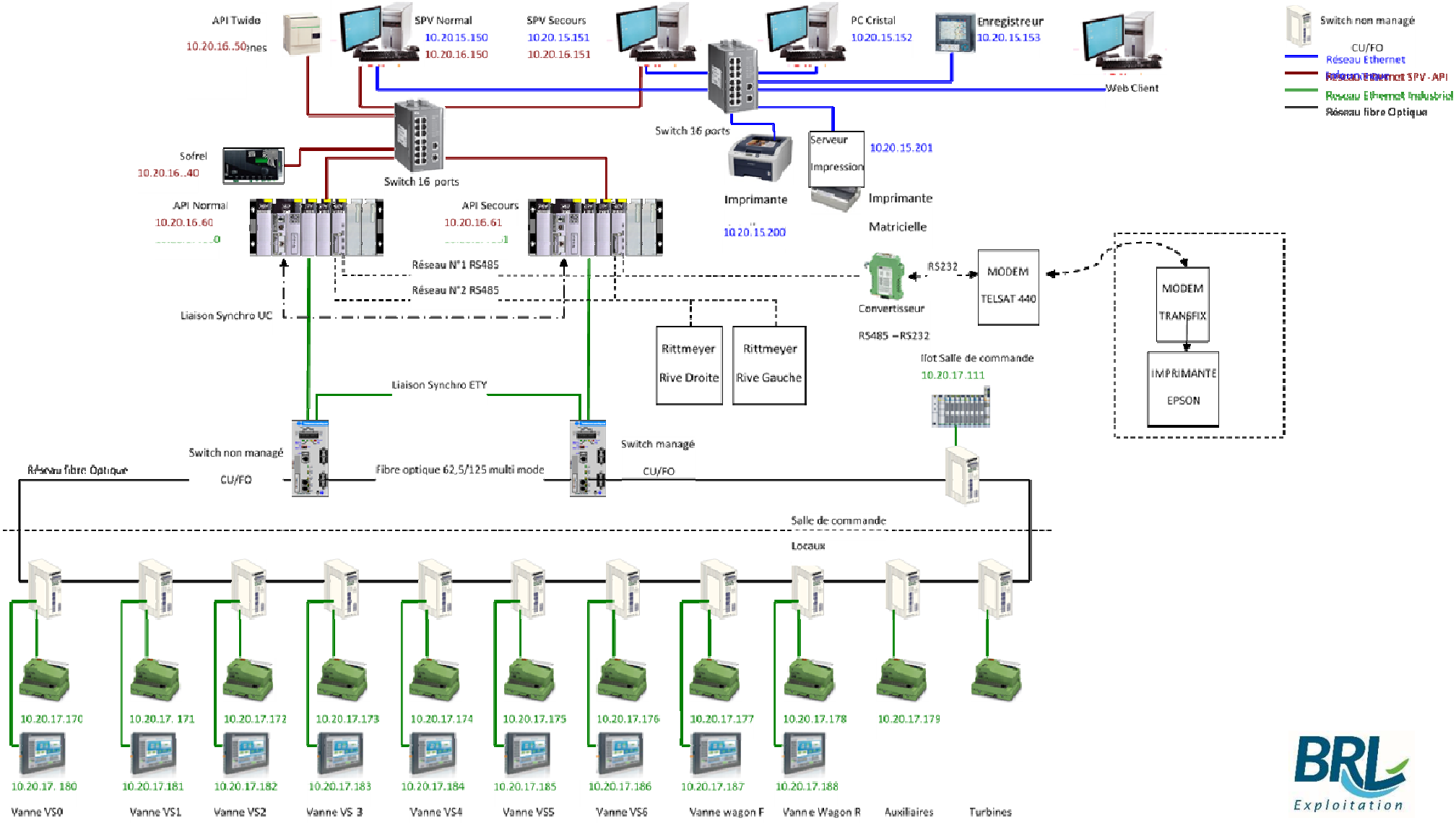


***Graphique 3** : Architecture de commande des vannes : ancien et nouveau système.*

La mise à jour de la topologie existante de processeurs automates redondants a impliqué :

- le remplacement des processeurs Schneider TSX P57 existants par des processeurs de nouvelle génération Schneider TSX H57 capables de gérer la redondance de façon native sans aucun programme additionnel, contrairement à la solution en place. Ainsi, le système est fiabilisé en supprimant les risques de dysfonctionnement de redondance avec une garantie assurée par le constructeur.
- le logiciel de programmation PL7PRO qui était obsolète a été changé par Unity PRO de Schneider Electric.
- l'utilisation de cartes coupleurs Ethernet TSX ETY classiques.

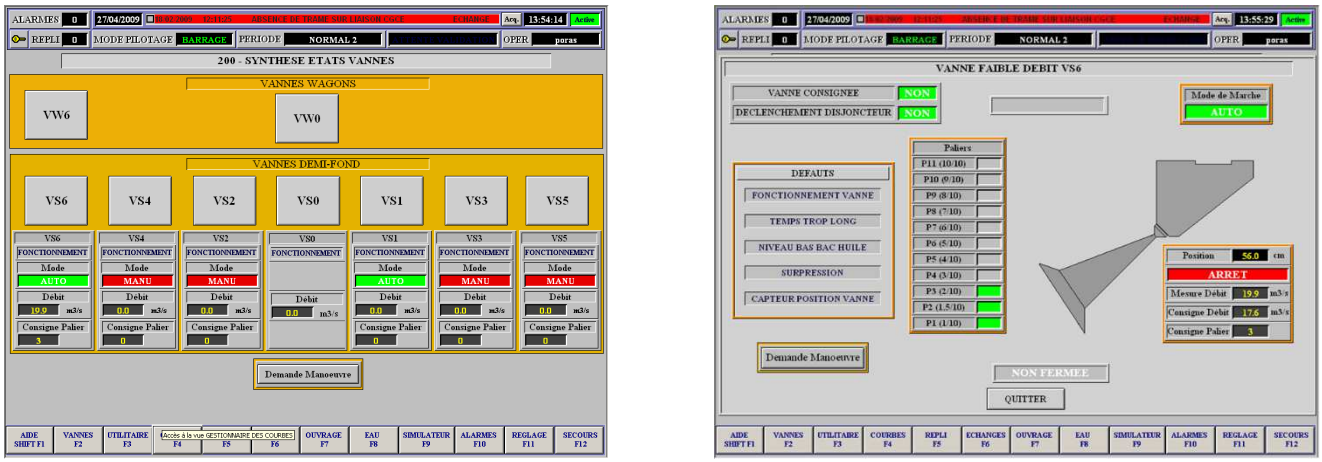
L'automate redondant a été déplacé afin que les deux automates et leurs équipements périphériques (alimentation, switch, …) ne soient pas dans une seule et même armoire, toujours dans le souci de minimiser l'impact d'une avarie sur une armoire.



Graphique 4 : Architecture réseau complète.

4.2 Modernisation de la supervision

La supervision de l'ancien système de contrôle commande de l'ouvrage constituait un point faible de l'ensemble : elle était peu conviviale, difficilement compréhensible et peu maintenable.



***Graphique 5** : Copies d'écran de l'ancienne supervision : vue général (à gauche) et vue d'une vanne de demi-fond.*

La modernisation a consisté à reprendre toute la supervision en parallèle de la réalisation des algorithmes. L'esthétique et l'ergonomie du rendu de la supervision constituent un des aspects mis en avant lors de la phase de dialogue compétitif car souvent négligé par les entreprises. En effet, les synoptiques des superviseurs sont réalisés via les icônes et animations proposées par le logiciel de supervision lui-même (PC VUE, Topkapi ou autres) qui ne sont pas forcément adaptées à ce que l'on souhaite représenter. De même, l'ergonomie des pages n'est pas forcément très réfléchie conduisant à des superviseurs peu conviviaux.
Les synoptiques des superviseurs sont un bon moyen de communication et de formation pour de nouveaux exploitants ou des intervenants extérieurs.
Les synoptiques et les animations ont donc été réalisés par un dessinateur/graphiste professionnel. L'ergonomie a elle été beaucoup discutée lors des réunions d'avancement, avec des aller/retour entre le titulaire du marché, l'exploitant/Maitre d'œuvre et le maitre d'ouvrage. La supervision a complètement été repensée selon les nouveaux algorithmes et le retour d'expérience d'exploitation de l'ouvrage.



***Graphique 6**: Copies d'écran de la nouvelle supervision : vue général (à gauche) et vue d'une vanne de demi-fond (à droite).*

4.3 Modernisation des armoires de commande

Il s'agissait également de moderniser les armoires électriques de contrôle commande des 9 vannes et le déplacement de l'armoire de la salle de contrôle sans perturbation notable sur la gestion du barrage et de la centrale hydroélectrique.
Dans la globalité, les 9 armoires de commande locale donnaient satisfaction à l'exploitant. La modernisation a consisté à rajouter sur chaque armoire une interface homme machine (Schneider Electric XBTGT4330 en version 7,5" couleur) afin que l'exploitant connaisse localement toutes les informations de l'ouvrage. L'exploitant dispose désormais sur chaque armoire des mêmes informations que sur le superviseur.

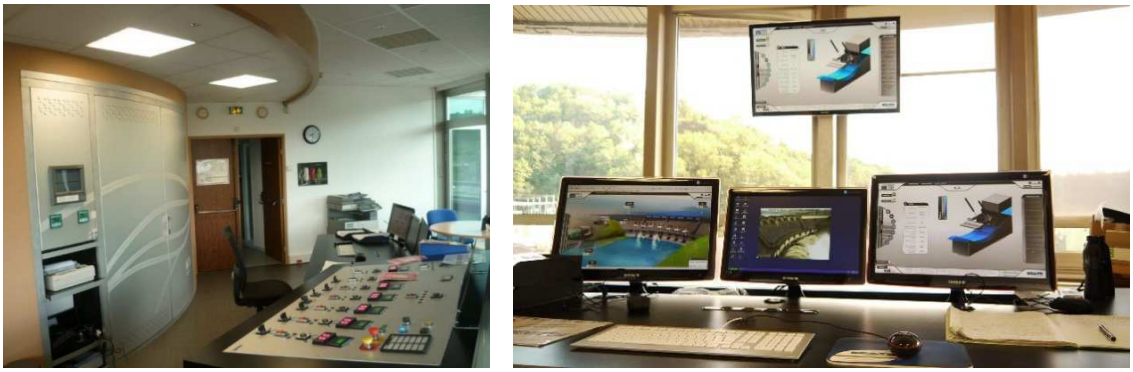


Graphique 7: Façade de l'armoire de la vanne VS1.

Les fonctionnalités existantes comme la possibilité de manœuvrer les vannes localement sans passer par le calculateur ont été conservées. Les travaux sur l'armoire électrique de la salle de commande ont été mis à profit pour revoir l'aménagement complet de la salle de commande avec une meilleure intégration esthétique de celle-ci dans le projet d'ensemble.



Graphique 8 : Salle de commande avant travaux

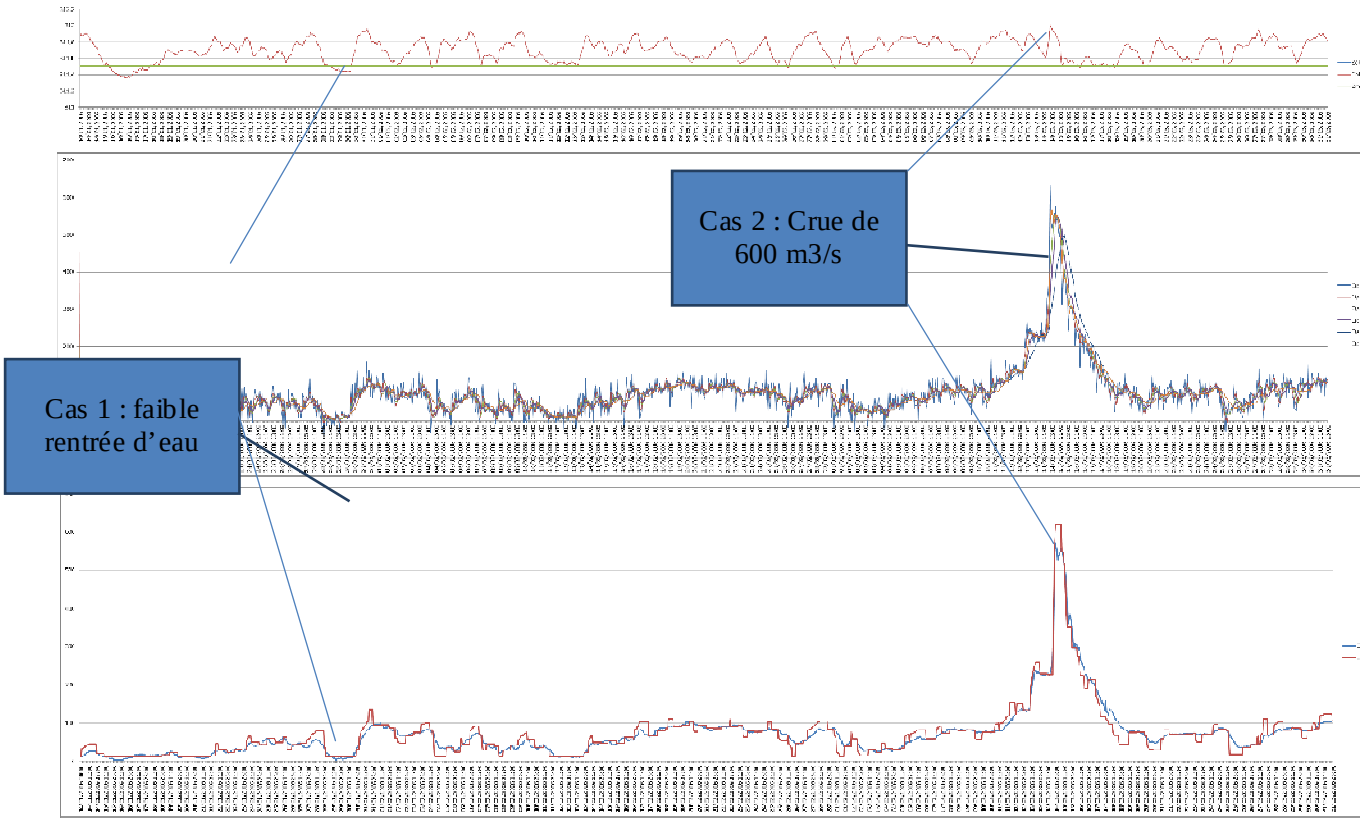


***Graphique 9** : Salle de commande après travaux : modernisation de l'armoire électrique, du pupitre de commande et de la supervision.*

5. MISE EN PRODUCTION

5.1 Simulation plateforme

Afin de valider tous les nouveaux algorithmes, l'entreprise a conçu un simulateur comprenant l'ensemble du matériel d'automatisme (les deux automates, les borniers d'entrée sortie, un superviseur) et un PC de simulation intégrant des données d'archive du barrage. Cela a permis de tester et d'ajuster les réactions des nouveaux algorithmes, notamment pour la gestion à cote stable, le stockage, le déstockage et la répartition des débits sur les vannes.
Les données de débit envoyées au simulateur sont réalisées par un condensé de l'historique recueilli sur l'ouvrage, le pas de temps étant accéléré. Ainsi, en quelques heures, le simulateur peut retracer une année d'exploitation de l'ouvrage.
L'entreprise titulaire du marché a réalisé les simulations sur plateforme, de plus de 20 algorithmes. Les résultats étaient ensuite présentés au maître d'ouvrage et au maître d'œuvre. Au-delà du test brut des programmes, ces simulations ont permis de préciser certaines demandes qui n'avaient pas été clairement présentées (par exemple, sur l'ordre d'affectation des débits sur les vannes). Au final, ces simulations ont pris beaucoup de temps mais ont très certainement permis un basculement sur site sans problème majeur.



***Graphique 10** : Résultat de simulation à cote stable 312 mNGF avec une période de crue*

Le premier graphique correspond à l'évolution de la cote plan d'eau (en rouge). Les traits bleu et vert sont les limites du marnage haut et bas.
Le graphique du milieu correspond aux calculs des différents débits entrant Qe4, 8, 12, 24 et le QE de référence.
Le dernier graphique correspond aux données d'entrées du simulateur.

Nous pouvons voir que sur le cas n°1, la cote du plan d'eau descend en dessous de la cote minimale d'exploitation car les entrées d'eau sur cette période sont faibles.
Pour le cas n°2, correspondant à une crue de 600m3/s. Les calculs des débits entrants suivent bien le débit entrant réel et la cote maximale d'exploitation n'est pas dépassée.

5.2 Principe de basculement :

Le basculement a nécessité un arrêt complet de l'ancien calculateur pour mettre en place le nouveau. La meilleure période pour ce basculement correspondait à la période de soutien étiage où 100% du débit peut être restitué par l'usine hydroélectrique, le secours restant assuré par le mode de conduite manuel qui consistait à ouvrir et fermer les vannes via les armories de commande local.

Selon les débits à restituer, la procédure d'exploitation de l'ouvrage était la suivante :

- Q < 160 m3/s : débit pris en charge par l'usine, la consigne de débit est élaborée et appliquée 2 fois par jour avec le maitre d'ouvrage, l'exploitant du barrage et l'exploitant de l'usine hydroélectrique.
- 160 < Q < 300 m3/s : ouverture d'une vanne à un débit figé, le complément est fait par l'usine.
- Q > 300 m3/s : Mise en place d'une surveillance permanente 24h/24

Concernant la surveillance de la cote plan d'eau, l'exploitant contrôlait régulièrement l'échelle limnimétrique en complément d'une mesure analogique télégérée.

Les étapes clefs du basculement sont rappelées ici avec leur durée :

- Validation de l'analyse fonctionnelle du contrôle commande du barrage : 1 an.
- Simulation en plateforme des nouveaux algorithmes : 6 mois
- Préparation du basculement avec mise en place de 5 nouvelles armoires de commandes locales: 1 mois
- Arrêt de l'ancien calculateur : 15 jours
- Mise en place du nouveau calculateur et de la nouvelle supervision : 1 mois
- Essais et mise en service de l'ensemble : 1 mois
- Mise en place des dernières armoires locales de commande : 1 mois

5.3 Première année sous garantie

De manière générale, il n'y a pas eu, dans le cadre de l'année de garantie de parfait achèvement, de problème majeur sur le matériel. Des points d'amélioration du programme automate ont été relevés par le Maître d'ouvrage et l'exploitant au cours de cette année, ce qui est assez classique pour une première année de mise en service d'un programme aussi complexe. L'entreprise titulaire du marché a résolu à chaque fois les dysfonctionnements, majoritairement à distance avec la prise en main des PC de supervision et des automates programmables.

Cette période a surtout permis de tester en réel certains algorithmes non simulables pendant les essais sur site. Des petites améliorations sur certains algorithmes ont d'ailleurs fait l'objet d'une nouvelle phase de consultation des entreprises.

5.4 Suite des travaux : mise en place d'une assistance

Dans un premier temps, il était envisagé de former les exploitants du barrage pour qu'ils puissent intervenir de manière autonome sur les automates et le superviseur. Toutefois, la technicité des programmes a finalement conduit à privilégier l'externalisation de cette compétence, l'exploitant gardant quand même la maintenance de niveau courant du nouveau matériel. Un marché à bons de commande a été lancé permettant qu'une entreprise spécialiste dans le domaine de l'informatique industrielle puisse intervenir très rapidement sur l'installation à distance ou sur site. Ce marché a également permis de mettre en place les améliorations décelées après la mise en service industrielle des algorithmes à savoir :

- Modification du formalisme des bilans
- Mise en place d'un paramétrage possible pour le re calcul du débit sortant dans la plage basse de régulation
- Modification du seuil de basculement du mode usine vers le mode barrage en cote basse
- Modification de la consigne envoyée au barrage en cas de basculement d'un des groupes de l'usine en mode manuel

6. CONCLUSION

L'opération de modernisation du contrôle commande du barrage de Villerest, y compris la phase de préparation, s'est déroulée de 2009 à 2013. Cette durée à première vue plutôt longue constitue néanmoins l'une des clés de la réussite du projet. En effet, que ce soit au moment de la définition de besoins ou lors des simulations en plateforme, le maître d'ouvrage s'est donné le temps de la réflexion et des échanges avec l'entreprise. Il en a résulté une phase de basculement sur site relativement courte et sans problème majeur.

Cette modernisation a conduit au développement d'un outil de gestion de l'ouvrage plus ouvert et paramétrable, assurant une meilleure pérennité. L'amélioration des visuels de la supervision permet, au-delà d'une utilisation quotidienne plus conviviale, de former de nouveaux agents et communiquer vers l'extérieur.

La mise à disposition de l'exploitant de toutes les informations nécessaires à l'exploitation de l'ouvrage sur toutes les armoires via les IHM (Interfaces Homme Machine) locales constitue une évolution notable. La forte implication du maître d'ouvrage et du maître d'œuvre exploitant ont permis de bien cadrer la prestation pour que le résultat corresponde aux plus près à la demande.

Après plus d'un an de fonctionnement, cet investissement donne entière satisfaction.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier toutes les personnes ayant participées activement à cette modernisation.
- En commençant par le maitre d'ouvrage EPLOIRE et plus particulièrement Hélène XHAARD, Mamy TOMOZAFY, Christophe THUINET et Romain LEFEBVRE.
- La société titulaire du marché SCATE AUTOMATION et notamment Frédéric BRAUGE, Matthieu RAVEL, Patrick SPIEGEL et Denis PERRON.
- Les intervenants extérieurs : Jacky ASTIER, entreprise FREDDO, Terral designer
- Les exploitant sur site : pour EDF : Christian MILLOT ; pour BRL EXPLOITATION : Grégory PORAS, Frédéric BRETON, François TETE, Benjamin CARRIERE.
- L'équipe de maitrise d'œuvre de BRL EXPLOITATION: Jean-Pierre DUMONT, Franck MARUEJOLS, Laurent CHEYNET et Anthony LYSIMAQUE

RENOUVELLEMENT DES SYSTEMES DE CONDUITE ET DE CONTROLE COMMANDE DES AMENAGEMENTS DU HAUT-RHONE

Renewal of the driving and order control systems in the Rhone's upper area

Anne AUDIBERT
Compagnie Nationale du Rhône – 2 rue André Bonin – 69 316 Lyon Cedex 04
a.audibert-archenault@cnr.tm.fr

Téléphone : +33 (0) 472 006 969, Fax : +33 (0) 472 006 666

MOTS CLÉS

Renouvellement, nouvelle architecture, risques hydrauliques, phase de validation.

RÉSUMÉ

La Compagnie Nationale du Rhône, du groupe Engie, exploite 18 aménagements le long du Rhône (6 sur le Haut-rhône et 12 sur le Bas-Rhône). En 2004, la CNR a engagé un projet de renouvellement des systèmes de conduite et de contrôle commande des 6 aménagements du Haut-Rhône. L'article présente les différents objectifs du projet ainsi que la construction et la validation d'une nouvelle architecture en s'appuyant sur une expérience forte acquise sur le Bas-Rhône.
Les grandes fonctionnalités, comme la répartition usine ou la répartition barrage, ont été modularisées et externalisées afin de faciliter la maintenabilité et d'apporter une meilleure visibilité.
La présentation détaille la mise en place de cette architecture pour l'aménagement de Brégnier-Cordon en intégrant une gestion des risques hydrauliques et une prise en compte des risques informatiques.
La stratégie voulue sur ce projet était la maitrise du temps de déploiement tout en gardant une bonne évolutivité des systèmes de conduite. Un des objectifs était de construire une architecture cible qui puisse faire référence au sein de la CNR.

ABSTRACT

Compagnie Nationale du Rhône, from Engie Group, operates 18 run-of-rivers along the Rhône (6 on the upper-Rhône and 12 on the lower). In 2004, CNR has engaged a renewal project of driving and control systems for the six lower-area dams. The article presents the different aims of the project together with the construction and the validation of a new architecture relying a strong experience acquired.
The key features, like the plant or the dam distribution, were modularized and outsourced in order to facilitate maintainability and provide better visibility.
The presentation details the establishment of this architecture for the dams of Brégnier Cordon integrating hydraulic and computer risk management.
About this project, the desired strategy was the control of the deployment time while keeping the capacity to evolve of the control systems. The driver of this project was to build a model of architecture that can serve as reference within CNR.

1. HISTORIQUE DU PROJET

Situés sur le Haut-Rhône, entre Génissiat et Lyon, les aménagements concernés par ce projet sont au nombre de 6.

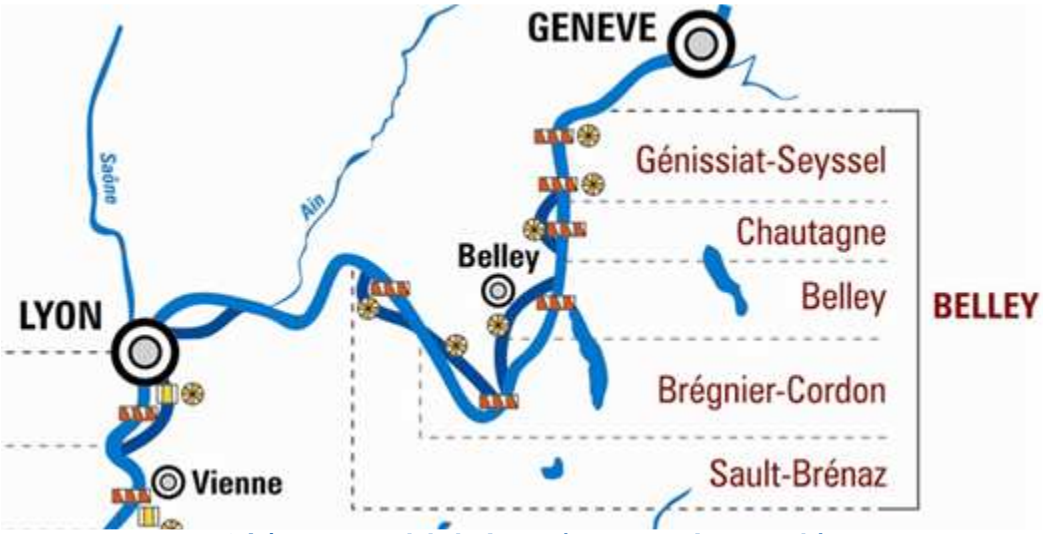


Schéma 1 : *vue globale des aménagements du Haut-Rhône*

Le système de conduite de chacun de ces aménagements pilote l'aménagement en situation normale et en crue dans le respect des consignes validées par la tutelle. Il gère l'ensemble des acquisitions de niveaux et effectue les calculs des débits objectifs et leur répartition sur les différents organes de l'usine et du barrage

1.1 Les objectifs

Le projet de renouvellement de ces systèmes qui a été lancé en Juin 2004 avait pour objectif :

- Le remplacement d'équipements obsolètes
- Une meilleure maintenabilité des équipements et des logiciels de conduite aménagement :
  - Approvisionnement en pièces détachées de plus en plus difficiles.
  - Langage de programmation obsolète
  - Une amélioration des régulations, des équipements et de la consignation d'état.
  - Passage d'un calcul PID (Proportionnel Intégral Dérivé) à un calcul prédictif
- Une gestion centralisée plus efficace de l'ensemble du Rhône et plus de cohérence entre les architectures du Haut-Rhône et du Bas-Rhône
- Une facilitation de la conduite locale par une amélioration des outils et des Interfaces Homme Machine
- Une architecture de référence pour les rénovations futures des autres aménagements de la CNR

Une nouvelle architecture

Cette nouvelle architecture s'appuie sur une modularité de chaque fonction.
Le schéma suivant présente une vue d'ensemble qui permet de mieux fixer les différentes fonctionnalités :

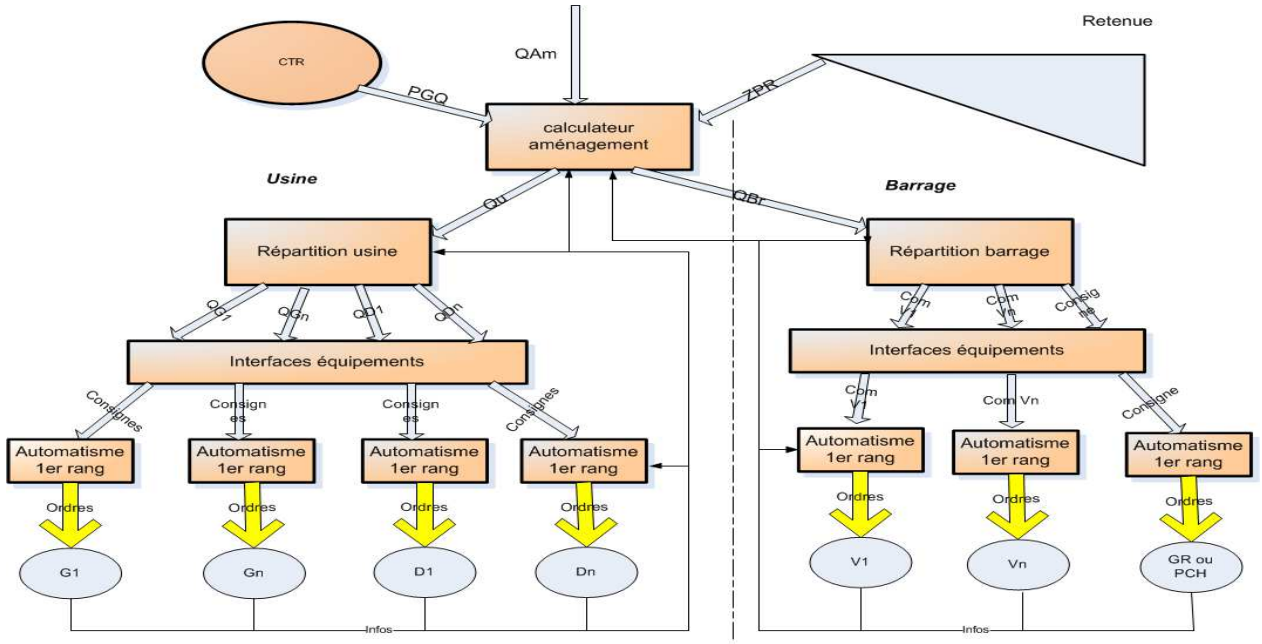


Schéma 1 : l'architecture cible

On retrouve les grandes fonctions avec le calculateur de conduite de l'aménagement avec son module de régulation, la répartition usine et la répartition barrage avec leurs automatismes 1er rang respectifs pouvant s'adapter où non à une éventuelle rénovation future de ces automatismes de 1er rang.

1.3 Principes fonctionnels et organisationnels

Les principes fonctionnels se sont appuyés sur le REX de la rénovation des systèmes de conduite du Bas-Rhône.
Ce renouvellement avait pour principes de reconduire les fonctionnalités existantes. Pour cela, une rétro-ingénierie détaillée des anciens systèmes a été réalisée.

Pour les aménagements de Génissiat et Seyssel, la construction de la nouvelle architecture s'est faite en parallèle de l'ancienne qui a été conservée. Pour ces 2 aménagements, il n'y pas eu de rénovation des 1ers rangs usine et barrage.

Pour les 4 autres aménagements (Chautagne, Belley, Brégnier-Cordon et Sault-Brenaz), la rénovation a été plus complète. Elle intégrait la rénovation du 1er rang usine mais aussi de la CCMB, de la TMS, de l'AS.
La 1ére phase a été de mettre en place la CCMB/TMS et l'AS qui ont été validé de manière unitaire.
La 2nde a été d'intégrer une à une les différents « briques » de la nouvelle architecture. On commence par les automates 1er rang (automates de commande groupe, automates de permutation usine et barrage) puis les automates de 2ème rang (Automates de répartition usine et barrage et les automates services généraux usine et barrage) et au final, on met en place le calculateur de conduite avec son module de régulation. A ce moment là, ancienne et nouvelle architecture cohabitent pour maintenir la réversibilité vers l'ancien calculateur de conduite.
La 3ème et dernière phase est celle de la dépose de l'ancienne architecture et le basculement définitif vers la nouvelle.
On voit ci-après l'état initial (ancienne architecture).

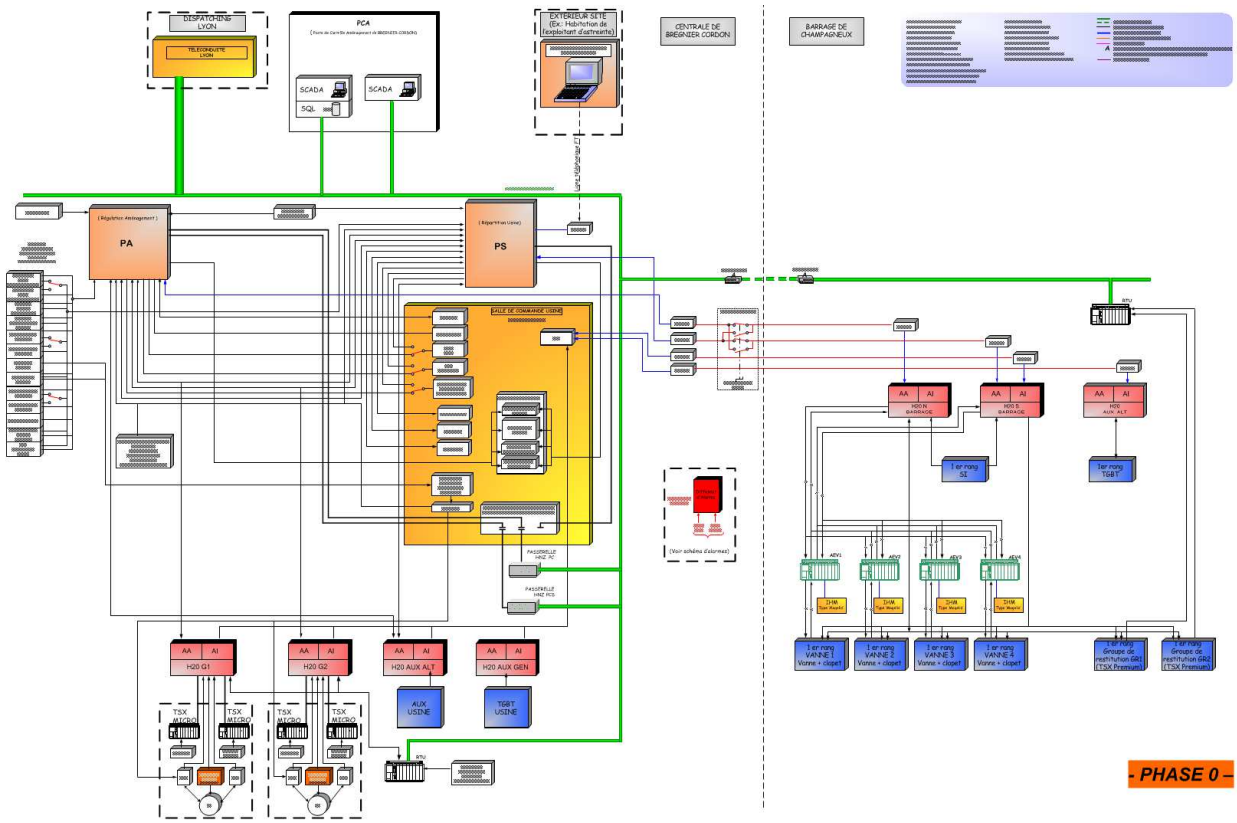


Schéma 2 : Etat initial (ancienne architecture)

On voit ci-dessous l'état final (nouvelle architecture).

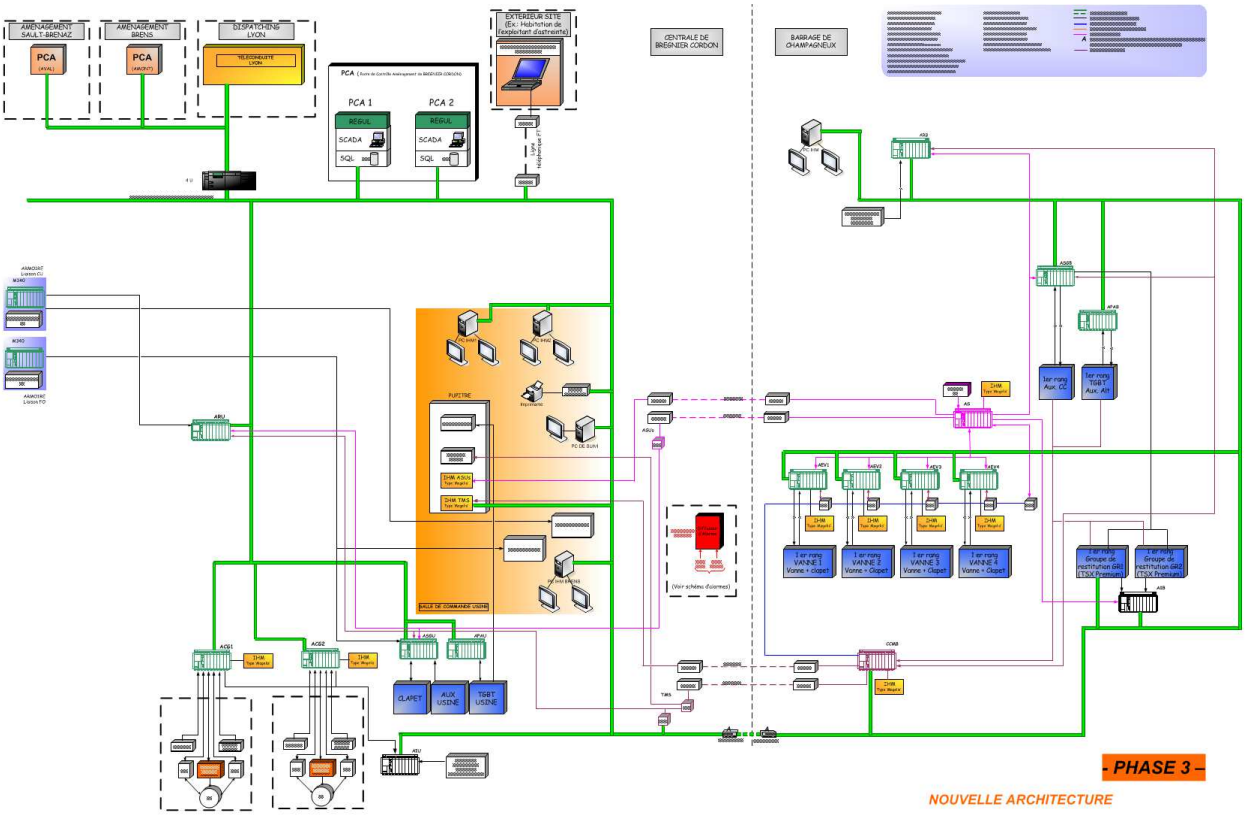


Schéma 3 : Etat final (nouvelle architecture)

On peut voir que cette nouvelle architecture s'appuie pour les échanges entre les différents équipements sur le réseau IP (En vert sur le schéma).

1.4 Organisation et planning

Durant toutes les phases du projet, les échanges entre tous les acteurs se sont fait via :

- Un Comité de Pilotage
- Un Comité opérationnel
- Des réunions de suivi de chantier
- Des réunions de validation des documents de spécifications, cahiers de tests, de la documentation utilisateurs

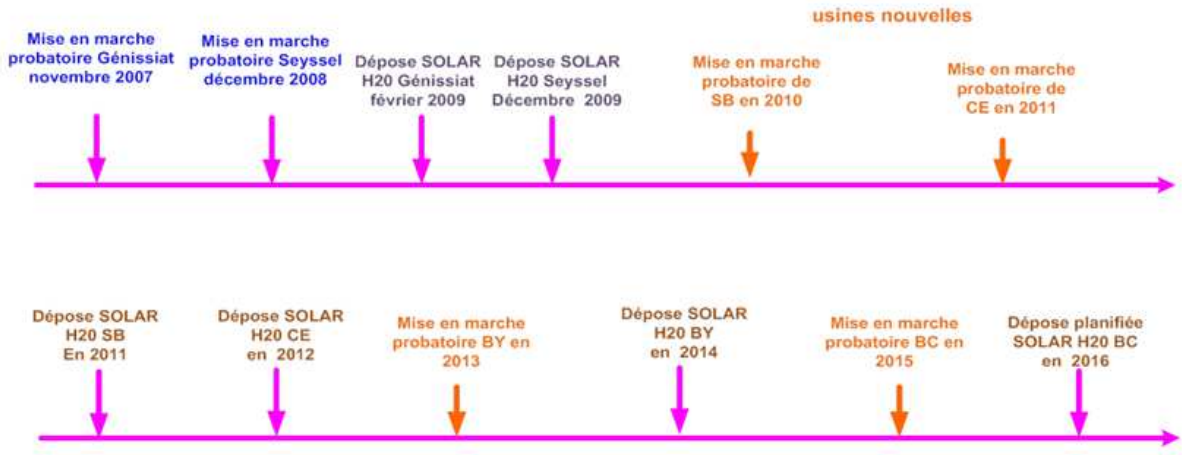


Schéma 4 : chronologie de déploiement de la nouvelle architecture

2. APPLICATION SUR BREGNIER-CORDON

Ce paragraphe détaille le déploiement sur le dernier aménagement, Brégnier-Cordon, en précisant les phases de qualification plateforme et site réalisées permettant la gestion des risques d'une telle opération.

Les travaux ont débuté en juillet 2013 et se sont fait en plusieurs étapes.

2.1 Installation des nouveaux automates

Les nouveaux automates mis en place sont les suivants :

- L'ASGU : Automate Service Généraux Usine
- L'ARU : Automate de Répartition Usine
- L'APAU : Automate de Permutation Usine
- Les 2 ACGs : Automate de Commande Groupe
- L'ASGB : Automate Service Généraux Barrage
- L'ARB : Automate de Répartition Barrage
- L'APAB : Automate de Permutation Barrage

Ils sont installés et mis en service de manière progressive.
Tous les automates communiquent avec le calculateur de conduite via une carte spécifique W315S qui utilise le protocole IEC104. Cette carte a été développée et mise au point en collaboration avec Schneider spécialement pour le projet. La contrainte forte était d'avoir une carte capable d'horodater à la source les données remontées vers le calculateur de conduite pour avoir une consignation chronologiquement cohérente.
Par exemple, les travaux de l'ACG2 ont débuté en juillet 2014 par la rénovation électrique du 1er rang. En parallèle, il y a eu le développement et la validation unitaire sur plateforme du programme automate. De décembre 2014 à février 2015 se sont déroulés les essais de qualification sur site. Le cahier d'essais déroulé détaillait chacun des essais (état initial, action à réaliser, résultat attendu) et surtout il faisait apparaitre les différents risques associés.

2.2 Les essais plateforme de la nouvelle architecture

Le but de la plateforme globale, est l'intégration de l'ensemble des équipements qui seront mis sur l'aménagement de Bregnier Cordon pour être au plus proche de la cible.

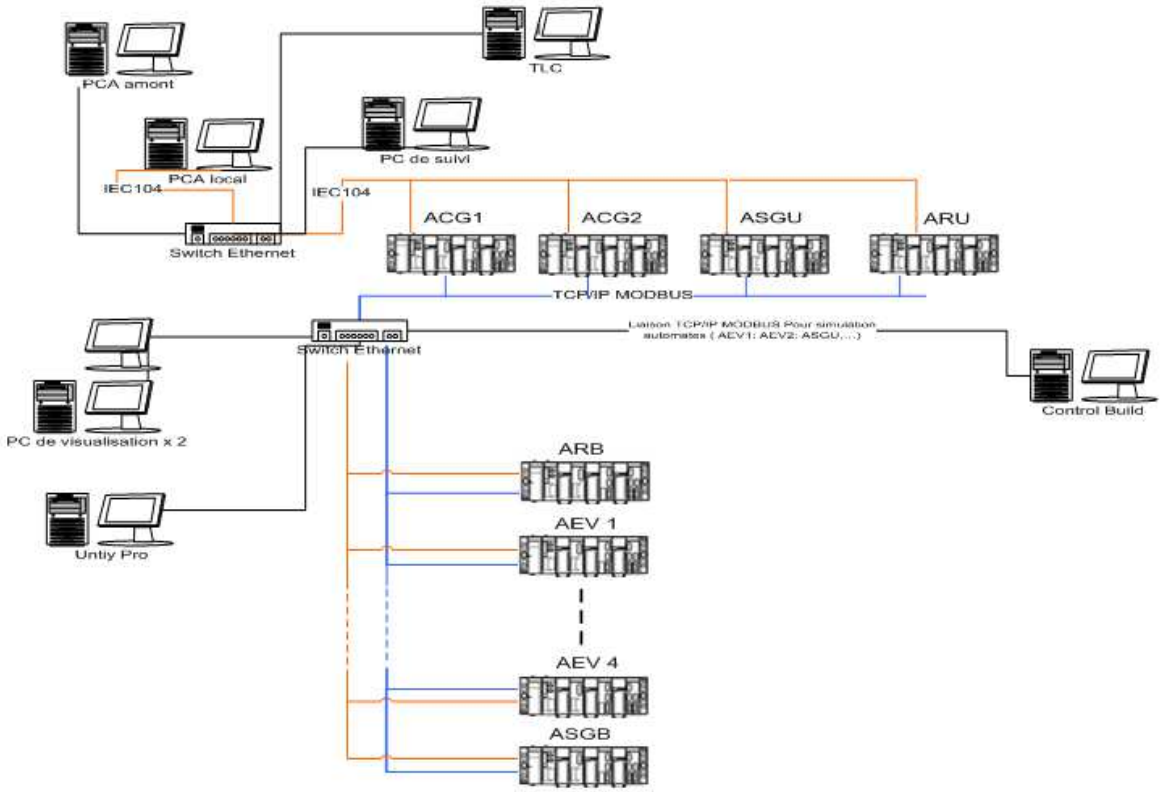


Schéma 5 : visualisation de la plateforme de validation

2.3 Les essais sites de la nouvelle architecture

Cela débute par la mise en place du nouveau calculateur de conduite qui comprend le module de régulation et toutes les IHMs de visualisation et de commande. Ces essais se sont déroulés de mars à avril 2015. Chaque semaine, le planning des essais était envoyé avec les risques associés afin de prendre toutes les dispositions de sûreté et de sécurité nécessaires et utiles.
A l'issue de cette validation, la marche probatoire est prononcée. Elle se fait sous la forme d'un PV de réception de la MOA dans lequel on trouve les réserves non bloquantes, les engagement de correction pendant la phase probatoire ainsi que sa durée. Pendant cette période, c'est l'équipe projet qui prend en compte tous les correctifs et/ou évolutions.
Le maintien en parallèle de l'ancienne architecture permet à tout moment de revenir sur celle-ci.

2.4 Dépose de l'ancienne architecture

A la fin de la marche probatoire, la dépose de l'ancien système de conduite peut être lancée. Elle sera effective pour Brégnier-Cordon début 2016. En amont, une étude de dépose et une analyse des risques sont réalisées. Elle est validée par le comité de pilotage du projet.
Lorsque celle-ci est terminée, les essais de non régression sont réalisés et la marche définitive est prononcée. Elle se fait sous la forme d'un PV de réception de la MOA dans lequel on trouve les réserves non bloquantes.

2.5 Gestion des risques hydrauliques

Lors de toutes les phases d'essais sites, les risques hydrauliques sont identifiés. Par exemple, pour les essais de l'architecture finale, on établit une liste générique des risques hydrauliques. On associe à chacun des essais les risques appropriés afin de mettre en place tous les moyens nécessaires (humains, organisationnels, préventifs).

2.6 Le retour d'expérience

L'aménagement de Brégnier-Cordon a été le dernier à être déployé. Il a donc pu bénéficier de toutes les évolutions et/ou des améliorations des mises en service sur les aménagements précédents.
Un IHM supplémentaires pour la gestion de Crue a été ajouté afin de facilité la conduite. Cette amélioration avait été demandée lors du déploiement de l'aménagement précédent qu'était Belley.
Sur les aspects sécurité, un filtrage des adresses IP sur les automates a été mis en place. Cette évolution est venue renforcer la politique de sécurité informatique de la CNR.

3. CONCLUSION

Le projet de renouvellement des systèmes conduite et du contrôle commande fait suite à celle du Bas-Rhône. L'expérience acquise a été un point majeur dans la réussite du projet. Elle a permis d'établir la stratégie de rénovation afin de maitriser la durée du projet. De fait, le choix a été de rénover les 1ers rangs usine de 4 usines sur les 6 et de ne pas rénover les 1ers rangs barrage. Cette nouvelle architecture permet une intégration relativement simple des futures rénovations. Pour exemple, le 1er rang de l'usine de Seyssel a été lancé cette année. La validation fonctionnelle de la conduite des 6 aménagements à haut débit a pu être réalisée lors de la Crue du début du mois de mai 2015.
Cette architecture a été reprise pour la rénovation complète de l'aménagement d'Avignon qui est en cours. La maitrise et la connaissance de cette architecture cible en fait une architecture de référence au sein de la CNR.

ARCHITECTURE DE CONTROLE-COMMANDE DES VANNES SEGMENT

Control architecture - Segment valves control

Gilles MARCONNET, Denis REILHAC
Compagnie Nationale du Rhône – 2 rue André Bonin – 69 316 Lyon Cedex 04
g.marconnet@cnr.tm.fr, d.reilhac@cnr.tm.fr
Téléphone : +33 (0) 472 006 969, Fax : +33 (0) 472 006 666

MOTS CLÉS

Automatisme de vanne, automate, relayage, chaine de sécurité, donneurs d'ordres, commande locale, commande distante, conduite automatique, conduite manuelle, marche dégradée, interface homme-machine, alimentations, codeurs, fin de course, instrumentation.

RÉSUMÉ

La Compagnie Nationale du Rhône du groupe Engie, exploite une vingtaine de barrages vannés dont la mise en exploitation a été réalisée entre 1949 et 1987. La CNR a engagé un programme de renouvellement des contrôles-commande de ces barrages basé sur des automatismes programmables en substitution des relayages d'origine. L'article présente l'architecture de commande retenue pour les barrages dotés de vannes segments, permettant d'assurer une commandabilité optimale et en toute sécurité. La présentation distingue les différents donneurs d'ordre (automatiques et manuels ; locaux et distants) et détaille les choix fonctionnels réalisés pour répondre aux exigences de sûreté hydraulique et de maintenabilité. Elle se base particulièrement sur les automatismes de 1er rangs vannes récemment installés sur l'aménagement d'Avignon.
Les grands principes retenus reposent sur une séparation des fonctions de contrôle-commande assurées principalement par un automate programmable, des fonctions de sécurités réalisées par des relais spécifiques. On identifie trois modes de commande, Distant, Local et Maintenance gérés par l'automate et un mode de commande Dégradé permettant de manœuvrer la vanne hors automate, au travers d'un relayage rustique. La chaine de sécurité fonctionne à manque de tension, elle agît directement sur le contacteur général en cas de détection d'un défaut et nécessite un réarmement local pour rendre la commande de la vanne opérationnelle. L'ensemble de l'automatisme est alimenté en 24Vcc, créé depuis le 400Vca de puissance de la vanne et depuis les ateliers d'énergie 48Vcc du barrage.

ABSTRACT

Compagnie Nationale du Rhône of Engie Group, operates some twenty run-of-rivers dams commissioned between 1949 and 1987. CNR has engaged a renewal program-control of the dams based on programmable automation in substitution of the original relay systems. The article presents the control architecture used for dams equipped with segment valves, ensuring optimum controllability and safely. The presentation distinguishes various orders (automatic and manual; local and remote) and details the choices executed to match the requirements of hydropower safety and maintainability. It is based particularly on automation of first-tier, valves installed recently on the management site of Avignon.
The main principles adopted are based on a separation of orders-control functions performed primarily by a PLC, and functions of security performed by specific relay. It identifies three control modes, Remote, Local and Maintenance managed by the automation and a Degarded control mode to maneuver the valves without PLC through a rustic relay. The safety chain works under voltage, it acts directly on the main contactor in case of a fault detection and requires a local reset to rendering the valves-control operational. The entire automation is powered by 24VDC, created from 400Vac power of the valve and from 48Vdc dam's power supplies.

1. OBJET

Hormis les sites particuliers de Génissiat (évacuateurs de surface et vannes de fond), de Seyssel (hausses) et de Savières (clapets), le parc de la CNR est composé de 77 vannes de type « segment » (dont certaines équipées de volets), réparties sur 14 barrages et 24 vannes de type « wagon », réparties sur 4 barrages. La construction de ces ouvrages s'est déroulée entre 1949 et 1987. Les automatismes de commande de ces vannes ont à l'origine tous été conçus sur une base de technologie à relais.

Une première série de rénovations, commencée aux débuts des années 80, jusqu'au milieu des années 90, a permis de rénover les automatismes de vannes de Génissiat, Seyssel, Pierre-Bénite (VW), Logis-Neuf (VW) et Montélimar (VW), en conservant le même palier technologique.

C'est au début des années 2000 que la Compagnie Nationale du Rhône a choisi une solution à base d'automates programmables, pour remplacer les automatismes de vannes de Beauchastel (VW), Donzère-Mondragon (VS), Caderousse (VS) et Vallabrègues (VS).

Le retour d'expérience sur ce choix technologique étant très satisfaisant, la CNR a décidé, dans le cadre de la poursuite de son plan de rénovation de contrôle commande de vannes, de conserver cette base d'automate, tout en apportant des évolutions en termes de sureté : fonctions de contrôle commande et de sécurité séparées matériellement, notion d'indisponibilité de la vanne liée au donneur d'ordres, interchangeabilité des codeurs de positions de la vanne.

Cette nouvelle architecture décrite ci-après est opérationnelle sur le barrage de Villeneuve (VS), en cours de déploiement à Sauveterre (VS) et à venir à Bourg les Valence (VS). Les automatismes propres aux vannes wagon ayant tous été rénovés plus ou moins récemment, la réflexion s'est portée prioritairement sur les vannes segment. Une déclinaison sera faite pour tous les types de vannes.

Nota : VW = Vanne Wagon et VS = Vanne Segment

2. FONCTIONNEMENT MECANIQUE D'UNE VANNE SEGMENT AVEC VOLET

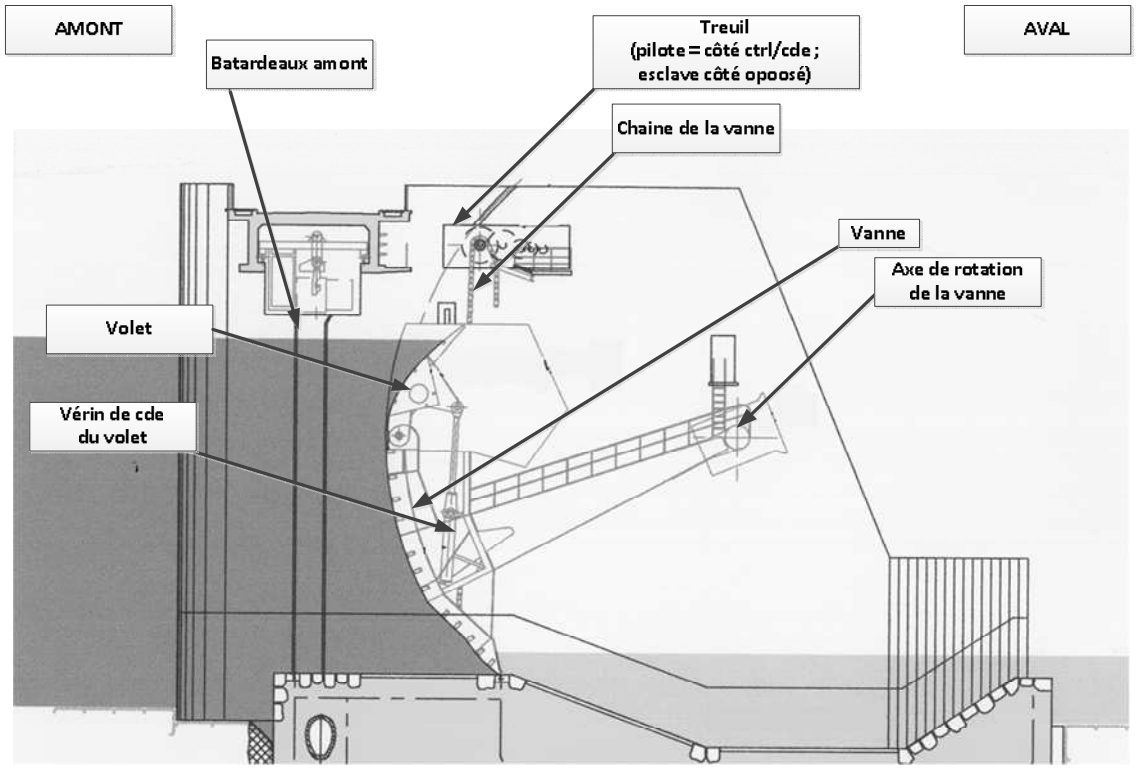


Schéma 1 : vue en coupe d'une vanne segment avec volet

L'ensemble vanne et volet est communément appelé « passe ». La vanne est manœuvrée (sens descente ou montée) par deux chaînes situées de part et d'autre de la passe. Chaque chaine est mue par la force d'un moteur électrique, démultipliée par un treuil.

La course totale de la vanne est fractionnée en « pas de vanne », des capteurs de fin de course signalent l'ouverture complète et la fermeture complète de la vanne. Sur les vannes Segment, un pas de vanne correspond à une amplitude d'environ 20 cm ; on dénombre environ 65 pas sur une course complète de la vanne. La position de la vanne est déterminée à l'aide de codeurs absolus, situés sur les treuils.

Le volet est manœuvré (sens descente ou montée) par un vérin, commandé par une centrale hydraulique. Sa position est déterminée par des codeurs situés dans un coffret embarqué sur le corps de la vanne relié par un ensemble de pignons.

3. SPECIFICATION D'UN AUTOMATISME DE VANNE

Une vanne est commandable électriquement depuis plusieurs endroits et selon différents modes de fonctionnements, allant d'une commande totalement automatisée à des commandes très rustiques.

3.1 Modes de commande de la vanne

Un dispositif de commutation permet de choisir entre les quatre modes de commande de la vanne.

3.1.1 Mode de commande Distant

Le mode de commande Distant est possible uniquement si l'Automate de Commande de la Vanne (l'ACV) est opérationnel. L'ACV centralise les demandes d'ouverture ou de fermeture de la vanne (ou du volet), venant de tous les donneurs d'ordres distants. Il autorise les commandes, contrôle les manœuvres et informe en permanence l'opérateur sur l'état et la position des organes. Le mode Distant implique la notion de double ordre (préparation + validation) de façon à se protéger des ordres intempestifs. On identifie trois modes possibles de commandes à distance.

Conduite Automatique par le calculateur de l'aménagement :
Les vannes des barrage sont placées sous la commande d'un automatisme de conduite qui, en cas de crue sur le Rhône ou de déclenchement des groupes à l'usine, est à même de faire transiter le débit par les volets ou par les vannes, selon le débit à évacuer.

Conduite Manuelle depuis TMS et CCMB :
En cas de perte ou de dysfonctionnement de la conduite automatique, ou sur action volontaire, l'opérateur peut reprendre à tout moment la conduite du barrage en manuel. Cette commande manuelle à distance peut s'opérer depuis un pupitre implanté à l'usine (Télécommande Manuelle de Secours) ou depuis la salle de commande du barrage (Commande Centralisée Manuelle Barrage).

Commande par l'AS :
Sur détection d'un niveau anormalement haut ou bas, à l'amont du barrage, signifiant que ni la conduite automatique, ni la conduite manuelle ne sont suffisamment opérantes, un automatisme de surveillance (Automate de Sauvegarde), prend la main sur l'aménagement, alerte l'exploitant et ouvre le barrage.

3.1.2 Mode de commande Local

Le mode de commande Local est possible uniquement si l'ACV est opérationnel. L'ACV traite les demandes locales d'ouverture ou de fermeture de la vanne (ou du volet). L'ACV autorise les commandes, contrôle les manœuvres et informe en permanence l'opérateur sur l'état et la position des organes.

3.1.3 Mode de commande Maintenance

Le mode de commande Maintenance est possible uniquement si l'ACV est opérationnel. Dans le mode maintenance, l'opérateur peut réaliser des manœuvres particulières, telles que le rétablissement de la vanne après une défaillance, la commande séparée des treuils, l'essai de montée ou descente sans fractionnement, la

réinitialisation de la position codeurs vannes et volets. Le mode maintenance peut également permettre d'effectuer des manœuvres à l'aide d'un boîtier de commandes déportées, toujours placées sous le contrôle de l'ACV.

3.1.4 Mode de commande Dégradé

Les vannes barrages sont considérées comme des organes très sensibles au vu de la sureté hydraulique et doivent rester manœuvrables même en cas de défaillance de l'ACV. L'opérateur peut reprendre à tout moment la commande de la vanne en manuel, hors automate. Cette commande est possible depuis une IHM simplifiée et un relayage qui permet de manœuvrer directement les vannes et les volets sous le contrôle de l'exploitant et des sécurités ultimes.

3.2 Schéma de l'architecture de conduite

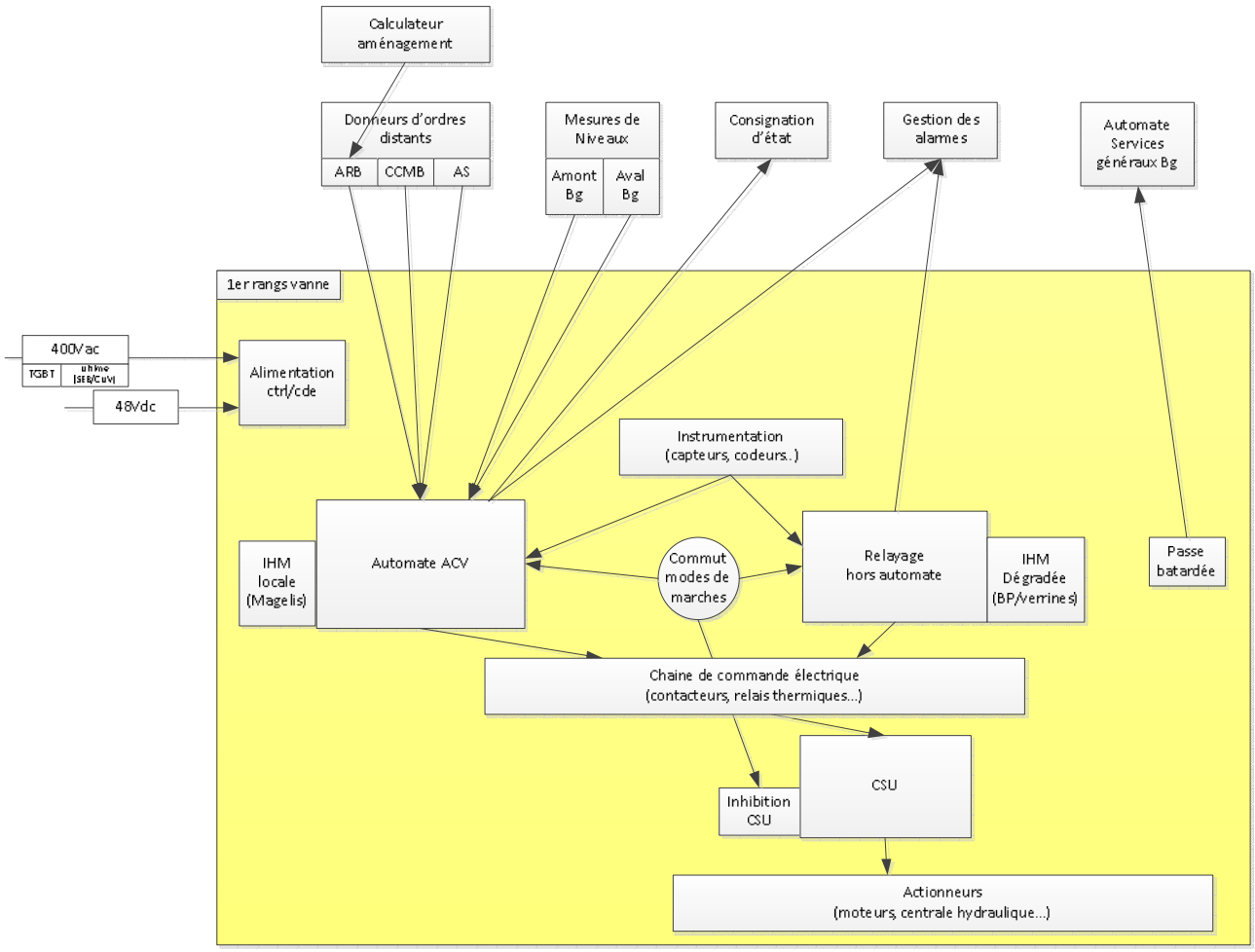


Schéma 2 : architecture de conduite

3.3 Armoire d'automatisme

Le point commun de ces modes de fonctionnements est l'armoire d'automatisme qui embarque toute l'intelligence permettant de commander la vanne, mais aussi d'en visualiser les états, les positions et les défauts. On identifie une seule armoire par passe. Pour des raisons de sureté hydraulique et pour éviter des points communs entre elles, ces armoires d'automatisme sont implantées dans chacune des piles du barrage, au plus près de la vanne et du volet.

3.4 Automate de Commande Vanne (ACV)

L'ACV, installé dans l'armoire d'automatisme, réalise toutes les fonctions de premier rang, permettant la manœuvre de la vanne et du volet, dans des conditions optimum d'utilisation, soit :

- L'acquisition et la gestion des ordres venant de la voie automatique, de la voie manuelle distante, de l'Automate de Sauvegarde ou des commandes Locale et Maintenance.
- Le contrôle de la disponibilité de la vanne et du volet, par donneurs d'ordres.
- L'inter-verrouillage logiciel entre les différents donneurs d'ordres selon leurs priorités.
- L'envoi des ordres de manœuvre sur les contacteurs de puissance de la vanne ou du volet.
- Le contrôle de la bonne exécution de l'ordre (état des contacteurs de puissance).
- L'acquisition et le contrôle des états de la vanne et du volet (fins de course, BP et commutateurs, états des contacteurs de puissance, défauts, etc…).
- L'acquisition et le contrôle des codeurs de position de la vanne et du volet.
- La gestion de la signalisation locale des défauts sur l'IHM tactile.
- L'envoi des informations au SCADA pour la consignation d'états.
- Le recalage des treuils.
- La reprise de fuites des volets et le comptage.
- Le graissage des réducteurs.
- L'acquisition et le traitement des mesures de niveaux Amont et Aval barrage.
- Le calcul du débit.
- La gestion des défauts et l'élaboration des alarmes.
- L'interface avec l'ASGB.

3.5 Relayage hors Automate

En cas de perte de l'ACV, un relayage permet de manœuvrer la vanne et le volet en mode de fonctionnement dégradé uniquement. Ce relayage agît sur la chaine de commande électrique en parallèle de l'ACV.

Ce fonctionnement tout en restant rustique, reste très sécuritaire car placé sous le contrôle du fractionnement de pas et de la chaine de sécurité ultime.

3.6 Chaine de Sécurité Ultime

Une Chaîne de Sécurité Ultime », indépendante de l'ACV, vérifie l'absence de défauts jugés primordiaux pour la vanne, pouvant entraîner des dommages aux personnes ou aux matériels.

Toute défaillance détectée par la chaîne de sécurité « ultime » entraîne l'arrêt de sécurité du système (arrêt d'urgence), avec coupure logicielle de la commande par l'automate, coupure de la polarité des sorties de l'automate liées aux actionneurs, et coupure électrique de la puissance de la vanne et du volet. Une intervention de l'exploitant est alors nécessaire pour réactiver la chaine de sécurité et rétablir le 400V d'alimentation de la vanne. Il n'existe pas de défauts spécifiques pour le volet, néanmoins lors de l'activation de la chaine de sécurité, la force motrice du volet est également coupée.

On identifie pour la vanne les défauts ultimes suivants :

- Le défaut de « Surcourse » de la chaîne, correspondant à une position trop haute ou trop basse de la vanne : ce défaut est détecté par un capteur fixé au niveau de la Noix Galle et activé par deux bossages situés sur une des deux chaines.
- Les défauts de « Surcharge » des deux treuils, correspondant à un blocage de la vanne dans le sens de l'ouverture : ces défauts sont détectés par deux capteurs installés sur les arbres des moteurs des treuils.
- Les défauts de « Souscharge » des deux treuils ou « mou de chaîne », correspondant à un blocage de la vanne dans le sens de la fermeture : ces défauts sont détectés par deux capteurs installés sur les arbres des moteurs des treuils.
- Les défauts « Maillon raidi » correspondant au grippage d'un maillon de chaine : ces défauts sont détectés par des capteurs installés sur les guides chaines.
- Le défaut « d'Horizontalité », pouvant entraîner un blocage mécanique de la vanne : le dispositif de contrôle de l'horizontalité calcule la différence entre deux mesures de positions, données par un codeur installé sur chaque treuil.
- Le défaut « Temps trop long de manœuvre » : des relais surveillent la présence tension au plus près des moteurs de treuils pour surveiller la durée de manœuvre d'un pas.
- Les « Arrêts d'urgence » répartis de part et d'autres des organes de la vanne et du volet : détection manuelle et volontaire de l'opérateur.

3.7 Chaine de commande électrique

La chaine de commande électrique comprend les contacteurs, disjoncteurs magnétiques et thermiques et éventuellement des variateurs ou des démarreurs. La chaîne de commande acquiert les ordres de marche et d'arrêt issus de l'ACV ou de l'IHM du mode dégradé et les transmets vers les actionneurs. Elle est interrompue par la chaîne de sécurité ultime (CSU), en cas de détection d'une défaillance grave. Ce sous-ensemble verrouille les ordres en fonction du mode en ou hors ACV.

3.8 Interface Homme-Machine

Une interface de dialogue avec l'automatisme, implantée en face avant de l'armoire, permet à l'opérateur de choisir le mode de fonctionnement de la vanne et du volet, de pouvoir les commander localement et d'en visualiser tous les états, positions et défauts nécessaires. Cette IHM est composée des éléments décrits ci-après.

3.8.1 IHM commun à tous les modes de fonctionnement

Cette IHM faite permet de configurer la passe dans le mode souhaité et de passer des commandes communes à tous ces modes.

Les données mises à disposition de l'opérateur sont les suivantes :
- Le mode de fonctionnement en cours (distant, local, maintenance, dégradé).
- Les défauts ultimes de la vanne.
- L'affichage des positions « brutes » de la vanne et du volet (points codeurs).
- L'affichage des positions des treuils RD et RG (maquettes, disques, réglettes, etc.).
- Les présences tensions 400V force motrice et 24V de commande.
- L'écart d'horizontalité (points codeurs).
- Les défauts de communications de l'ACV avec les équipements informatisés,
- La signalisation de la position ouverte de l'électrovanne de secours (permettant l'ouverture gravitaire du volet).
- La signalisation vanne arrêtée sur pas.

Les choix et commandes possibles par l'opérateur sont les suivants :
- Le choix du mode de commandabilité de la passe au travers d'un commutateur à quatre positions, permettant de basculer en modes Distant, Local, Maintenance ou Dégradé.
- Le passage d'une passe en position batardée (inhibition du débit au vu du calculateur).
- Les Boutons Poussoirs de réarmement des relais de la chaine CSU et d'acquit des défauts.
- Les Arrêts d'Urgence qui permettent de stopper la manœuvre de la vanne et du volet et ce, quel que soit le mode de fonctionnement.

3.8.2 IHM informatisé

C'est une IHM tactile raccordée directement à l'ACV.

Les données mises à disposition en mode Distant, Local et Maintenance sont les suivantes :
- Le mode de fonctionnement en cours (distant, local, maintenance ou dégradé),
- La position de la vanne (en points codeur, en altitude NGF ou en débit),
- La position du volet (en points codeur, en altitude NGF ou en débit),
- Le débit de la vanne et du volet,
- L'écart d'horizontalité,
- Les états de fonctionnement de la vanne et du volet (arrêt, mouvement en cours),
- Les états de défauts de la vanne et du volet,
- Les états de la chaîne de sécurité de la vanne (CSU),
- Les états et défauts de contrôle interne de l'ACV,
- Les compteurs et informations liés à la maintenance,
- L'archivage des défauts et évènements.

Les commandes possibles par l'opérateur en mode Local sont les suivants :
- Les ordres d'ouverture ou de fermeture de la vanne et du volet et leurs validations (notion de doubles ordres),
- Les ordres d'arrêt de la vanne et du volet.

Les commandes possibles par l'opérateur en mode Maintenance sont les suivants :

- Les mêmes actions qu'en commande Local,
- Les commandes individuelles de chaque actionneurs (treuils et pompes graissage),
- Le déroulement de scénarios établis lors de la conception (test surcourse, horizontalité, temps trop long, surpression, remise à zéro des codeurs, etc.),
- Les modifications de certains paramètres.

3.8.3 IHM informatisée déportée

Cette IHM est accessible uniquement en mode Maintenance. C'est une IHM tactile raccordée si besoin sur des prises déportées de l'ACV qui permet une commande à vue des organes de la vanne et du volet. Son utilisation nécessite préalablement l'action sur un commutateur qui interdit les commandes depuis l'IHM principale. Les données mises à disposition et les commandes possibles sont les mêmes que celles de l'IHM informatisée principale.

3.8.4 IHM rustique

Cette IHM est accessible en mode Dégradé uniquement et est constituée de boutons uniquement.

Les commandes possibles par l'opérateur en mode Dégradé sont les suivants :

- Les ordres d'ouverture ou de fermeture de la vanne et du volet (sans notion de doubles ordres),
- Les ordres d'arrêt de la vanne et du volet.

Concernant la vanne, le mouvement est initié par l'exploitant qui appuie sur le bouton poussoir (Ouverture ou Fermeture) jusqu'à l'échappement de la came de fractionnement. Le mouvement est ensuite auto-maintenu jusqu'à la prochaine atteinte de la came de pas ou jusqu'au fin de course haut ou bas. Les commandes du volet sont possibles depuis la centrale hydraulique. L'ouverture et l'arrêt peuvent aussi s'effectuer par l'électrovanne de secours.

3.9 Instrumentation Vanne/Volet

3.9.1 Codeurs vanne/volet

Les codeurs sont installés au plus près de l'arbre primaire (pour la vanne) et de l'axe de rotation (pour le volet) et permettent de rapatrier la position de la vanne et du volet vers l'automatisme de premier rang.

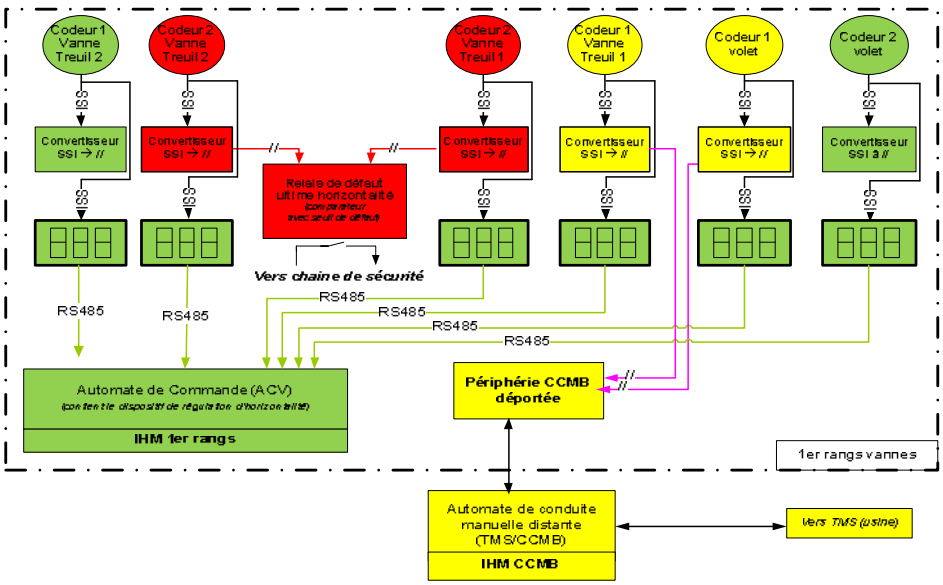


Schéma 3 : Principes d'architecture des codeurs

Chaine d'acquisition codeur

On identifie quatre chaines d'acquisition codeur pour une vanne et deux chaines pour le volet.

Chaque chaine est identique. Afin de faciliter la maintenance par les exploitants, les codeurs sont interchangeables entre eux et ne sont pas paramétrables par logiciel.

Un convertisseur SSI → sorties parallèles permet la conversion dans un format compatible avec la CCMB et avec le contrôleur d'horizontalité de sécurité.

Un afficheur permet le contrôle de la valeur brute du codeur et la conversion en RS485 pour l'automate. L'afficheur diffuse l'horloge sur la liaison SSI pour le codeur et le convertisseur, ce qui rend chaque mesure indépendante de la disponibilité de l'automate (élimination d'un mode commun).

Réception en RS485 « Point à Point » par l'ACV, une boite fonctionnelle standard permet l'acquisition des mesures par le logiciel.

3.9.2 Capteurs divers de la vanne

Fin de course de fractionnement
Ce fin de course est un capteur de position TOR qui permet de fractionner le mouvement de la vanne, en ouverture ou fermeture et ainsi de se protéger contre une manœuvre intempestive et totale. Un nouvel ordre de montée ou de descente est nécessaire pour poursuivre une manœuvre de la vanne.

Fin de course Haut
La détection de la position haute, autorise un arrêt complet de la vanne dans le sens de l'ouverture et déclare la vanne ouverte à 100%. Cette position interdit une demande d'ouverture de la vanne.

Fin de course Bas
La détection de la position basse, autorise un arrêt complet de la vanne dans le sens de la fermeture et déclare la vanne fermée à 100%. Cette position interdit une demande de fermeture de la vanne.

Surcourse Haut
Ce capteur signale une position anormalement haute de la vanne, au-delà de sa course exploitable qui pourrait présenter un danger de détérioration du matériel en cas de poursuite d'un mouvement d'ouverture. L'atteinte de cette position constitue un défaut ultime.

Surcourse Bas
Ce capteur signale une position anormalement basse de la vanne, au-delà de sa course exploitable qui pourrait présenter un danger de détérioration du matériel en cas de poursuite d'un mouvement de fermeture. L'atteinte de cette position constitue un défaut ultime.

Contrôleur d'effort
Un capteur de contrainte associé à un conditionneur de signal transmet la mesure d'effort à l'automate, et signale une charge anormalement élevée ou faible sur dépassement de seuil.

- Surcharge treuils : un blocage de la vanne lors d'une manœuvre d'ouverture est détecté par une charge anormalement élevée sur le treuil.
- Sous-charge treuils ou mou de chaîne : un mou de chaîne peut être provoqué par un blocage de la vanne lors d'une manœuvre de fermeture. Ce mou de chaine est détecté par une baisse anormale de la charge sur le treuil.

Inhibition du mou de chaine
Préalablement à sa fermeture totale, la vanne peut présenter un défaut Mou de chaine, dit « normal ». Ce défaut est alors inhibé par l'action de ce capteur.

Protection guide chaine / maillon raidi
Un maillon raidi peut provoquer un « dérapage » de la chaîne sur le pignon de la noix galle, ou endommager le guide chaine. L'activation de ce capteur constitue un défaut ultime.

Graissage réducteur
Une pompe de graissage des chaines injecte un lubrifiant sur les pignons du treuil. Un capteur de pression ou de niveau signale une anomalie de graissage.

Position frein
Des électro freins sont actionnés par manque tension à l'arrêt des moteurs des treuils. Leurs positions sont ramenées grâce à des capteurs.

Manivelle en service
Un capteur de position détecte le débrayage de la transmission lors de l'utilisation de la commande « hors énergie » (manivelle sur le treuil).

Butons vanne sortis
Des capteurs de positions détectent la rentrée des béquilles de la vanne (deux béquilles par vanne).

3.9.3 Capteurs divers du volet

Circuit hydraulique, Pression établie, Surpression, Fin de course haut, Rupture flexible
Ces informations sont données par différents capteurs de seuils de pression implantés sur la centrale hydraulique.

Niveau d'huile
Un niveau d'huile trop bas est contrôlé dans le bac de la centrale.

Fin de course haut / fin de course bas / reprise de fuite
Trois interrupteurs sont réglés sur des cames dans le coffret codeur.

Temps trop long
Un relais temporisé de sécurité surveille le retour de position du distributeur.

3.10 Actionneurs Vanne/Volet

3.10.1 Moteurs de la vanne

Deux moteurs électriques alimentés en 400VCA permettent, au travers d'un système de démultiplication, de manœuvrer les deux chaînes (sens montée ou descente) situées de part et d'autre de la passe.

3.10.2 Centrale hydraulique du volet

Le volet est manœuvré (sens descente ou montée) par un vérin, commandé par une centrale hydraulique.

3.11 Alimentations électriques

3.11.1 Circuit de puissance

Sources d'alimentations
Le régime de l'alimentation électrique du circuit de puissance est IT. Le circuit de puissance est normalement alimenté par une source 400VCA essentielle prise directement sur le TGBT du barrage (un départ par passe). En cas de perte de l'alimentation normale, la passe est alimentée au travers d'un circuit de secours totalement redondant (hors TGBT).

Circuit de puissance de la vanne
Il est constitué d'un interrupteur de puissance, d'un contacteur général qui s'ouvre sur détection d'un défaut de sécurité ultime, d'un double contacteur inverseur d'ouverture et de fermeture, de deux disjoncteurs magnéto-thermiques, assurant la protection des moteurs de treuils et de deux contacteurs de treuils d'ouverture et de fermeture.

Circuit de puissance du volet
Il est constitué d'un disjoncteur magnéto-thermique, assurant la protection du moteur de la centrale hydraulique et d'un contacteur de démarrage et d'arrêt de la centrale.

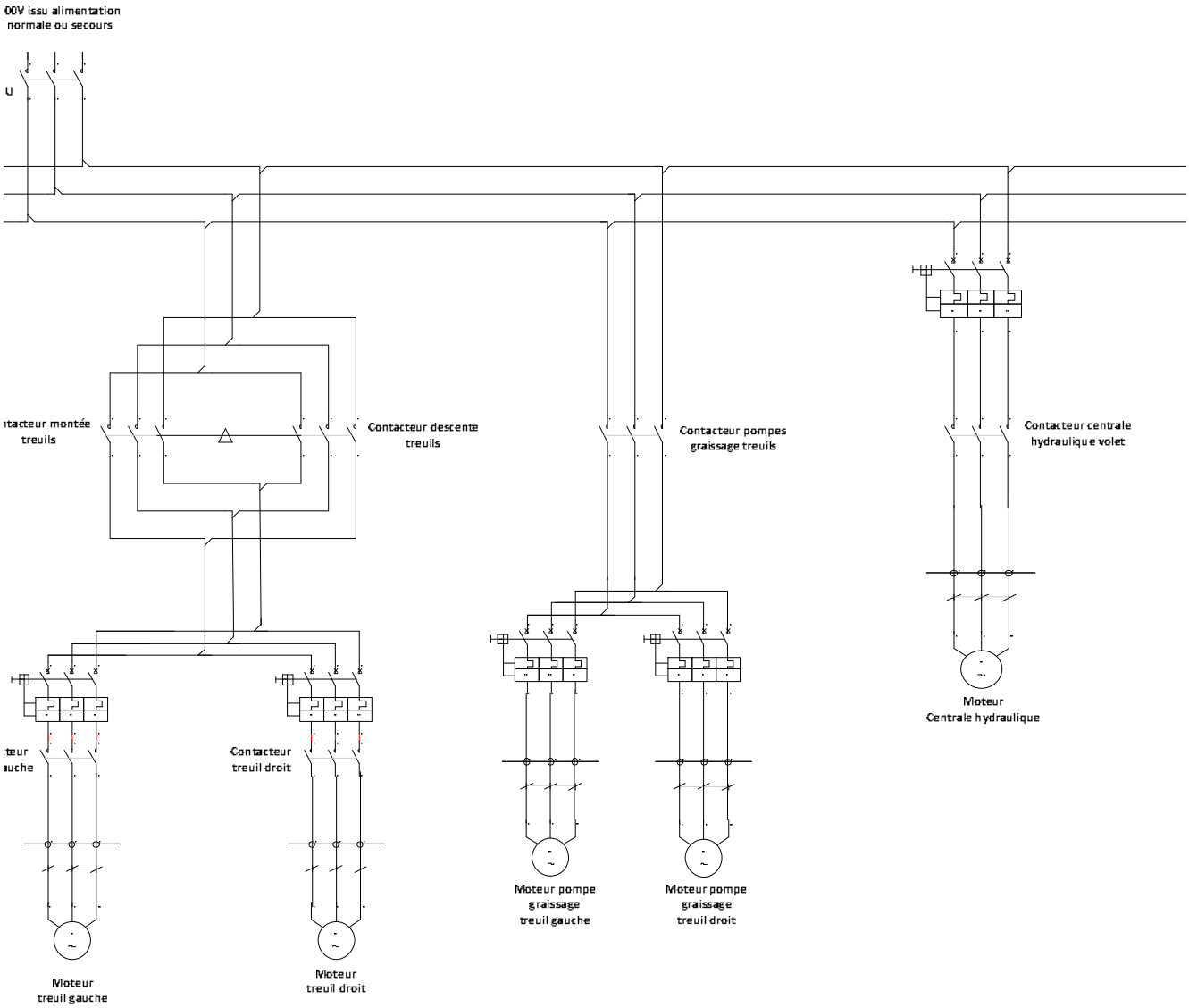


Schéma 4 : *Schéma de puissance de la passe*

Nota : Le schéma peut être modifié selon la configuration des aménagements (moteurs frein ou pompes de graissage électriques dans certains barrages).

3.11.2 Circuit de commande 24V continu

Le régime de l'alimentation électrique du circuit de commande est TN. Les préconisations imposent que le contrôle-commande d'une vanne soit dépendant de la seule source nécessaire à la manœuvre de la vanne (notion d'autocontrôle). La polarité 24V continu est donc créée depuis le circuit 400Vca d'alimentation de la vanne. Elle est de plus renforcée par l'alimentation 48Vcc BB1/BB2 du barrage, au travers d'un module de couplage à diodes, permettant de maintenir l'automatisme en état, même lors d'une permutation de sources.

Un dispositif de surveillance permet de s'assurer que la redondance des circuits de couplages est totalement opérationnelle. Afin de lisser les courants de démarrage et garantir une bonne sélectivité des alimentations, l'utilisation de « disjoncteurs électroniques » réglables est préconisée pour la distribution du 24Vcc.

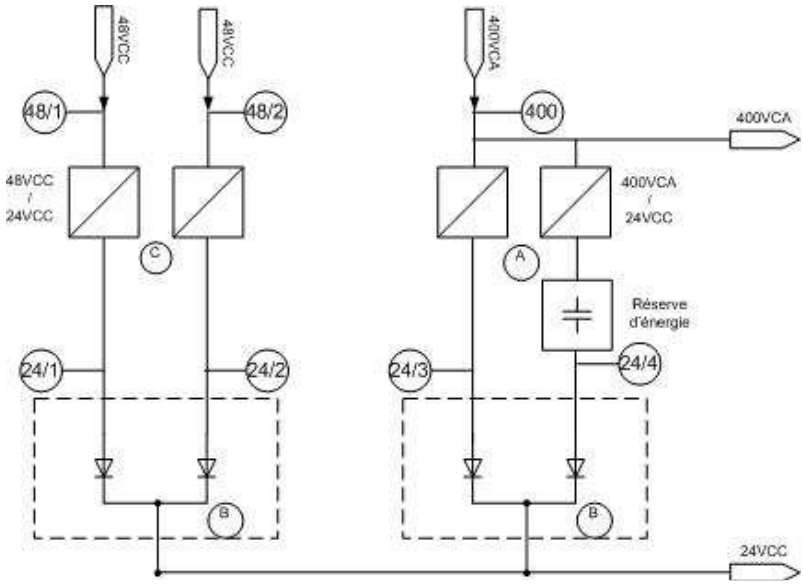


Schéma 5 : *Schéma d'alimentation du circuit de commande*

Nota : la redondance du convertisseur 400Vca/24Vcc est optionnelle. Par ailleurs, de par la fiabilisation créée par le 400Vca, le référentiel CNR n'impose qu'une seule arrivée 48cc venant d'un seul atelier d'énergie du barrage.

4. INTERFACE AVEC LES AUTRES EQUIPEMENTS

4.1 Donneurs d'Ordres Distants

4.1.1 Conduite Automatique par le Calculateur de l'aménagement

Le calculateur transmet une consigne de débit du barrage à un Automate de Répartition Barrage (ARB), lequel répartit ce débit sur les différentes vannes, en envoyant des ordres de manœuvres aux différents ACV. Un protocole de double ordre est utilisé pour les commandes de manœuvre.

Données échangées avec l'ARB

- Sens ARB vers ACV :
  - *Les ordres d'ouverture et de fermeture de la vanne et du volet et leurs validations,*
  - *Les ordre d'arrêt de la vanne (uniquement si marche en débit réservé),*
  - *Les ordres d'arrêt du volet.*
- Sens ACV vers ARB :
  - *Un message de prise en compte des ordres,*
  - *La position codeur des vannes et des volets,*
  - *Le débit de la vanne et du volet calculé dans l'automate,*
  - *La disponibilité de la vanne et du volet.*

L'interface entre la conduite automatique et les ACV est de type réseau informatique, basé sur le protocole MODBUS / TCP. L'ACV s'interface au réseau par l'intermédiaire d'une carte de communication et d'une baie informatique, implantée au barrage.

4.1.2 Commande Manuelle par TMS/CCMB

Pour la vanne, l'exploitant initie depuis la TMS ou la CCMB un mouvement d'ouverture ou de fermeture jusqu'au pas de vanne suivant ou jusqu'au capteur de fins de course. Un protocole de double ordre est utilisé pour les commandes de manœuvre. L'arrêt est géré par le premier rang.
Concernant le volet, l'exploitant à la possibilité de procéder à des ouvertures, des fermetures et des arrêts de manœuvre avec le même protocole de double ordre.

Données échangées avec la CCMB/TMS

- Sens CCMB/TMS vers ACV :
  - *Information CCMB/TMS active,*
  - *Les ordres d'ouverture ou de fermeture de la vanne et du volet et leurs validations,*
  - *Les ordres d'arrêt du volet.*
- Sens ACV vers CCMB/TMS :
  - *La position de la vanne et du volet,*
  - *L'information vanne ou volet en cours de manœuvre,*
  - *L'information vanne ou volet indisponible (en défaut ou hors position Distant),*
  - *L'information passe en commande locale,*
  - *L'information passe batardée.*

Du point de vue du premier rang, aucune différence n'est faite entre un ordre issu de la TMS ou de la CCMB (schéma en Y). Cette dernière est la seule interfacée avec le premier rang. Les échanges entre la CCMB et le premier rang se font de façon filaire.

4.1.3 Commande Automatique par Automate de sauvegarde

Sur détection d'un niveau anormalement Haut, l'AS alerte, interdit les ordres venant des autres automatismes pouvant aggraver la situation et ouvre le barrage en agissant prioritairement sur l'ensemble des volets du barrage, puis, si le niveau haut est maintenu, sur l'ensemble des vannes.
Sur détection d'un niveau anormalement Bas, l'AS alerte et interdit les ordres venant des autres automatismes pouvant aggraver la situation. En aucun cas l'AS ne ferme le barrage.

La voie AS n'est opérante qu'en mode DISTANT, sous le contrôle de l'ACV. Seul, l'électrovanne de secours du volet peut être commandée directement. Un protocole de double ordre est utilisé pour les commandes de manœuvre.

Données échangées avec l'AS

- Sens AS vers ACV :
  - *Le verrouillage des autres donneurs d'ordres,*
  - *Les ordres d'ouverture ou de fermeture de la vanne et du volet et leurs validations.*

L'ouverture du volet peut s'effectuer par la voie normale ou par action sur l'électrovanne de secours.

- Sens ACV vers AS :
  - *Les informations vanne fermée et volet ouvert à 100%,*
  - *Les informations vanne ou volet en cours de manœuvre,*
  - *Les informations vanne ou volet indisponible (en défaut ou hors position Distant),*
  - *L'information passe en commande locale,*
  - *L'information passe batardée.*

Les échanges entre l'AS et la passe sont effectuées par voie filaire exclusivement.

4.1.4 Inter-verrouillage et Priorisation des donneurs d'ordres

Un inter-verrouillage des ordres est réalisé entre les donneurs d'ordres eux-mêmes, mais aussi au niveau de l'ACV. La priorisation (du moins au plus prioritaire) se fait de la façon suivante : conduite automatique distante, commande manuelle distante, commande par l'AS et commande locale.

4.2 Consignation d'Etats

Les états et les défauts de la vanne sont consignés au niveau du SCADA de l'aménagement. Ces informations sont datées à la source dans l'ACV, à l'apparition et à la disparition. L'ACV reçoit pour cela des trames horaires depuis le SCADA et des tops de synchronisation depuis une horloge dédiée.

L'interface entre le consignateur d'état et les ACV est de type réseau informatique, basé sur le protocole IEC104. L'ACV s'interface au réseau par l'intermédiaire d'une carte de communication et d'une baie informatique, implantée au barrage. La distribution du signal depuis le SCADA vers l'ACV utilise le réseau de conduite.

Le SCADA surveille la liaison avec l'ACV. Le défaut ACV (chien de garde) est lui surveillé et consigné par l'ASGB.

4.3 Gestion des Alarmes

Les alarmes sont destinées à prévenir l'exploitant, à tout moment, d'une situation particulière ou d'une défaillance sur l'ensemble de l'aménagement. Elles sont constituées, d'un regroupement de défauts classés par degré d'urgence, définissant le type d'intervention à prévoir. On identifie par ordre croissant de gravité : les alarmes D (Différée), les alarmes N (Normale) et les alarmes U (Urgente).
Ces alarmes issues des automatismes des vannes sont élaborées et transmises aux systèmes d'appel de l'astreinte par deux voies distinctes fonctionnant en parallèle : une voie filaire dite Normale, activée par trois sorties impulsionnelles, issues de l'ACV et une voie réseau dite Secours, activée par trois sorties impulsionnelles, venant du SCADA.

4.4 Mesures de Niveaux Amont-Aval Barrage

Les mesures de niveaux Amont et Aval barrage sont utiles à l'ACV pour le calcul du débit de la passe. L'acquisition des niveaux par l'ACV est redondée, au travers du réseau informatique avec une voie venant de l'ASGB et une voie venant de l'ARB.

4.5 Passe Batardée

Cette information, générée par un commutateur manuel, signifie que la passe est batardée et que, quel que soit la position de la vanne ou du volet, le débit de la passe n'est plus à prendre en compte.
Cette information est traitée de façon à rester active, même si la passe est consignée électriquement.

5. CONCLUSIONS

Les vannes des barrages sont identifiées à la CNR comme faisant partie des organes les plus sensibles, en termes de sureté hydraulique. Les contrôles commandes de ces vannes font donc l'objet d'une attention très particulière et doivent atteindre un niveau de sécurité optimal. Depuis le début des rénovations on peut identifier trois grands paliers techniques qui ont tous permis des évolutions notables dans le domaine de la sureté.

5.1 Principales évolutions mises en place au fil des rénovations

Les évolutions directement liées à la commission SEB :

- La sécurisation des alimentations de puissance, par la création d'une boucle d'alimentation 400VCA redondante,
- Le fractionnement par pas, permettant de se prémunir du risque de pleine ouverture ou fermeture de la vanne,
- Le double ordre de commande, permettant d'éviter l'émission d'ordres intempestifs,
- La notion de défauts ultimes venant agir directement sur le disjoncteur de puissance.

Les évolutions dites technologiques avec l'arrivée des automates de vannes :

- Le contrôle permanent sur la disponibilité de l'automatisme de la vanne (même à l'état de veille),
- L'encadrement logiciel des défauts ultimes, permettant d'anticiper l'atteinte réelle du défaut et d'alerter l'exploitant très en amont,
- Le développement de la consignation d'état et des outils d'analyse et d'aide au dépannage (supervision),
- La sécurisation des voies d'alarmes et d'appel de l'astreinte en cas de défauts,
- La sécurisation de l'alimentation des contrôles commandes, par la création d'un 48V issu de batteries, mis en parallèle avec l'alimentation d'origine prise en autocontrôle de la puissance,
- La création d'une commande manuelle centralisée des vannes implantée au barrage,
- La fiabilisation des chaînes d'acquisition des positions codeurs de la vanne (notion de codeur pour la voie automatique et de codeur pour la voie manuelle).

Les évolutions liées au retour d'expérience des rénovations faites dans les années 1990 et 2000 :

- La création d'une chaîne de sécurité, faite en dehors du contrôle commande qui reste active dans tous les modes de fonctionnements. Tous les défauts ultimes composants cette chaîne peuvent être désactivés, mais de façon très contrôlée.
- La prise en compte du donneur d'ordres dans la notion d'indisponibilité d'une vanne. Exemple : un défaut codeur rend la vanne indisponible au vu de la conduite automatique, tout en la laissant opérationnelle au vu de l'Automate de Sauvegarde.
- Le doublement des chaînes d'acquisition des positions codeurs de la vanne et l'uniformisation du paramétrage de ces codeurs, permettant à l'exploitant une interchangeabilité facile et sans outil informatique de dialogue.

5.2 Suite des rénovations

L'aménagement de Bourg les Valence, composé de ses deux barrages Rhône et Isère sera le prochain site rénové à partir de 2016, puis viendront les ouvrages de Péage-de-Roussillon et Saint-Vallier.

Les remplacements de ces contrôles commandes de vannes vont s'opérer sur le palier technique mis en place dans le cadre de la rénovation faite à Avignon. Le REX sur ce dernier site ayant toutefois fait ressortir quelques difficultés pour l'exploitant à rentrer dans certains modes de fonctionnement, une vigilance particulière sera apportée sur l'ergonomie et la simplification des commandes par l'opérateur, notamment dans les modes les plus dégradés.

DISPOSITIF DE « CRANTAGE » DES COMMANDES DES VANNES D'EVACUATEURS DE CRUES

"Stepwise" limitation system for spillway gates' control

David FAURIEL, Emmanuel FRANCOIS
EDF-CIH, Savoie Technolac 73373 Le BOURGET DU LAC Cedex
david.fauriel@edf.fr, emmanuel.francois@edf.fr

MOTS CLÉS

Evacuateur de crues, sécurité de manœuvre, vanne charpentée, cran, palier, sélecteur, fin de course, automatisme, contrôle commande

RÉSUMÉ

Dispositif de « crantage » des commandes des vannes d'évacuateurs de crues
Les vannes des évacuateurs de crues des aménagements hydroélectriques d'EDF sont équipées de dispositifs de limitation de manœuvres par crans, appelés systèmes de « crantage », dont le rôle est d'empêcher l'ouverture brutale des vannes dans le cas d'un ordre anormalement prolongé (en ouverture principalement), et ce, que la commande soit manuelle ou automatique. L'extrême variété des vannes et des systèmes de manœuvre, couplée à une organisation décentralisée de l'ingénierie par le passé, ont conduit à une très grande diversité des dispositifs de crantage aujourd'hui en place sur le parc hydroélectrique d'EDF. Une étude a été engagée, basée sur un large inventaire, avec pour double objectif d'homogénéiser la conception de ces systèmes et de résoudre les problèmes d'obsolescence de certains matériels, tout en maintenant des exigences fortes de robustesse et de fiabilité. Des principes génériques ont pu être dégagés pour les fonctions principales, à savoir la prise de mouvement, la détection et le traitement des crans, ainsi que pour le choix des matériels. Un nombre réduit de solutions est proposé, permettant de répondre à tous les cas de figure. En conclusion, cet article ouvre également vers des perspectives d'évolution technologique, basées sur des capteurs de mesure continue de la position des vannes, associés à des modules de sécurité.

ABSTRACT

« Stepwise » system for spillway gates' control
Spillway gates installed on EDF hydroelectric facilities are fitted with independent « stepwise » limitation systems, that ensure a step-by-step control of the gates. The main purpose of these systems is to prevent any sudden and abrupt motion of the gates, in case of any abnormal and maintained order (mainly opening) from the operator or from the automatic control system.

Spillway gates installed on EDF hydroelectric facilities are fitted with independent "stepwise" limitation systems that ensure step-by-step gate control. Their main purpose is to prevent sudden or abrupt gate motion in the event of an abnormally prolonged order (mainly opening) being received from the operator or the automatic control system. Owing to the great variety of gates and control systems, combined with past practices of decentralising engineering, EDF hydroelectric facilities are currently equipped with a very wide range of stepwise limitation systems. A study based on many different cases has been initiated with the dual purpose of standardising the design of these systems and solving problems of obsolescence in some equipment, while maintaining stringent requirements regarding robustness and reliability. Some general principles have emerged for the main functions, namely the drive system, "step" detection and processing, and for the choice of equipment. A limited number of solutions are put forward to address all the different cases encountered. In conclusion, this article also opens up new prospects for technological progress, based on continuous gate position measurement sensors, used in conjunction with safety modules.

1. INTRODUCTION – CONTEXTE ET OUVRAGES CONCERNES

Les vannes des évacuateurs de crues des aménagements hydroélectriques d'EDF sont équipées de systèmes de commande par crans (ou «paliers ») dont le rôle est d'empêcher l'ouverture totale des vannes à partir d'un ordre unique, que celui-ci soit transmis par l'automatisme ou manuellement. Ils permettent donc de stopper les manœuvres en cas d'ordre permanent ou prolongé pouvant être la conséquence d'une erreur humaine (maintien prolongé d'un ordre), d'une défaillance technique (bouton poussoir bloqué, défaut du câble de liaison, de la télétransmission, de la filerie, du relayage…) ou encore d'un dysfonctionnement de l'automate de commande délivrant un ordre trop long.

Sur un aménagement EDF, toutes les vannes participant à la gestion des crues doivent être équipées de dispositifs de crantage. Ce sont majoritairement des vannes de surface, mais les éventuelles vannes de fond ou de demi-fond participant également à cette fonction peuvent également en être équipées.

Dans le but d'homogénéiser les diverses conceptions de ces dispositifs, EDF a souhaité définir un nombre restreint de conceptions mécaniques et électriques de ces matériels tout en prenant en compte la diversité des situations rencontrées tant pour les vannes que pour leurs organes de manœuvre.

Actuellement, ces crans sont issus d'un système électromécanique à base de fins de course, totalement indépendants des autres automatismes et lié le plus directement possible au mouvement de la vanne. Ces systèmes sont souvent intégrés dans la chaîne cinématique du mécanisme de manœuvre. Ils sont aussi parfois liés directement au tablier de la vanne.

2. LES DIVERS TYPES DE VANNES ET DE MECANISMES DE MANŒUVRE

2.1 Les vannes

Les vannes charpentées équipant les évacuateurs de crues peuvent être à manœuvre levante-abaissante pour les vannes plates (glissières, Wagon, Stoney, à chenilles, sous carter), ou à manœuvre oscillante pour les des vannes radiales (segment) et les clapets.

On rencontre parfois l'association de deux vannes : une vanne supérieure (dite vanne de surface) et une vanne inférieure. La vanne de surface intervient en général en début et en fin de crue pour les débits faibles, ou les débits d'alerte, alors que la vanne inférieure intervient lorsque les débits sont plus importants.

La vanne de surface peut aussi avoir un rôle d'évacuateur de corps flottants, de débit réservé, ou encore de débit d'attrait, selon son implantation dans l'aménagement et les particularités du site.

On rencontre deux configurations possibles pour la vanne de surface :

- une vanne wagon associée à une vanne inférieure de type Stoney (ou une autre vanne wagon). La vanne de surface s'abaisse (à l'amont ou à l'aval immédiat) de la vanne inférieure, et elle roule soit sur des rails séparés fixes, soit directement sur les têtiers de la vanne inférieure.
- un clapet associé à une vanne inférieure de type wagon, Stoney ou segment. Dans ce cas le clapet repose directement sur le sommet de la vanne inférieure.

2.2 Les mécanismes de manœuvre

Parmi les divers mécanismes de manœuvre rencontrés, on identifie principalement :

- Les mécanismes à vérin oléo-hydraulique,
- Les mécanismes à chaînes (type Galle ou autres),
- Les mécanismes utilisant des treuils à câbles,
- Les mécanismes à engrènement par crémaillère(s),
- Les mécanismes à vis-écrou (ou vérin à vis),
- Les mécanismes à vérin électrique.

On rencontre également des mécanismes à contrepoids / flotteur pour lesquels la manœuvre est assurée directement par le niveau de la retenue amont, donc sans aucune énergie extérieure, notamment électrique. Dans ce cas le fonctionnement par crantage n'est pas réalisé car c'est le réglage des ajutages des puits à flotteur qui permet de respecter les exigences de gradient de débit.

3. PRINCIPES GENERAUX

3.1 Le dispositif de crantage

Comme évoqué plus haut, le but d'un dispositif de crantage est d'empêcher l'ouverture totale d'une vanne à partir d'un ordre unique. Ce dispositif contribue donc fortement à la sûreté de l'aménagement, en évitant une montée brutale du débit à l'aval lors de l'ouverture de la vanne. Le dispositif peut parfois être également nécessaire à la fermeture, par exemple sur un barrage mobile d'un aménagement fonctionnant au fil de l'eau (contrainte forte de limitation du niveau amont). La solution la plus simple pour assurer la fonction de crantage est d'exiger un nombre minimum d'ordres pour réaliser l'ouverture totale d'une vanne (ou sa fermeture).
Le dispositif de crantage n'assure aucune protection en cas de rupture de la chaîne cinématique de manœuvre. Il a uniquement pour rôle de pallier une défaillance de l'automatisme de commande.
Il est unique sur une vanne (pas de redondance), même si celle-ci est équipée de deux points de levage (ex 2 chaînes, 2 vérins, 2 crémaillères …).
Il est constitué des éléments suivants :

- une prise de mouvement (rotative ou linéaire) sur le mécanisme de manœuvre ou directement sur la structure de la vanne,
- un réducteur (le plus souvent) ou un multiplicateur (cas d'un axe oscillant), le cas échéant après transformation du mouvement linéaire en rotation,
- un "sélecteur de position", équipé d'un ensemble de cames ou doigts agissant sur des contacts électriques au fur et à mesure des manœuvres de la vanne,
- si besoin, un boîtier de protection mécanique avec bornier de câblage, chauffage...

Il est souhaitable que les systèmes de crantage possèdent des prises de mouvement séparées des autres dispositifs électriques de mesure et de détection (codeurs de position, fins de course ouvert/fermé…). Dans le cas contraire, une attention particulière est à porter sur la robustesse des modes communs.
La valeur d'un cran élémentaire est liée à la valeur maximale de variation de débit admise à l'aval. Une valeur couramment retenue est au maximum de 1/20^{ième} de la capacité d'évacuation de la vanne.

3.2 La prise de mouvement

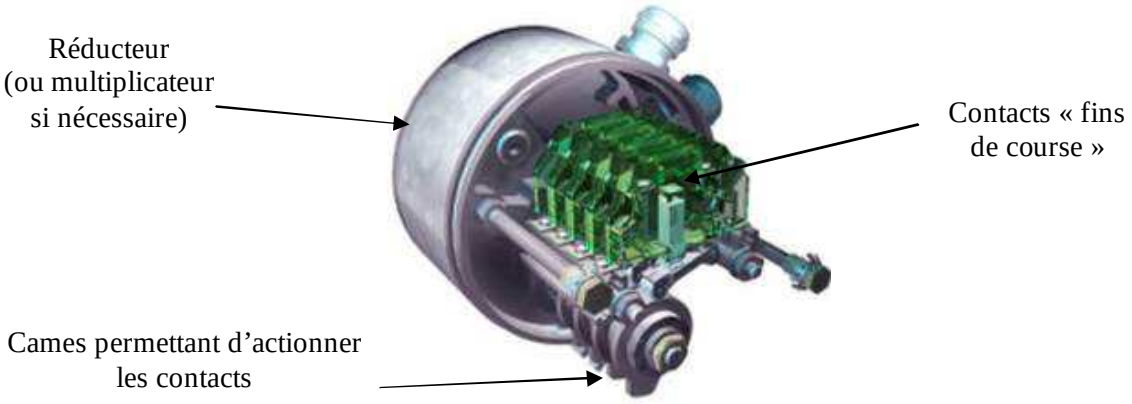
Afin de simplifier le dispositif de détection à base de fins de course, la prise de mouvement doit fournir un mouvement de rotation d'un axe. Il doit être le plus simple et le plus robuste possible. Ce mouvement de rotation, transmis au sélecteur, est produit par un dispositif mécanique entraîné soit directement par la structure de la vanne soit par le système de manœuvre. Un mouvement multi-tours (≥ 20) est à rechercher de préférence. Les prises de mouvement peuvent être classées en 2 familles et 8 groupes :

- Liaisons directes avec la vanne :
  - Une crémaillère entraînant un pignon en rotation,
  - Une chaînette entraînant une couronne dentée,
  - Une câblette s'enroulant autour d'un tambour,
  - Un axe oscillant.
- Liaisons avec le mécanisme de manœuvre :
  - Un axe de sortie spécifique ou adapté dans la chaîne cinématique du treuil (réducteur, renvoi d'angle, ligne d'arbres…),
  - Un axe, un pignon denté intégré dans la chaine cinématique,
  - Un ou plusieurs bossages intégrés sur un axe de la chaîne cinématique,
  - Un système "câblette + tambour" ou "chaîne + pignon denté", intégré ou lié au vérin de manœuvre.

3.4 Sélecteur & réducteur

Un sélecteur de position est un boîtier dans lequel se trouvent une ou plusieurs cames, montées sur un ou plusieurs axes qui actionnent des contacts électriques. Dans le cadre des dispositifs de crantage, ils sont toujours de type rotatif. Les sélecteurs disponibles sur le marché intègrent généralement un réducteur. Plus rarement, le sélecteur peut être associé à un multiplicateur, quand le mouvement à contrôler est de faible amplitude (cas notamment des clapets oscillants ou des vannes radiales). Compte tenu des conditions

d'installation souvent difficiles (humidité, écarts de température…) et de la fiabilité recherchée, le choix du sélecteur revêt une importance particulière. Les produits standards du marché présentent parfois des caractéristiques qui ne sont pas adaptées : grande compacité induisant un réglage difficile, pouvoir de coupure des contacts trop faible, matières plastiques de qualité inégale, dont la tenue au vieillissement n'est pas connue.



Sélecteur « catalogue » classique

Des conceptions historiques sont souvent préférées mais ces produits sont de moins en moins fabriqués, tel le modèle ci-dessous.



Sélecteur « catalogue » historique, obsolète

Plusieurs produits spécifiques ont par ailleurs été développés et mis en œuvre, pour pallier les difficultés rencontrées par des matériels « catalogue » ou pour s'adapter au mieux au besoin. Ces dispositifs sur mesure permettent une conception optimale de la prise de mouvement, du rapport de réduction, des cames et des fins de courses, et offrent de bonnes conditions de réglage. Ils sont également souvent combinés avec d'autres dispositifs tels que des codeurs de position de type optique ou des fins de course pour les positions extrêmes de la vanne.

Sélecteur spécifique intégrant 2 codeurs Gray et un chauffage.

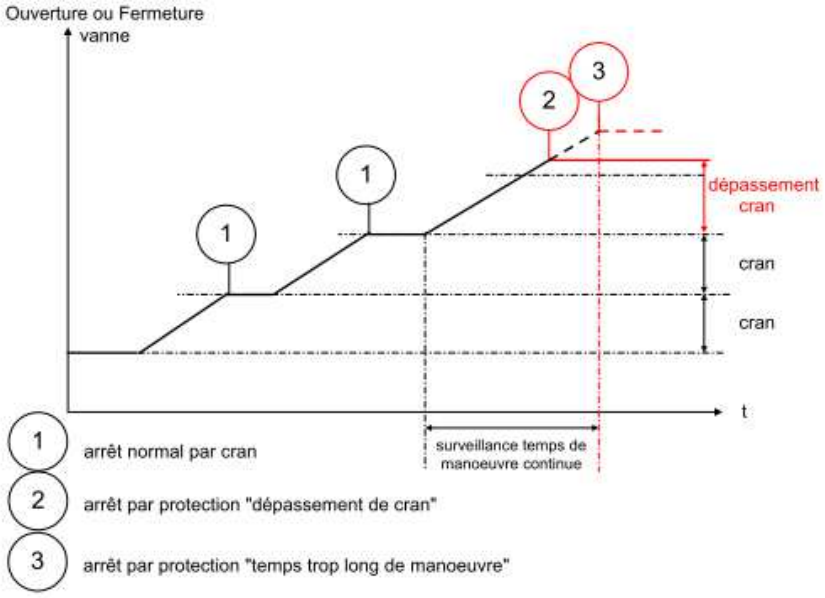


3.5 Automatisme - contrôle commande – 1er rang

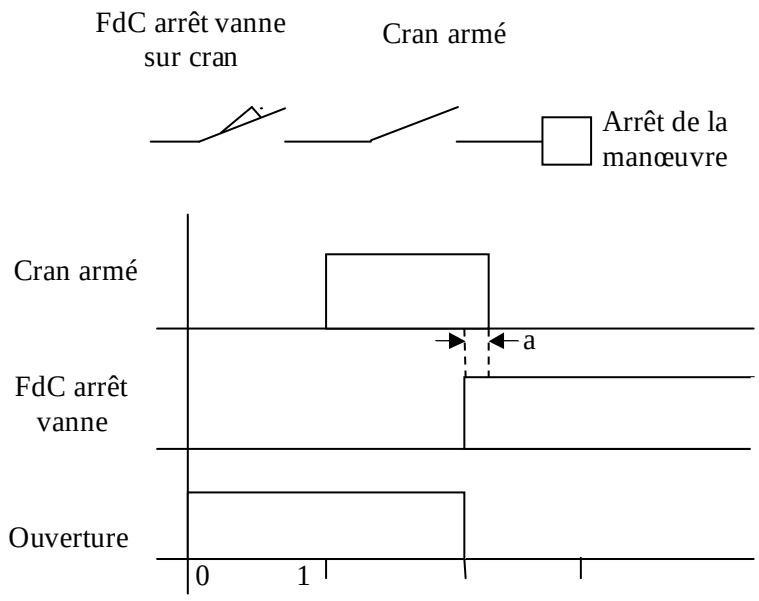
Les schémas électriques et les chronogrammes qui en résultent varient d'un aménagement à l'autre. Les dispositifs mis en œuvre intègrent les fonctions d'armement de cran, de dépassement de cran et de « temps trop long de manœuvre » :

- L'armement de cran a pour action d'activer un relais, qui sera ensuite désactivé lors de l'arrêt sur cran. Si l'armement n'a pas été effectué alors la manœuvre ne s'arrêtera pas lors du passage sur l'arrêt sur cran. La désactivation du relais d'armement permet d'autoriser une nouvelle manœuvre.
- L'arrêt sur cran a pour action d'arrêter la manœuvre en cours. Un nouvel ordre sera alors nécessaire (manuel ou automatique) pour poursuivre la manœuvre.
- Le dépassement de cran a pour action d'arrêter la manœuvre qui aurait déjà due être stoppée par le passage sur l'arrêt sur cran. Un défaut est alors généré, et la manœuvre est bloquée jusqu'à intervention de l'opérateur.
- Le « Temps trop long de manœuvre » est un dispositif à relais temporisé, indépendant du système de crantage, permettant de générer un défaut et de provoquer la coupure de l'énergie du système de commande de la vanne. C'est une sécurité complémentaire au dispositif de crantage.

Les schémas ci-après explicitent ces notions.



Chronogramme de base



À t=0 : la vanne s'ouvre.
À t=1 : le relais « cran armé » est excité.
À t=2 : le fin de course « arrêt vanne » est actionné.
➔ *Les conditions sont réunies pour stopper l'ouverture de la vanne.*
(NB : « a » est le temps qu'il faut au relais d'armement de cran pour se désactiver)

Principe de « l'armement de cran »

Il est à noter que d'une manière générale, la valeur des crans est indépendante du mode de commande opérationnel de la vanne : l'opérateur ou le système automatique peuvent demander l'arrêt de la vanne dans n'importe quelle position, sans tenir compte des crans. Ainsi, lorsque la vanne est initialement positionnée *entre* deux crans, la valeur du premier cran de manœuvre sera différente de celle correspondant à un cran :

- Inférieure à un cran si la vanne était arrêtée avant la position d'armement du cran,
- supérieure à un cran si la vanne était arrêtée entre les positions d'armement et d'arrêt du cran.

4. OBJECTIF D'HOMOGENEISATION

Dans le but d'homogénéiser les diverses conceptions de ces dispositifs de crantage, il est nécessaire de mettre en œuvre un nombre restreint de type de matériels tout en prenant en compte la diversité des situations rencontrées. Les objectifs principaux sont les suivants :

- Retenir la prise de mouvement la mieux adaptée sur la vanne de crues,
- Choisir le type de sélecteurs (« catalogue » ou « sur mesure »),
- Définir le schéma électrique de 1er rang.

Il est alors essentiel d'homogénéiser avant tout la logique de fonctionnement à adopter et de la décliner d'un point de vue fonctionnel sur un schéma électrique unique. Elle devra préciser le nombre de fins de course avec leurs fonctions précises (arrêt sur cran, armement de cran, shuntage de cran, dépassement de cran …), le schéma électrique, ainsi que le chronogramme de fonctionnement.

4.1 Choix de la prise de mouvement

Le choix pour une prise de mouvement doit prendre en compte divers paramètres ainsi que le contexte de chaque situation :

- Adaptation d'une vanne existante ou remplacement à neuf,
- Regroupement ou séparation des prises de mouvements nécessaires pour l'ensemble des dispositifs électriques de mesure et détection (et non pas seulement le crantage),
- Nombre de tours pour une manœuvre totale de la vanne,
- Contraintes de maintenance…

Notre retour d'expérience dans ce domaine nous permet de poser quelques règles de base :

- Pour une vanne plate abaissante (écoulement par dessus), la prise directe de mouvement sur la structure de la vanne est à proscrire.
- Pour une vanne plate levante (écoulement par-dessous), la prise de mouvement sur la structure de la vanne est difficilement envisageable si la course est très importante, d'autant plus si l'actionneur (vérin, treuil…) est situé très au dessus de la structure ou s'il s'agit d'une vanne étanche sous carter.
- Câblettes et chaînettes méritent une protection mécanique efficace.
- Avec un treuil à crémaillère, une roue dentée peut être entraînée simultanément.
- Pour une vanne segment (écoulement par-dessous), la prise de mouvement sur la structure peut s'effectuer efficacement sur les bras notamment du coté d'un tourillon.
- Les vérins avec un angle d'oscillation important peuvent utiliser ce mouvement particulier qui nécessitera toutefois un multiplicateur.

Même si, en théorie, une prise de mouvement effectuée directement sur la structure de la vanne serait préférable, afin d'avoir une image la plus directe possible de la position de la vanne, on constate qu'en pratique, ce principe est souvent difficile à appliquer compte tenu des contraintes de montage et d'environnement (y compris : eau, glace, corps flottants…). Au final, les prises de mouvement les plus fiables sont celles intégrées à la chaîne cinématique du mécanisme de manœuvre : soit sur un axe de sortie spécifique, soit au travers d'un pignon denté.

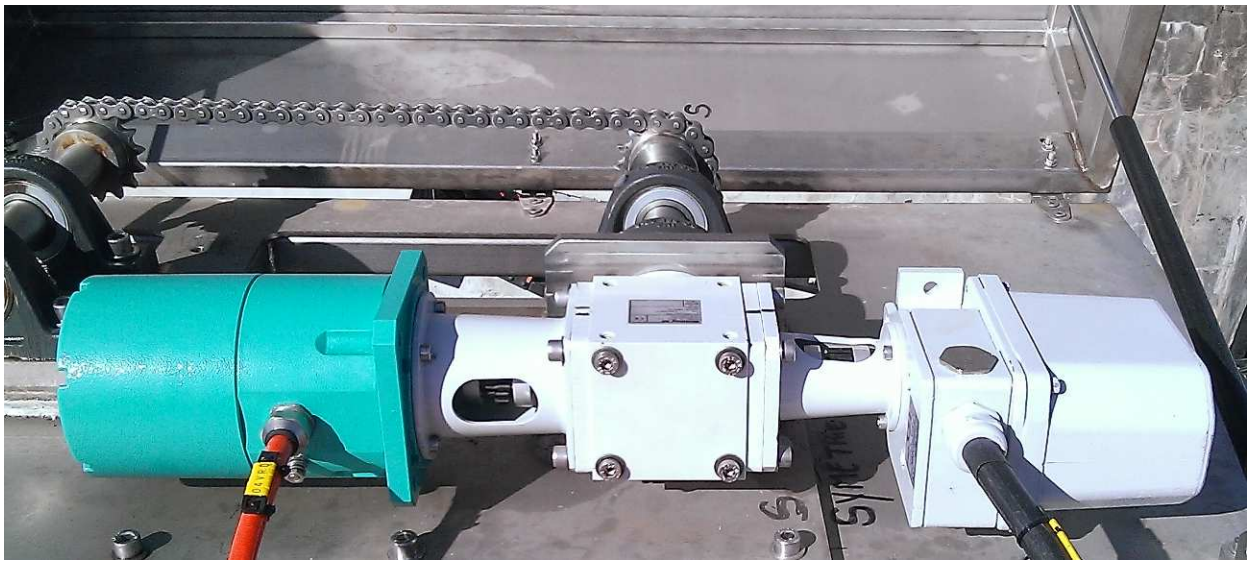
Il est à noter que le fait de réaliser la prise de mouvement sur le mécanisme de manœuvre – et non pas sur la structure de la vanne – n'a pas d'impact sur la capacité du système de crantage à assurer sa fonction de contrôle de la commande. En effet, la chaîne cinématique (et donc la liaison actionneur-vanne) n'étant jamais élastique, les 2 seuls cas où le mouvement de l'actionneur (treuil, vérin…) n'est plus l'image directe du mouvement de la vanne sont : (i) la rupture totale de la liaison ; (ii) le blocage de la vanne lors de la descente, avec une liaison « souple » (câbles, chaînes ou brimbales). Or dans ces 2 cas, le système de crantage devient inutile car la manœuvre est alors soit bloquée, soit non maîtrisée quelle que soit la commande, et d'autres systèmes de protection sont activés (pressions, efforts, positions).

4.2 Choix et montage du sélecteur

Dans de nombreux cas, le mécanisme de manœuvre n'offre pas la possibilité d'un raccordement mécanique direct, sur un arbre existant qui serait déjà adapté au besoin, par défaut (nombre de tours, diamètre, espace libre pour le montage du dispositif de crantage…). Il est donc nécessaire de réaliser une adaptation comportant un accouplement, une réduction du nombre de tours (et/ou parfois une multiplication), ou encore un renvoi d'angle. Dans ces situations, le choix d'un sélecteur de type catalogue, intégré, est recommandé, en veillant à respecter les critères suivants :

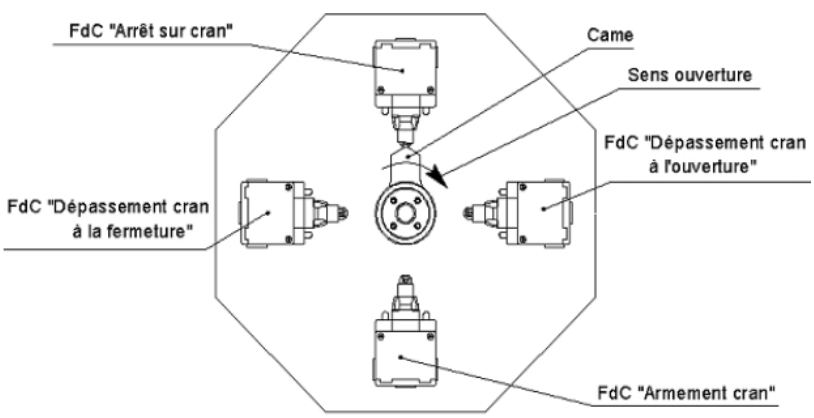
- Boîtier en matériau résistant à l'environnement (typiquement : alliage d'aluminium ou polycarbonate).
- Indice de protection adapté, et chauffage intérieur du boîtier par résistance si besoin.
- Contacts de fin de course à action brusque, avec un pouvoir de coupure adapté. Le dispositif étant à relais électromécaniques industriels, le critère principal est le courant maximum commutable sous charge inductive.
- Pignonerie interne et cames en matériau offrant une bonne résistance à la fatigue et à l'usure.

Une grande attention doit également être portée au montage mécanique (jeux, tensions de chaîne et accouplements souples adaptés…), afin de se prémunir contre tout effort anormal sur des éléments de la chaîne cinématique composant la prise de position (pignons, chaînes, réducteurs/multiplicateurs, crémaillère…). En outre, un capotage est recommandé.



Sélecteur de crantage (à droite), avec multiplicateur intégré délivrant 20 tours sur la course totale

Dans les cas – assez rares – où un arbre répondant directement au besoin est facilement disponible, la solution recommandée est un montage à base de 4 détecteurs de type fins de course mécaniques montés à 90°, actionnés par une came unique, comme sur l'exemple ci-dessous. Ce montage est extrêmement robuste, économique, facile à régler et à maintenir.





Montage à 4 détecteurs : croquis (à gauche) ; installation sur treuil (en cours de montage, à droite)

4.2 Logique de fonctionnement – Schémas électriques – 1er rang

Il est possible de dégager des principes généraux afin de concevoir un schéma standard, basé sur les règles évoquées plus haut :

- Crantage effectif à l'ouverture et à la fermeture
- Fonctionnement : armement de cran, arrêt sur cran, dépassement de cran, temps trop long
- Nombre de contacts standardisé (4)
- Eviter les relais temporisés

On peut remarquer que dans le système présenté ci-dessus, la valeur du (premier) cran peut varier, selon la position initiale de la vanne (came positionnée juste avant ou juste après le détecteur d'armement du cran), d'environ 0,5 à 1,5 tour, voire 1,75 si le détecteur d'arrêt sur cran est défaillant.

5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les dispositifs de crantage équipant les vannes des évacuateurs de cran ont un rôle essentiel dans la sûreté d'un aménagement hydraulique car ils permettent d'éviter une augmentation brutale du débit à l'aval. Il est nécessaire qu'ils soient indépendants des dispositifs de contrôle commande de la vanne. Ils doivent être fiables, robustes et avec une maintenance réduite. Afin d'assurer au mieux toutes ces exigences dans le parc

important d'aménagements hydrauliques d'EDF, une homogénéisation est en cours de finalisation au sein de l'Ingénierie de la DPIH avec comme objectifs principaux:

- Sélectionner un nombre très réduit de sélecteurs dûment éprouvés et fiables (produits catalogues ou spécifiques),
- Retenir une logique de fonctionnement unique,
- Intégrer une prise de mouvement prioritairement sur les mécanismes de manœuvre.

La technologie utilisée aujourd'hui pour réaliser la fonction de crantage, à base de fins de courses ou sélecteurs de position, est éprouvée et robuste, et la démarche d'homogénéisation présentée dans cet article va dans le sens de renforcer ces qualités.

Perspectives :
Les progrès réalisés récemment sur les capteurs de mesure de position et sur les électroniques d'acquisition et de traitement offrent des pistes d'évolution intéressantes : la fonction de crantage pourrait être élaborée en utilisant des capteurs de mesure continue de la position associés à des modules de sécurité, mettant en œuvre des « cames électroniques ». Cette technologie permettrait notamment :

- une plus grande variété de prises de positions (capteurs linéaires, capteurs inclinomètres…),
- un réglage plus facile et plus précis,
- de limiter les pièces en mouvement dans le dispositif (multiplicateurs/réducteurs, cames, contacts fins de course).

Ces perspectives méritent une étude approfondie, englobant les aspects techniques et économiques, mais aussi de maintenance et d'exploitation.

LES GRANDS LACS DE SEINE, LA NÉCESSITÉ D'UNE SUPERVISION ET TÉLÉGESTION POUR GÉRER 800 000 000 M^3 EN AMONT DE PARIS

Grands Lacs de Seine, supervision and remote monitoring of 800,000,000 m^3 water upstream of Paris

Pascal DUPRAS, Jérome BRAYER, Denis LE MOULLEC
EPTB Seine Grands Lacs, 8 rue Villiot 75012 Paris
pascal.dupras@seinegrandslacs.fr / jerome.brayer@seinegrandslacs.fr / denis.lemoullec@seinegrandslacs.fr
Téléphone : +33 (0) 144 752 929, Fax : +33 (0) 143 460 331

MOTS CLÉS

Exploitation des ouvrages hydrauliques, contrôle-commande, supervision, télégestion, supervision, régulation.

RÉSUMÉ

Pour remplir ses missions d'écrêtement des crues et de soutien d'étiage sur le bassin amont parisien, l'EPTB Seine Grands Lacs exploite quatre lacs-réservoirs dont trois sont situés en dérivation de la Seine, de la Marne, de l'Aube et un sur l'Yonne, capables de stocker, ensemble, plus de 800 millions de m^3 d'eau.
Pour permettre la gestion hydraulique de tels aménagements répartis sur près de dix milles hectares pour les trois ouvrages de Champagne et composés de barrages en rivière, de canaux d'amenée, d'ouvrages de restitution, la gestion des manœuvres à distance est indispensable.
Qu'il s'agisse de respecter les débits de référence en rivière à ne pas dépasser en aval des ouvrages lors des évènements de crues ou qu'il s'agisse de procéder au remplissage ou au déstockage des lacs-réservoirs, des modes de régulation sont possibles : « débit à laisser en rivière », « débit de prise », « consigne de restitution ». La gestion automatisée des ouvrages hydrauliques est supervisée depuis des écrans de contrôle qui font apparaître toutes les informations disponibles, du poste de commande au logement de l'agent d'astreinte. Outil indispensable pour la gestion tant en exploitation normale qu'en exploitation lors des épisodes de crue, il permet aussi en cas de défauts de reprendre une gestion humaine de ces ouvrages.

ABSTRACT

In order to fulfill the missions of flood control and low water compensation upstream of the Paris Basin, EPTB Seine Grands Lacs manages four reservoirs. Three of them are located in the derivation of the rivers Seine, Marne, Aube and one on the river Yonne. They have a global storage capacity of more than 800 million m^3 water.
The reservoirs in the region Champagne are situated in an area of about ten thousand hectares. To allow the hydraulic management of such structures (river dams, canals, instream flow release structures), remote hydraulic management is essential. To comply with the maximum reference discharge level downstream of the equipments during flood events or in order to fill or release the reservoirs, many control modes are available: "minimum instream flow", "intake flow", "instructions for the return of water into rivers". The automated management of the hydraulic structures is supervised from the control screens which show all the available information (i.e. from the control station but also from the house of the on-call operator). It is the essential management tool in everyday situations as well as during flood events. In case of system failure it is always possible to switch to the manual management.

1. LES GRANDS LACS DE SEINE

L'Institution Interdépartementale des Barrages-Réservoirs du Bassin de la Seine (IIBRBS) est un établissement public à caractère administratif, créé le 16 juin 1969 par arrêté ministériel suite à la disparition du département de la Seine, dans le cadre de la réorganisation administrative de la région parisienne. Elle regroupe les départements de Paris, des Hauts-de-Seine, de la Seine-Saint-Denis et du Val-de-Marne. L'IIBRBS a été reconnue comme Etablissement Public Territorial de Bassin sous le nom « EPTB Seine Grands Lacs » en février 2011 sur un périmètre incluant l'ensemble du bassin de la Seine jusqu'à la confluence avec l'Oise.

1.1 Une mission historique

L'ETPB Seine Grands Lacs a pour mission d'exploiter les lacs-réservoirs réalisés par le département de la Seine dans le cadre de l'aménagement du bassin de la Seine en amont de Paris, entrepris à la suite des crues catastrophiques de 1910 et de 1924 et de la sécheresse extrême de 1921 et de poursuivre le programme de régularisation du bassin de la Seine par la création de nouveaux ouvrages.

Pour remplir ces missions, l'EPTB Seine Grands Lacs exploite actuellement quatre lacs-réservoirs dont il est propriétaire, situés sur la rivière Yonne et en dérivation des rivières Seine, Marne et Aube, capables de stocker, ensemble, plus de 800 millions de m^3 dans un double objectif de soutenir le débit d'étiage de la Seine et de ses principaux affluents et de limiter les risques d'inondation en écrêtant les crues.

L'exploitation de ces quatre lacs-réservoirs constitue la mission historique de l'EPTB Seine Grands Lacs. Outre leur exploitation, l'EPTB Seine Grands lacs est en charge de « la gestion équilibrée de la ressource en eau » incluant la prévention des inondations, la gestion des étiages et la protection et la gestion des zones humides, sur son nouveau territoire d'intervention.

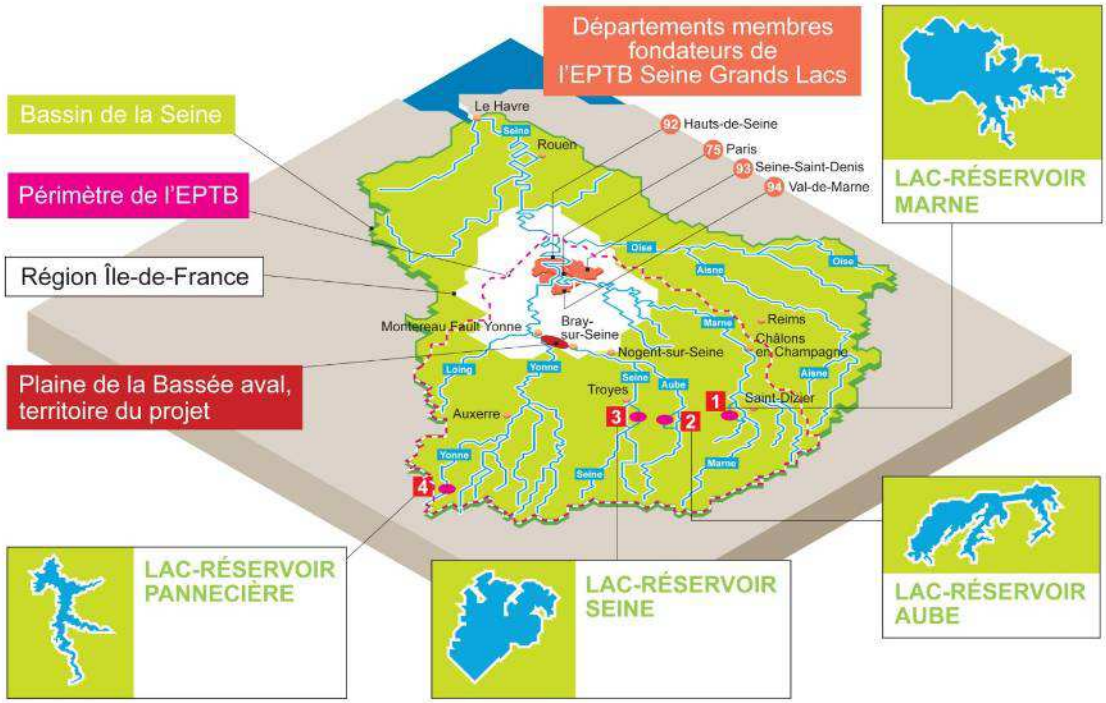


Schéma 1 : Périmètre de reconnaissance de l'EPTB SGL sur le bassin amont de la Seine.

1.2 Un outil de gestion : quatre lacs-réservoirs répartis en tête de bassin

Du plus ancien au plus récent, les quatre lacs-réservoirs exploités par l'EPTB Seine Grands Lacs se caractérisent de la façon suivante :

- le lac-réservoir de Pannecière, mis en service en 1949, établi sur la rivière Yonne, dans le département de la Nièvre (58), d'une superficie de plan d'eau de 520 ha à la cote maximale de remplissage et d'une capacité de stockage de 80 millions de m^3,
- le lac-réservoir Seine (ou lac d'Orient), mis en service en 1966, établi en dérivation de la rivière Seine, dans le département de l'Aube (10), d'une superficie de plan d'eau de 2 300 ha à la cote maximale de remplissage et d'une capacité de stockage de 208 millions de m^3,
- le lac-réservoir Marne (ou lac du Der-Chantecoq), mis en service en 1974, établi en dérivation des rivières Marne et Blaise, dans les départements de la Marne (51) et de la Haute-Marne (52), d'une superficie de plan d'eau de 4 800 ha à la cote maximale de remplissage et d'une capacité de stockage de 350 millions de m^3,
- le lac-réservoir Aube (lac Amance et lac du Temple), mis en service en 1990, établi en dérivation de la rivière Aube, dans le département de l'Aube (10), d'une superficie de plan d'eau de 2 410 ha à la cote maximale de remplissage et d'une capacité de stockage de 170 millions de m^3.

Ces quatre ouvrages ont pour objectifs de :

- limiter les risques d'inondation en écrêtant les crues en hiver et au printemps (remplissage des lacs-réservoirs),
- de soutenir le débit des rivières en été et en automne afin de redonner à la rivière régulée un débit suffisant permettant les prélèvements nécessaires à l'alimentation en eau potable et aux différentes activités anthropiques (Déstockage de l'eau contenue dans les lacs-réservoirs).

2. DES OUVRAGES EN DÉRIVATION

Alors que le barrage de Pannecière est installé au fil de l'eau de l'Yonne, les trois lacs-réservoirs de Champagne sont quant à eux implantés en dérivation des axes régulés. Cette organisation permet de créer une capacité substantielle de stockage de l'eau, colinéaire à la rivière.
Par la suite, le lac-réservoir Marne et ses ouvrages hydrauliques sont pris pour exemple illustratif de l'article.

2.1 Configuration technique des ouvrages : exemple du lac-réservoir Marne

Le stockage de l'eau dans le lac-réservoir et sa vidange sont organisés gravitairement au moyen d'ouvrages de prise d'eau, de restitution, de régulation de hauteur d'eau ainsi que des canaux d'amenée et de restitution des eaux et leurs ouvrages associés (déversoirs intermédiaires et d'extrémité).

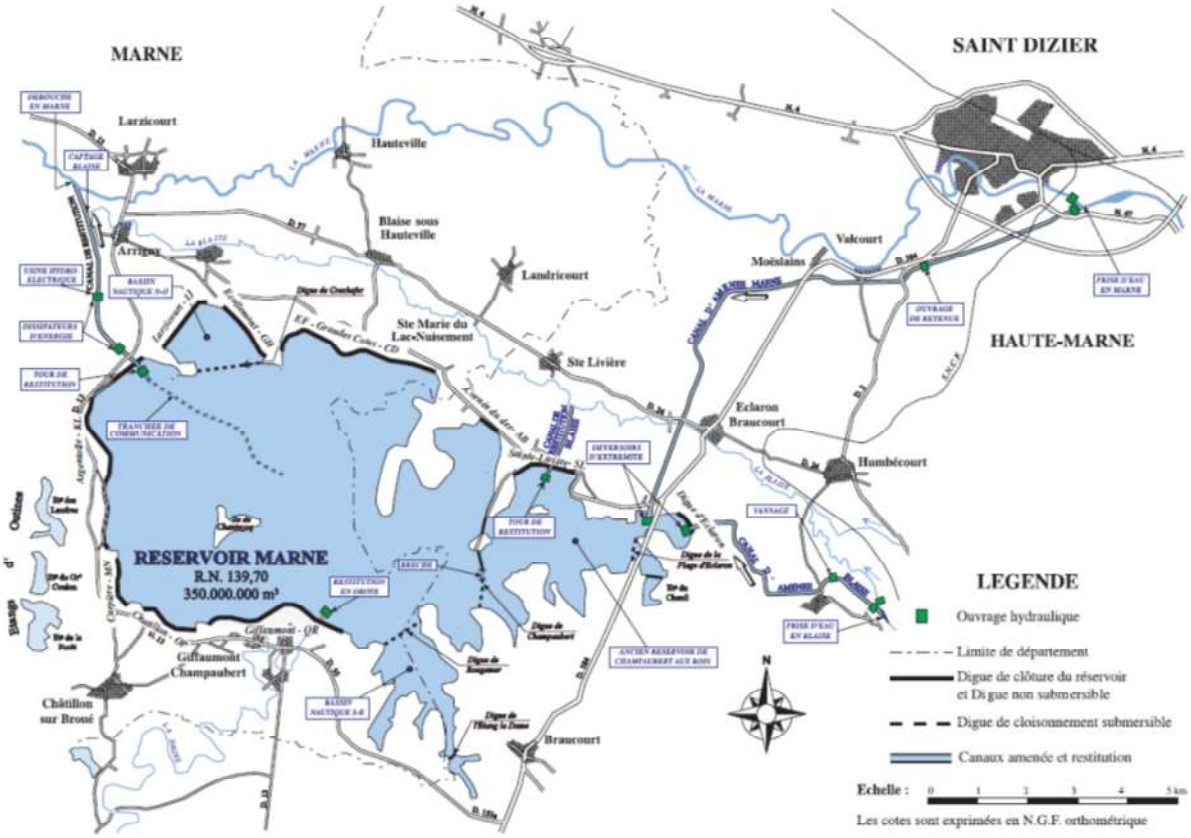


Schéma 2 : répartition des ouvrages de régulation : exemple du lac-réservoir Marne.

2.1.1 Les prises d'eau

Les ouvrages de prise sont composés d'un barrage en rivière et de l'entonnement du canal d'amenée des eaux équipé en tête de vannes de garde permettant de gérer la prise d'eau et son transfert par le canal vers le lac-réservoir et donc de maîtriser son remplissage jusqu'à sa cote maximale.

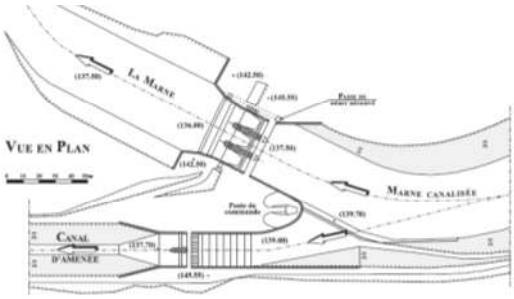




Schéma 3 : Exemple de l'ouvrage de prise d'eau en rivière Marne.

2.1.2 Les déversoirs

Les déversoirs sont des ouvrages dont la vocation est de gérer des altimétries de plan d'eau amont/aval différentes.

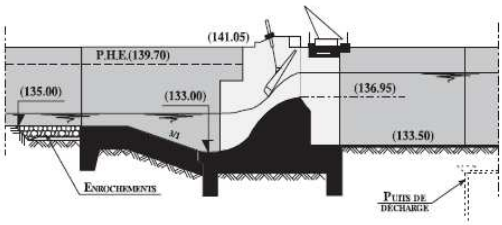




Schéma 4 : Exemple du déversoir d'extrémité du canal d'amenée Marne.

2.1.3 Les ouvrages de restitution

Ces ouvrages permettent d'organiser la restitution des eaux stockées dans le lac-réservoir vers la rivière. Elles sont composées d'une tour de prise d'eau implantée dans le lac-réservoir et à la base de laquelle prend naissance une galerie traversant les digues de ceinture du lac-réservoir et permettant d'acheminer les eaux vers l'aval.

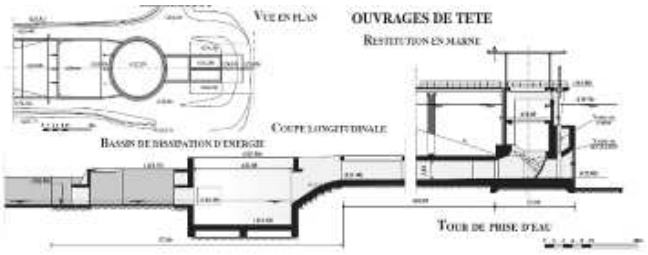




Schéma 5 : Exemple de la restitution principale en rivière Marne.

2.2 La gestion hydraulique des ouvrages

Le règlement d'eau fixe les modalités de remplissage et de vidange du lac-réservoir selon une courbe « objectif d'exploitation » prédéfinie. Ainsi, le remplissage du lac-réservoir débute en principe le 1er novembre et s'achève le 30 juin de l'année suivante. Pendant cette période, les crues en rivière sont donc écrêtées. Du 1er juillet au 30 octobre, le lac-réservoir est progressivement vidé de sorte à soutenir le débit naturel de la rivière le plus souvent assez faible à cette époque de l'année. Cette restitution peut se prolonger en novembre et décembre en cas d'étiage tardif constaté en rivière.

Le règlement d'eau fixe par ailleurs les débits réservés à maintenir en aval des ouvrages de prise d'eau mais également les débits de référence à ne pas dépasser dans la toute mesure du possible en aval des ouvrages de prise d'eau et en aval complet du lac-réservoir. Ces débits de référence permettent de garantir la fonction d'écrêtement des crues en rivière.

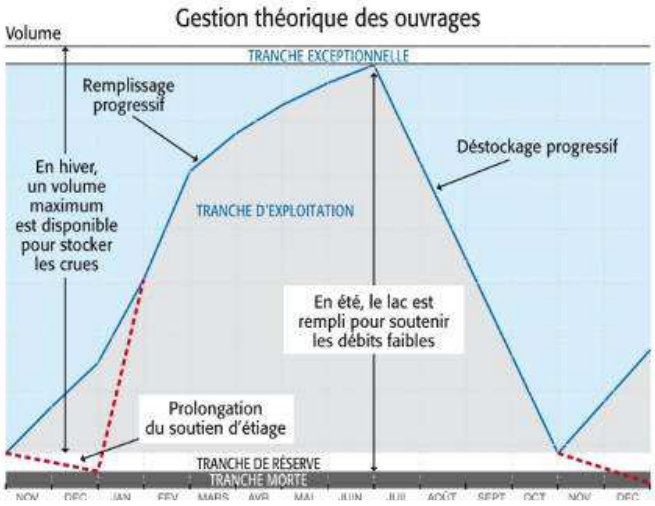


Schéma 6 : Courbe théorique de remplissage et de vidange du lac-réservoir, fixée par le règlement d'eau.

3. LA SUPERVISION ET TELEGESTION DES OUVRAGES : EXEMPLE DU LAC-RESERVOIR MARNE

3.1 L'organisation de l'exploitant

Chacun des quatre lacs-réservoirs fait l'objet d'une surveillance et d'une exploitation H24. Hors heures ouvrées, le dispositif adopté par l'exploitant repose sur un agent d'astreinte pour chaque lac-réservoir en charge de la surveillance et de la manœuvre des vannages selon les consignes données. Ces agents sont pour cela logés dans des maisons de barragiste équipées des outils de supervision des ouvrages hydrauliques.
Les trois lacs-réservoirs regroupés (Marne, Seine et Aube) bénéficient également d'un électromécanicien d'astreinte à disposition en cas d'intervention de maintenance hors heures ouvrées. Enfin, une astreinte de décision est confiée à un ingénieur pour l'ensemble des quatre lacs-réservoirs.
Le rythme des astreintes est hebdomadaire, du lundi 8h au lundi suivant 8h.

3.2 Le principe de supervision et télégestion associées au lac-réservoir Marne

La répartition des ouvrages de régulation associés au lac-réservoir Marne s'établit sur un territoire d'environ 5000 Ha. La distance à parcourir par la route entre les ouvrages de prise d'eau en rivière Marne, les canaux d'amenée et de restitution des eaux, les ouvrages de restitution et de régulation ainsi que les digues de ceinture du lac-réservoir représente une distance d'environ 100 km. Ces chiffres montrent l'étendue des ouvrages et la difficulté à laquelle l'exploitant est confronté en matière de surveillance mais également de gestion et contrôle des vannages rattachés à chacun des ouvrages de régulation.
Historiquement, le gestionnaire du lac-réservoir avait fait le choix d'affecter un personnel d'exploitation à un groupe d'ouvrages afin de limiter le domaine d'intervention des agents. Néanmoins, l'optimisation des moyens humains affectés à la gestion des ouvrages de l'ensemble du lac-réservoir l'a très vite amené à développer un dispositif de contrôle-commande à distance de ces ouvrages lui permettant ainsi d'obtenir un visuel général et détaillé des installations hydrauliques du lac-réservoir et des axes régulés et d'organiser l'ensemble des manœuvres sur les organes hydrauliques en fonction des consignes données (cf. §3-2 à 3-5).
De même, ce choix a également été retenu du fait des temps d'intervention maximums fixés par les consignes écrites pour certains ouvrages hydrauliques stratégiques du lac-réservoir (Ouvrages de prise d'eau et de restitution).
Ce dispositif repose sur le rattachement de chacun des organes mécanisés à un automate esclave implanté sur un site donné (dénommé LT pour « local technique »), lui-même rattaché à un automate maître à partir duquel la supervision des vannages mais aussi des paramètres hydrauliques et hydrologiques peut être appréhendée par l'exploitant. Cet automate lui permet également d'organiser les manœuvres adaptées aux consignes d'exploitation qui lui ont été données.
Le visuel général et détaillé du positionnement de chacun des vannages ainsi que la commande à distance de ces vannages sont accessibles depuis des écrans de supervision connectés à l'automate maître. Ces écrans de

supervision sont disponibles sur les principaux sites du lac-réservoir (prises d'eau et restitution principale), au PC d'exploitation ainsi que dans chacune des maisons de barragiste.

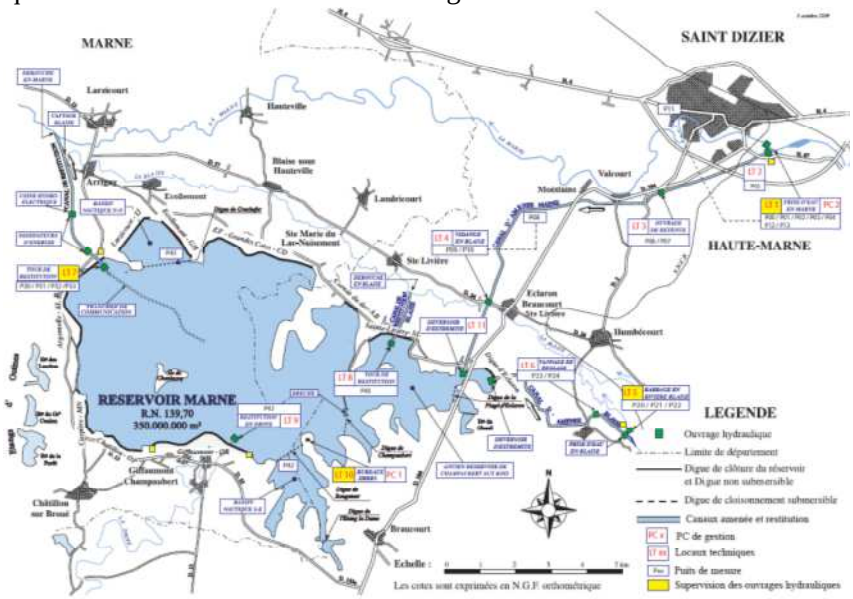
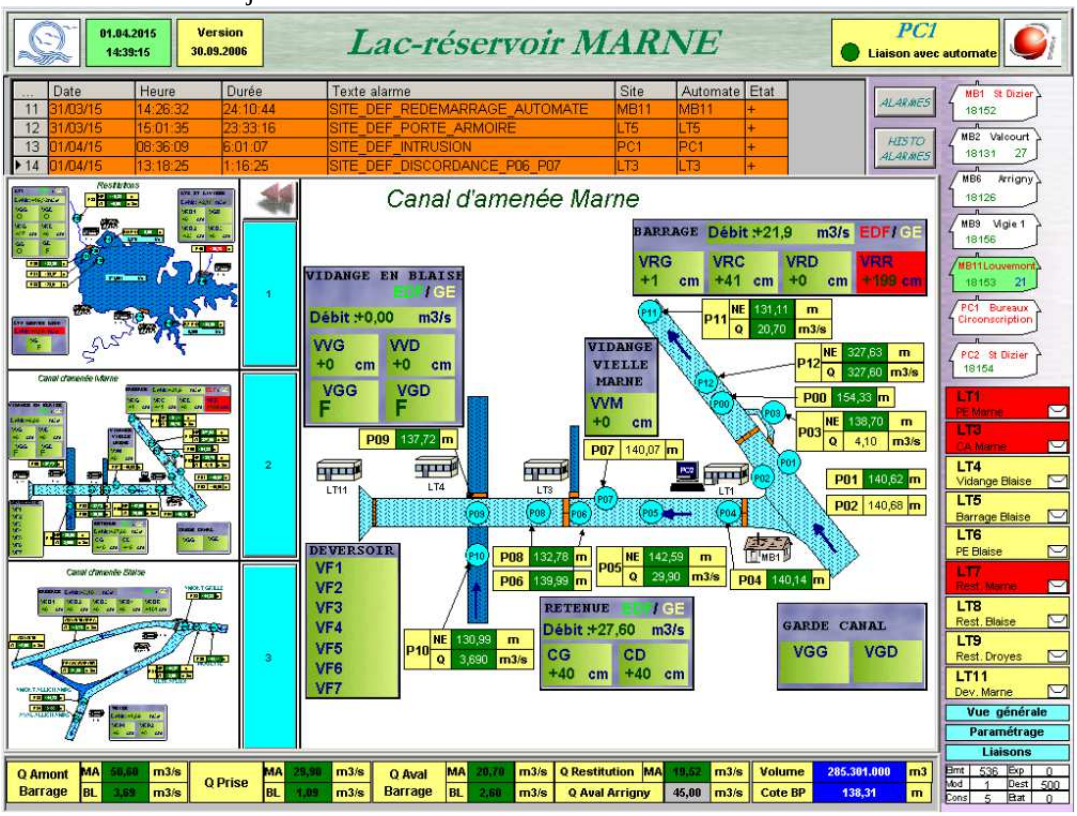


Schéma 7 : Carte détaillant pour le lac-réservoir Marne l'ensemble des sites (LT) auxquels sont rattachés les ouvrages hydrauliques ainsi que les capteurs de mesure de débits et de hauteurs d'eau.

3.3 Visuel sur la configuration des axes régulés et des ouvrages hydrauliques de régulation

Au travers d'un synoptique complet, l'automate de gestion permet d'afficher les données principales : hauteurs d'eau, débits en rivière mesurés en amont et en aval des ouvrages hydrauliques de régulation. Ainsi, la connaissance de ces paramètres permet à l'exploitant d'engager les manœuvres appropriées au droit de l'ouvrage de régulation d'une part dans le respect des dispositions du règlement d'eau et en particulier des débits réservés et de référence en rivière et d'autre part d'organiser les prélèvements d'eau en rivière en vue de leur stockage dans le lac-réservoir en fonction des objectifs fixés.

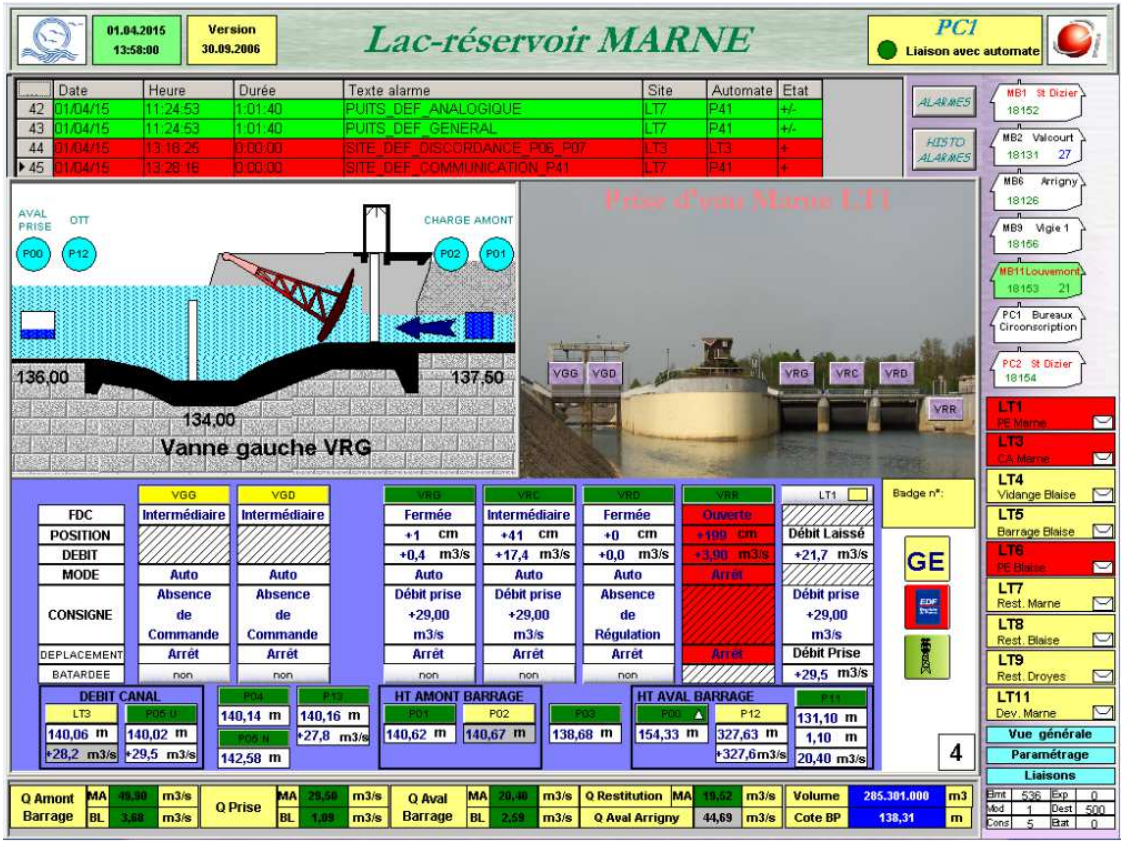


Vue 1 : Synoptique général permettant d'appréhender l'état des ouvrages et des axes régulés

En complément des éléments de gestion hydraulique, les informations portent sur le fonctionnement des ouvrages dont :

- Défaut de prise d'eau : Au droit des ouvrages de prise équipés de grilles anti-embâcles, les capteurs de hauteur d'eau installés de part et d'autre des grilles donne une information sur la perte de charge engendrée par ces grilles et donc sur l'état de leur colmatage. L'exploitant est en mesure d'engager, le cas échéant, des actions de dégrillage si l'accumulation des embâcles s'avère trop importante.
- Positionnement des vannes : Les hauteurs des vannes et les débits associés sont affichés sur les écrans de supervision ce qui permet à tout instant un visuel complet du fonctionnement des ouvrages.

Pour maintenir un niveau de sûreté optimal, sur un site donné, la redondance des capteurs permet de contrôler et comparer les valeurs mesurées mais également de palier le dysfonctionnement d'un capteur.



Vue 2 : Synoptique de l'ouvrage de prise d'eau en rivière Marne – affichage des paramètres de positionnement

A partir des éléments d'information fournis par le système de supervision, l'exploitant est donc en capacité d'établir chaque matin à 8h « la feuille de cote », document retraçant l'état des rivières régulées et le positionnement des ouvrages hydrauliques de l'ensemble du lac-réservoir. Ces éléments d'information sont alors consignés dans le registre d'exploitation et transmis aux services de contrôle, aux services de police de l'eau et pour information aux partenaires locaux.

Enfin, sur une période donnée et choisie par l'exploitant, l'automate de gestion permet de construire l'historique de l'ensemble des paramètres contrôlés dont les manœuvres réalisées sur les vannages, les hauteurs d'eau et débits en rivière constatés pendant la dite période.

3.4 L'organisation des manœuvres : mode automatique ou mode manuel

Afin de gérer d'une part les objectifs de prise d'eau et/ou de restitution, selon l'époque et les consignes d'exploitation en cours, et d'autre part de maîtriser les débits en aval des ouvrages fixés par le règlement d'eau, l'exploitant est en mesure de mettre en œuvre trois modes de gestion des ouvrages hydrauliques : le mode régulé, le mode positionnement et le mode manuel.

Les deux premiers modes peuvent être mis en œuvre sur le site même des ouvrages hydrauliques ou à distance depuis n'importe quelle station de supervision connectée à l'automate maître. A l'inverse le mode manuel est mis en œuvre uniquement sur le site de l'ouvrage hydraulique concerné.

3.4.1 Le mode régulé

Ce mode consiste à fixer une consigne de hauteur d'eau ou de débit sur l'un des paramètres contrôlés. L'automate de gestion organisera automatiquement la régulation de l'organe concerné dans le respect de la consigne donnée.

Ce mode est ainsi utilisé lorsque l'exploitant souhaite organiser par exemple « un débit laissé en rivière » en aval de l'ouvrage de prise d'eau. Cette disposition lui garantira alors en toute circonstance le maintien du débit de consigne en aval du barrage en rivière et le débit de prise d'eau sera modulé selon la valeur du débit amont en rivière. Ce mode sera privilégié dans les situations de faible débit en rivière de sorte à ne pas faire baisser le débit en rivière en dessous d'une valeur plancher fixée par avance.

A l'inverse, le même principe peut être adopté mais cette fois-ci pour un objectif de débit de prise d'eau. Dans ce cas, c'est la consigne de remplissage du lac-réservoir qui est naturellement privilégiée. Cette situation est le plus souvent rencontrée lorsque les débits en rivière sont suffisamment élevés pour satisfaire les objectifs de remplissage sans altérer les débits réservés en aval des ouvrages de prise d'eau.

3.4.2 Le mode positionnement

La plupart des ouvrages hydrauliques sont dimensionnés afin de gérer de grandes plage de débit (Q_{1000} voire supérieur) ; ils sont donc composés de plusieurs vannages. A débit modéré, la régulation se réalise sur de faibles amplitudes d'ouverture et le plus souvent sur un seul vannage. L'exploitant a donc la possibilité de placer en mode positionnement une ou plusieurs vannes et opère ainsi la régulation sur les autres vannes disponibles. La régulation n'en est ainsi que d'autant plus fine à débit modéré.

3.4.3 Le mode manuel

A tout instant, le mode manuel peut être actionné pour un ou plusieurs ouvrages à partir de son site de rattachement (LT). Rappelons que ce site peut comprendre plusieurs ouvrages tel, par exemple, le site de « la prise d'eau Marne » qui accueille le barrage en rivière (régulation) et les vannes de garde en entrée de canal (barrière de sécurité). Ce mode permet ainsi de prendre la main sur une ou plusieurs vannes qui composent l'ouvrage et geler, de fait, toute action qui serait entreprise à distance par un tiers.

Ce mode sera donc le plus souvent utilisé localement lors des opérations de maintenance et d'entretien ou à l'occasion d'essai de manœuvres spécifiques in situ.

De même, certains organes tels les vannes de garde peuvent être manœuvrés à distance pour ce qui de la fermeture des organes (opération de mise en sécurité) mais nécessitent une manœuvre manuelle sur site pour les replacer en configuration normale d'exploitation. C'est un principe de sécurité qui régit cette disposition pour ce type d'organe associé aux barrières de sécurité définies dans l'étude de dangers.

Enfin, le mode manuel peut également être utilisé dans le cas d'un fonctionnement en mode dégradé d'un ou plusieurs ouvrages, notamment en cas de défaillance du réseau ou d'une façon générale du contrôle-commande à distance. En dernier recours si le mode manuel reste lui aussi inopérant, la manœuvre des vannes associées à un ouvrage peut être réalisée manuellement par les opérateurs au droit de l'ouvrage, sans apport d'énergie.

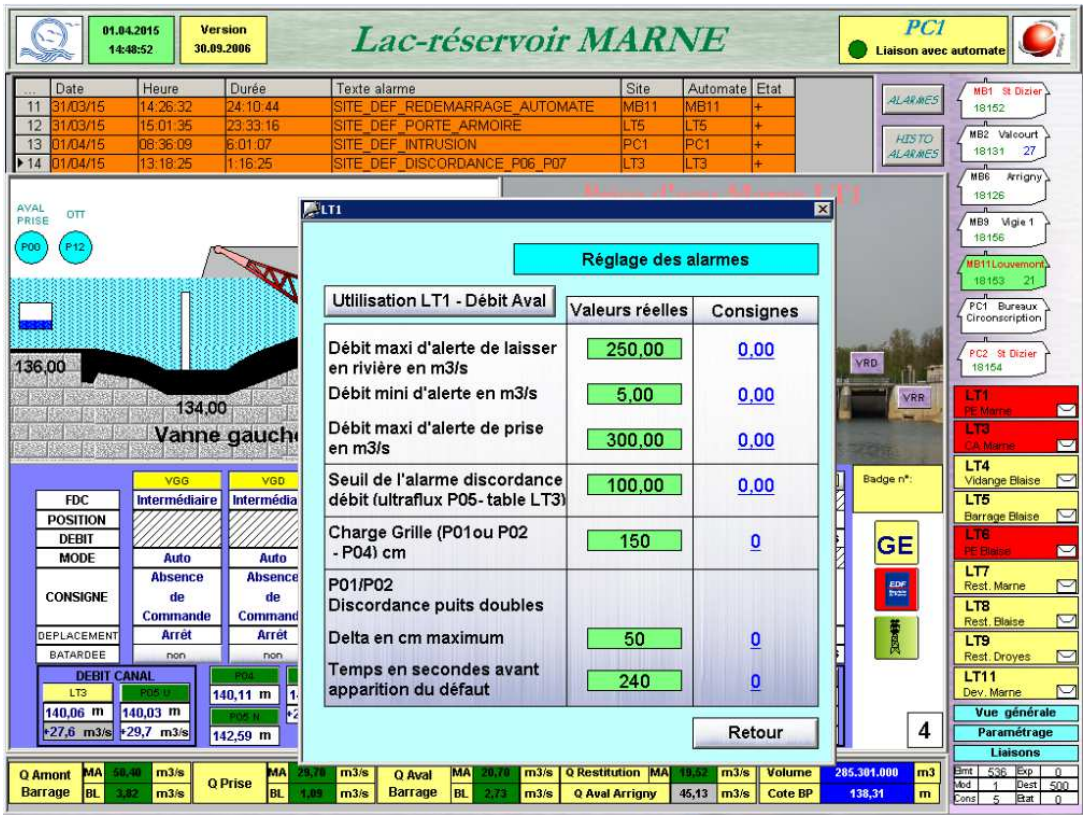
3.5 La gestion des défauts et des alarmes

3.5.1 Périmètre et possibilité de paramétrage

Au-delà des capteurs associés à la mesure des paramètres physiques (hauteur, ouverture, débits) évoqués précédemment, il existe également sur les ouvrages hydrauliques des capteurs de positionnement permettant

d'apprécier à distance la configuration des ouvrages : fins de course, surcourse, tension de chaîne, bascules élastiques, … mais aussi de détecter un défaut d'alimentation électrique de ou des organes manœuvrés.
L'ensemble de ces dispositifs permet ainsi à l'exploitant, depuis son écran de supervision, d'apprécier et comprendre la configuration de ses ouvrages.

De même, dans le cadre de son exploitation, l'exploitant peut se fixer des critères d'alerte en cas de d'atteinte de tel débit ou telle hauteur d'eau en rivière ou dans les canaux d'amenée et de restitution. Ce dispositif d'alerte paramétrable est géré par l'automate de gestion ; lors de l'atteinte de la valeur de consigne, l'exploitant est informé via la supervision, relayée le cas échéant par un appel téléphonique et/ou un appel radio. A défaut d'une nouvelle consigne donnée, l'automate de gestion place en mode positionnement l'ouvrage hydraulique concerné.

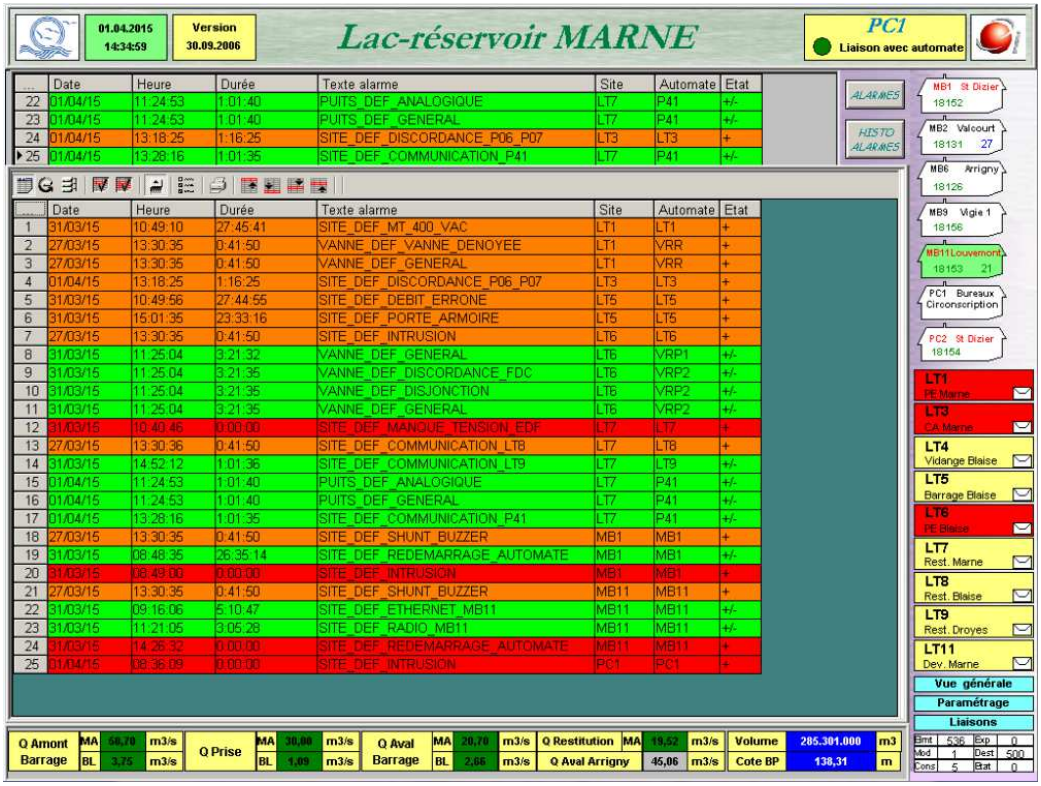


Vue 3 : Exemple d'un réglage des alarmes niveau de débit/ niveau d'eau

Enfin, l'ensemble des sites (LT) sont équipés de détecteurs de présence et de lecteurs de badge permettant d'identifier la ou les personnes présentent sur site et à défaut de détecter le cas échéant une intrusion non identifiée.

3.5.2 Remontée des défauts et des alarmes, traitement et acquittement

L'outil de supervision intègre un bandeau listant l'ensemble des remontées de défauts et d'alarmes en provenance de l'ensemble des sites supervisés. Ceci permet à l'exploitant de prendre connaissance en temps réel du registre des défauts et des alarmes, de procéder à leur corrections (sur site exclusivement) et leur acquittement (sur site exclusivement). Un régime de couleur associé à chacun des défauts ou alarmes permet de connaitre l'état d'avancement de leur traitement.

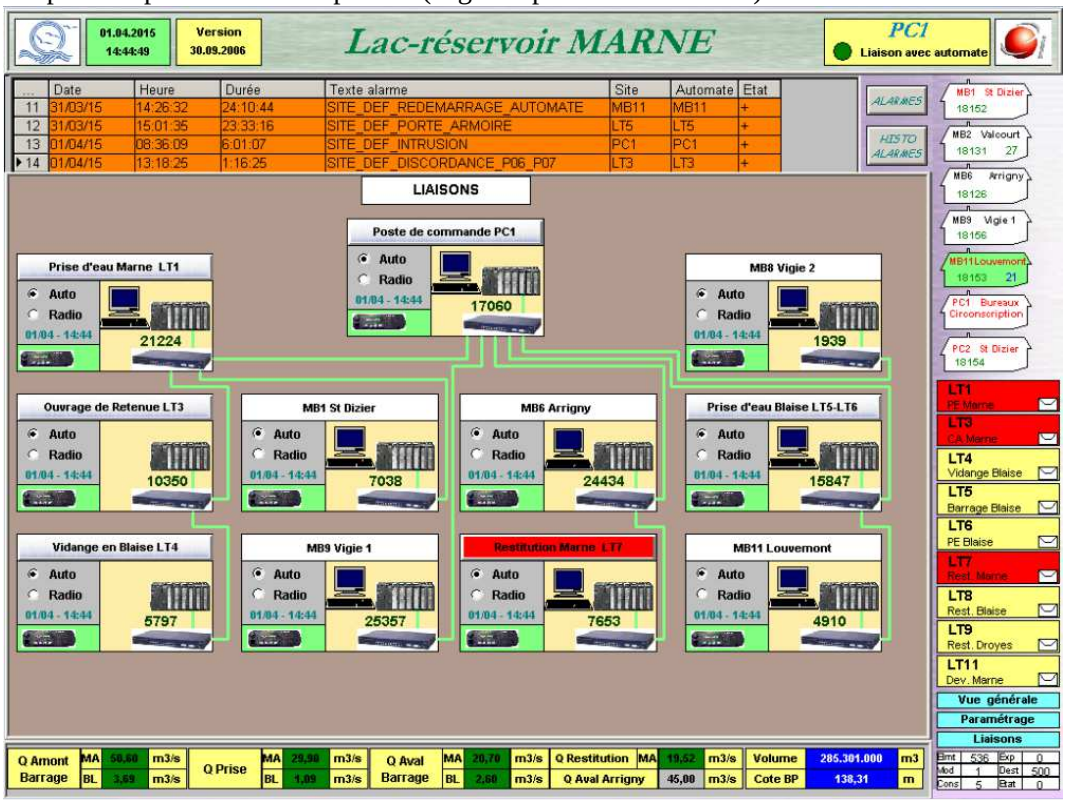


Vue 4 : Visuel sur le bandeau de remontée des défauts et des alarmes et suivi de l'état de traitement

3.6 Le réseau de communication et de télécommunication entre les équipements

3.6.1 Architecture réseau

La communication et l'échange de données entre les sites et l'outil de supervision et de télégestion reposent sur un réseau pour partie propriété de l'EPTB Seine Grands Lacs (filaire cuivre et fibre optique) et pour partie loué auprès d'opérateurs de téléphonie (Lignes spécialisées et VPN).



Vue 5 : Visuel sur le réseau de communication entre les différents sites

L'EPTB Seine Grands Lacs dispose des ressources humaines et des compétences pour assurer l'entretien, la maintenance de ce réseau d'importance stratégique en termes de continuité de fonctionnement des ouvrages hydrauliques. Il a toutefois aussi recours aux entreprises spécialisées pour certaines interventions de maintenance portant sur les automates de gestion.

3.6.2 Mode secouru

En cas de défaillance de tout ou partie des éléments constitutifs de l'architecture réseau précédemment décrite, l'exploitant a la possibilité d'avoir recours à un mode secouru pour maintenir opérationnel en toute circonstance le dispositif de supervision et télégestion de ses ouvrages hydrauliques.

Ce mode secouru s'organise d'une part autour de l'activation automatique ou forcée, sur site ou à distance depuis la supervision, d'un ensemble de groupes électrogènes implantés sur les principaux sites des ouvrages hydrauliques, en cas de défaillance du réseau électrique public.

D'autre part, lorsque des dysfonctionnements apparaissent sur le réseau de communication entre les sites, le mode secouru repose alors sur l'utilisation du réseau hertzien pour lequel l'EPTB Seine Grands Lacs loue deux fréquences à l'Agence Nationale des Fréquences et dispose de son propre réseau d'émetteurs, récepteurs et relais. L'usage de ce mode secouru qui repose sur un rafraichissement toutes les heures des données d'exploitation présente quelques difficultés d'usage liées à la densité des données échangées entre les automates et génère donc parfois des temps d'attente. Toutefois, le rafraichissement des données peut être ordonné par l'exploitant autant que de besoin. Des conditions météorologiques sévères peuvent également influencer défavorablement l'échange des données et requièrent de la part de l'opérateur des rafraichissements répétés.

4. RETOUR D'EXPERIENCE, ÉVOLUTION ENVISAGÉE

Le dispositif de supervision et télégestion des ouvrages hydrauliques actuellement en fonction a été installé entre 2003 et 2006 sur les ouvrages hydrauliques des trois lacs-réservoirs de Champagne (Marne, Seine et Aube). L'exploitant bénéficie donc aujourd'hui d'une expérience d'environ dix ans en matière de supervision et d'exploitation à distance d'ouvrages hydrauliques à forts enjeux sur le bassin amont parisien. Cette expérience lui permet de tirer d'ores et déjà les enseignements suivants :

- le dispositif de supervision des ouvrages hydrauliques constitue un outil pertinent pour appréhender l'état de fonction de ces ouvrages répartis sur un territoire étendu,
- le dispositif de télégestion offre une souplesse de gestion des ouvrages hydraulique en période normale d'exploitation comme en période de crue et permet de restituer le déroulement des évènements (situation hydrologique des rivières et hydrauliques des ouvrages) à des fins d'analyse et probablement, à terme, de perfectionnement des modes d'exploitation.

Cependant, le déploiement de cet outil et sa maîtrise par les exploitants requièrent encore un bon niveau de connaissance des ouvrages hydrauliques eux-mêmes et de leur sensibilité au sens du fonctionnement hydraulique et de leur réponse à une consigne. Il doit mobiliser toute l'attention des opérateurs afin de gérer :

- les quelques situations de conflit engendrées par la concomitance d'évènements comme par exemple la simultanéité du mode régulation avec des opérations de dégrillage en cours ou encore la concomitance de consignes potentiellement antagonistes,
- un niveau de détail des défauts et des alarmes insuffisamment développé lors des remontées en supervision ou via le réseau d'alerte téléphonique et radio,
- les alarmes intempestives engendrées le plus souvent par la sensibilité des capteurs voire … la redondance des capteurs,
- un mode secouru du réseau d'échange des données via le relais hertzien insuffisamment fluide pour une exploitation en situation de crue intense, étant entendu que dans une telle situation, l'exploitant peut alors organiser un déploiement des opérateurs sur le site même des ouvrages à réguler pendant la durée de l'évènement.

Depuis la mise en place de ce dispositif de contrôle-commande à distance, l'exploitant identifie également des pistes d'amélioration portant sur les actions suivantes :

- densifier le réseau et le maillage entre les sites afin de fiabiliser, par la redondance, les échanges de données entre automates de gestion (liaisons cuivre, fibre, VPN, réseau hertzien),
- équiper les sites dépourvus de groupes électrogènes et/ou renforcer le réseau des onduleurs afin d'assurer la continuité du fonctionnement des automates de gestion. Actuellement seuls les sites stratégiques (prises d'eau et restitutions) sont équipés de groupe électrogène.
- Anticiper au moyen d'un stock adapté la disponibilité des matériels de rechange, en particulier des matériels informatiques fonctionnant en continu et soumis à des conditions d'usage sévère (milieu humide, grande amplitude de température, …),
- En appui des activités développées en régie, disposer de marchés pluriannuels de maintenance incluant un régime d'astreinte garantissant des interventions en toutes circonstances,
- améliorer la lisibilité des modes dégradés auxquels l'exploitant est susceptible d'être confronté en étudiant les modalités de la continuité du fonctionnement des ouvrages hydrauliques (étude ISL en cours).

Enfin, l'EPTB Seine Grands Lacs étudie l'évolution de son dispositif de supervision de sorte à intégrer un visuel direct (via un réseau de caméras) sur les ouvrages les plus sensibles pour un lever de doute plus réactif et réfléchit à la création et la mise en place d'un mode de supervision et de contrôle-commande à l'échelle des quatre ouvrages (Marne, Aube, Seine et Pannecière) ainsi qu'à l'organisation de ses équipes de surveillance et d'intervention autour de ce futur dispositif.

LA FIABILITE DES RESEAUX OPERES ET L'IMPACT SUR NOS ORGANISATIONS

Philippe GIGUELAY, Sylvie DEVILLETTE
EDF, 10 allée de Faugeras – 87000 Limoges
philippe.giguelay@edf.fr, sylvie.devillette@edf.fr
Téléphone : +00 (33) 05 19 76 22 00 , Fax : +00 (33) 05 19 76 22 32

Christian LACHAMBRE
EDF, 14 avenue du Garric – 15000 Aurillac
christian.lachambre@edf.fr

MOTS CLÉS

UP Centre, ESSH télécom, alarmes

RÉSUMÉ

Les réseaux opérés font partie intégrante de certaines de nos infrastructures TELECOM. Seul l'Opérateur est habilité à intervenir sur son réseau et à en garantir la fiabilité. Cet article illustre par des évènements réels et simulés l'impact d'une défaillance du réseau opéré sur nos organisations. L'article pose quelques bases d'une réflexion qui permettrait d'objectiver la fragilité ou la robustesse d'une architecture utilisant des réseaux opérés vis-à-vis d'une organisation

ABSTRACT

The telecom networks are used for the Control Command systems of the hydro power plants at EDF SA. The Operator is responsible for the quality of its network and is the only capable to intervene. This article illustrates, based on occurred events and simulated events, what can be the impact of a network incident on the team management of our power plants. The article poses some bases of a reflection to know the brittleness or the robustness of remote transmissions between power plants and control centers using public's telecoms networks.

Les infrastructures télécom participent à la surveillance des aménagements placé sous la responsabilité d'un groupement d'usines Elles permettent de faire converger les informations et alarmes des différents sites vers l'exploitant basé à la tête du groupement d'usines. En dehors des heures ouvrables, les alarmes sont retransmises vers l'astreinte par un système de diffusion d'alarmes. Un certain nombre des supports utilisés pour la transmission ou la diffusion sont opérés.

En 2012 plusieurs pannes de l'opérateur ORANGE ont été à l'origine de perturbation de la téléphonie, de la transmission et de la diffusion d'alarme, du système d'alerte aux autorités et aux populations pour les barrages PPI dans les groupements d'usines.
A titre d'exemple citons 3 évènements parmi les plus significatifs que nous avons identifiés sur le périmètre de l'UP CENTRE et qui ont eu un impact sur plusieurs Groupement d'Usines (GU).
Vendredi 29 Juin, Perte Réseau Téléphonique en Corrèze :

Un défaut sur un câble d'énergie souterrain alimentant le central téléphonique de Tulle s'est produit vers 2 h 30 du matin. Vers 5 heures du matin, le groupe électrogène puis les batteries du central de France Télécom ont subi une défaillance privant de téléphone fixe, de téléphone mobile et d'internet une grande partie du département de la Corrèze. La situation a été rétablie vers 11 heures. Impact sur les GU de la vallée de la Dordogne : GU de BORT, GU de l'AIGLE et GU de CHASTANG.

Vendredi 6 Juillet : incident national

Un vendredi noir pour Orange et ses 26 millions de clients : une panne logicielle a paralysé le réseau de téléphonie mobile du premier opérateur français. Douze heures de black-out. Perte de communication GSM généralisée de l'opérateur ORANGE. En dehors des « zones blanches » il est possible de communiquer avec un autre Opérateur SFR ou Bouygues.

Vendredi matin 17 Septembre :

Dysfonctionnement d'un faisceau Hertzien de l'opérateur ORANGE dans le Nord Aveyron provoquant une perte par intermittence du Réseau RTC, GSM (tous les opérateurs) et liaisons spécialisées sur la zone d'Entraygues sur Truyère. Situation rétablie le lundi 20 après-midi. Impact en partie sur GU Vallée d'OLT.

Cf. Etude de cas développée dans la suite de l'article.

Comment l'exploitant est il prévenu de ce type d'incident ?

Généralement les liaisons entre équipements de transmission sont sous surveillance. Dans le cas où des micros coupures perturbent le service, une temporisation peut être mise en place en accord entre l'exploitant et le technicien Telecom. Des équipements de surveillance de ligne (BSCOM) entre la tête de GU et le domicile des agents d'astreinte permettent également de détecter dans un délai maxi de 2 heures des pertes de lignes.

Les incidents de certaines liaisons du réseau opéré peuvent aussi être détectés par la CEC (Cellule d'Exploitation Centralisée) de chaque Agence Régionale Telécom[1] via ses écrans de supervision ou directement par un appel de l'opérateur. Dans ce cas la CEC informe l'exploitant de la panne et lui communique un numéro d'incident.

Lorsqu'un tel évènement arrive, l'exploitant met en place, si nécessaire, l'organisation qui lui permet de pallier la défaillance de l'opérateur pour continuer à assurer sa mission.

Pour mesurer l'impact réel de ce type d'incident sur nos installations il faudrait pouvoir reconstituer au plus tôt la chronologie précise des événements et la liste exhaustive des systèmes en défaut.

Comment mesure t'on la fiabilité du réseau opéré ?

ART a mis en place au niveau national une Hotline spécifique (CSA : Centre Support et ACCUEIL : 0437427492 pour tracer et suivre l'ensemble des incidents Telecom d'exploitation de la DPIH. Le CSA est ouvert pendant les heures ouvrables (7h30 à 17h30 du lundi au vendredi). Le dossier SCOPE ouvert suite à l'appel de l'exploitant est traité directement en région par un technicien d'exploitation. Celui-ci vérifie l'origine du défaut avant d'ouvrir un dossier chez l'opérateur et d'en assurer le suivi. Le ticket OBS (Organe Business Service) est communiqué à l'exploitant.

En dehors de cette plage, l'exploitant doit contacter directement l'opérateur OBS au 0800333466 et informer à postériori le CSA pour l'ouverture d'un dossier SCOPE. Ces suivis de dossiers permettent de mettre en œuvre un plan d'action coté OBS ou en interne (mise en place de supports privés

Le numéro de dossier est normalement enregistré dans la base de données SILEX.

ART constate en 2012 une évolution significative du nombre de dossiers « incident » ouverts auprès du CSA. La sensibilisation des exploitants, associée à la joignabilité et aux compétences techniques des hotliners peuvent expliquer ce phénomène.

Pour certaines liaisons à enjeux des mesures continues sont réalisées sur les liaisons opérées via nos équipements. Pour d'autres des analyses à posteriori sont possibles quand les matériels d'extrémité le permettent.

Toutefois ce type d'analyse n'est pas possible sur l'ensemble des liaisons opérées.

Même si le CSA enregistre aujourd'hui plus d'incidents liés aux liaisons opérées, il ne peut en garantir l'exhaustivité. La détection du défaut et sa déclaration auprès du CSA est un moyen important pour juger de la qualité du réseau et lancer des actions correctives.

Toutes les liaisons comportent une Garantie de Temps de Rétablissement (GTR) définie en amont par la MOA DPIH en fonction des enjeux. En règle générale, le temps de rétablissement est contractualisé entre 4 h et 8 h, mais l'expérience montre que ces délais ne sont pas toujours tenus sur des incidents généralisés.

Quel impact sur les organisations des GU?
Ces indisponibilités de liaisons peuvent s'avérer critiques, car elles obligent l'exploitant à mettre en place une organisation compatible notamment avec les enjeux de sureté. Il parait donc nécessaire de bien mesurer l'impact de tels incidents sur certaines fonctions essentielles telles que la transmission et la diffusion d'alarmes.

Suite aux incidents évoqués ci-dessus ART SO a proposé de synthétiser sur différents tableaux les impacts réels et simulés pour différents scénarios de défaillance du réseau opéré à l'échelle d'un groupement d'usines (GU).

Cette synthèse met en évidence les points de fragilité et propose des axes d'amélioration de l'infrastructure existante.

Cette analyse est détaillée ci-dessous dans une étude de cas.

ETUDE DE CAS SUR LE GU VALLEE D'OLT

Le schéma ci-dessous décrit l'architecture existante des transmissions reliant les différents sites du GU.
Il facilite la compréhension des différents tableaux.

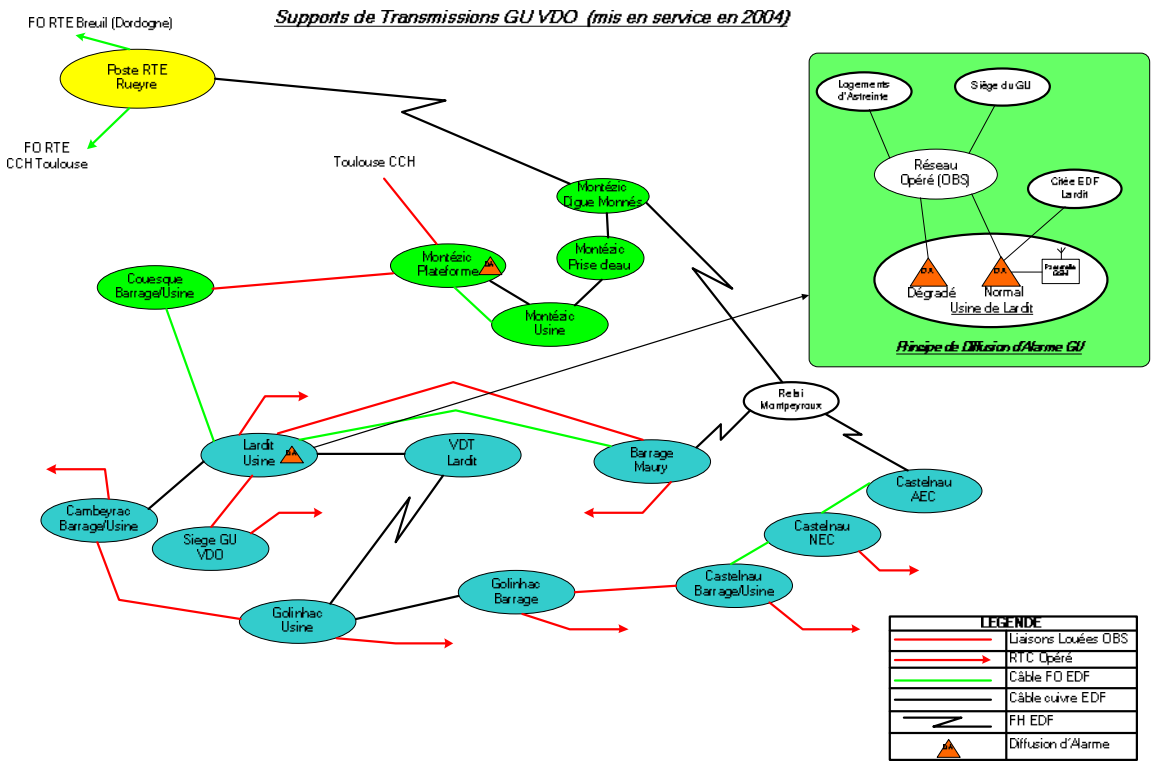


TABLEAU 1 -IMPACTS REELS SUR L'EXPLOITATION (INCIDENT DU 17/09/12)

Non opérationnel
Opérationnel
Sans Objet

Impact de l'incident sur l'exploitation	Diffusion d'alarmes Mode Normal	Diffusion d'alarmes Mode Dégradé	Retransmission d'alarmes V1	Retransmission d'alarmes V2	Téléconduite Hydraulique V1	Téléconduite Hydraulique V2	Téléex
Logements d'astreinte							
GSM							
Citée EDF Lardit							
Siège du GU							
Usine de Lardit							
Usine de Cambeyrac							
Usine de Golinhac							
Barrage de Golinhac							
Usine de Castelnau							
NEC Castelnau							
Barrage de Maury							
Usine de Couesque							

Ce tableau retrace l'impact de l'incident du 17/09 qui n'a touché qu'une partie des aménagements du GU.
Pour l'analyse, il a semblé plus intéressant d'imaginer un scénario de défaillance du réseau opéré à l'échelle du GU car il est plus impactant au niveau de l'organisation. Cf. tableau 2 ci-dessous.

TABLEAU 2 -SIMULATION DE L'IMPACT SUR L'EXPLOITATION EN CAS DE PERTES DU RESEAU OBS SUR LE GU :

Système non opérationnel
Système opérationnel
Sans Objet

Impact sur l'exploitation d'une perte totale du réseau OBS	Diffusion d'alarmes Mode Normal	Diffusion d'alarmes Mode Dégradé	Retransmission d'alarmes V1	Retransmission d'alarmes V2	Téléconduite Hydraulique V1	Téléconduite Hydraulique V2	Téléex
Logements d'astreinte							
GSM							
Citée EDF Lardit							
Siège du GU							
Usine de Lardit							
Usine de Cambeyrac							
Usine de Golinhac							
Barrage de Golinhac							
Usine de Castelnau							
NEC Castelnau							
Barrage de Maury							
Usine de Couesque							

Ce tableau montre que l'architecture actuelle n'est pas complètement robuste à une défaillance du réseau opéré vis-à-vis de la diffusion d'alarmes mais que l'exploitant peut malgré tout y remédier :
La prise d'astreinte la nuit depuis un logement de la cité permet d'assurer correctement le renvoi de la diffusion d'alarmes.
Pendant les heures ouvrables, l'exploitant ne recevra plus les alarmes au siège du GU. Il devra mettre en place un service de quart à l'usine de Lardit pour continuer à recevoir les alarmes pendant les Heures ouvrables.
Cependant si l'organisation du GU permet de faire face à ce type d'aléa ponctuellement, elle pourrait ne plus y faire face si ces aléas étaient trop fréquents ou s'inscrivaient dans la durée. La situation sur ce point est aujourd'hui jugée acceptable.
Le tableau 3 ci-dessous montre que l'organisation pourrait encore être moins impactée pendant les heures ouvrables ou pendant les heures non ouvrables en facilitant l'astreinte sur le périmètre du GU sans être contraint de maintenir toujours une personne à demeure à la citée ou à la centrale de LARDIT pour continuer à recevoir les alarmes

Le tableau 2 montre que les retransmissions d'alarmes entre les aménagements du GU et la centrale de Lardit sont robustes aux défaillances du réseau (opéré ou propriétaire) puisque au moins une des 2 voies reste opérationnelle.
Cette robustesse s'explique par une architecture en boucle ne comportant pas plus d'un maillon opéré.
Ce tableau montre aussi la robustesse du réseau téléconduite (Pas d'impact sur l'organisation).

TABLEAU 3 - OPTIMISATION POSSIBLE DU RESEAU PRIVE EXISTANT :

Non opérationnel
Opérationnel
Sans Objet

Optimisation du réseau privé existant	Diffusion d'alarmes Mode Normal	Diffusion d'alarmes Mode Dégradé	Retransmission d'alarmes V1	Retransmission d'alarmes V2	Téléconduite Hydraulique V1	Téléconduite Hydraulique V2	Téléex
Logements d'astreinte							
GSM							
Citée EDF Lardit							
Siège du GU							
Usine de Lardit							
Usine de Cambeyrac							
Usine de Golinhac							
Barrage de Golinhac							
Usine de Castelnau							
NEC Castelnau							
Barrage de Maury							
Usine de Couesque							

Le tableau 3 montre que la mise en œuvre de la téléphonie entre tous les sites du GU permettrait la mobilité de l'agent d'astreinte sur l'ensemble du GU en utilisant l'infrastructure de supports actuels.
Ce tableau montre que la fonction diffusion d'alarmes n'est pas opérationnelle au siège du GU. Un axe d'amélioration consisterait à mettre en place un lien privé entre la centrale de LARDIT et le siège du GU.

SYNTHESE DE L'ETUDE DE CAS

Cette méthode permet de visualiser très rapidement l'impact d'une défaillance du réseau opéré. Elle pourrait être couplée à une mesure locale de la fiabilité du réseau qui détermine si la situation est acceptable ou non.
Elle peut être étendue à l'impact sur d'autres services et(ou) à l'étude des défaillances de nos propres installations.

Un état des lieux nécessaire
Cet état des lieux parait nécessaire et être une donnée d'entrée importante pour les évolutions des infrastructures TELECOM dans le cadre du projet infrastructure ou de la réflexion actuellement en cours sur la diffusion d'alarme.
La méthodologie du projet infra, demande notamment à la Maitrise d'ouvrage de se prononcer sur les exigences de fiabilité de la transmission des informations nécessaires à la surveillance et à l'exploitation des aménagements. Le niveau de fiabilité des fonctions « acquisition – transmission – diffusion » des alarmes doit intégrer la chaine complète du capteur jusqu'à la prise en compte de l'alarme par l'exploitant.
On ne peut que louer une telle démarche qui fixe une exigence de fiabilité adaptée à nos enjeux. Toutefois, la traduction d'une telle exigence en termes de solution suppose que nous soyons en mesure de l'évaluer concrètement pour chaque site, non plus seulement de manière théorique par des calculs statistiques, mais aussi par la mise en place de l'organisation humaine qui convient lorsque la défaillance du système technique survient.
La fiabilité d'une fonction de surveillance d'ouvrage hydraulique doit s'établir au moment de la conception de la solution technique qui doit l'assurer. La prise en compte des données référencées issues des documents : X, EDD, RS ainsi que les évènements significatifs locaux (ESSH, tempête 99, pertes répétées de services opérateur, éloignement des SAV Edf ou autres, temps de rétablissement contractualisés, etc.,) doivent être les données d'entrée pour structurer la solution technique.

Thème E

REX des incidents et des dys-fonctionnements des barrages vannés



Expertise de vanne sur le barrage de La Vanelle
© EDF – Philippe GROLLIER

ENSEIGNEMENTS TIRES DES EVENEMENTS IMPORTANTS POUR LA SURETE HYDRAULIQUE (EISH) ET ELEMENTS DE RETOUR D'EXPERIENCE SUR LES ORGANES HYDROMECANIQUES ET DE CONTROLE COMMANDE DES BARRAGES

Lessons learnt from important events to hydraulic safety and elements of return of experience on hydromecanics and control system features of dams

Clément GASTAUD
Bureau d'Etude Technique et Contrôle des Grands Barrages (BETCGB)
44 avenue Marcelin Berthelot, 38030 Grenoble Cedex 02, France
clement.gastaud@developpement-durable.gouv.fr

Annelaure GAUTHIER
Bureau d'analyse des risques et pollution industriels (BARPI) - 5 place Jules Ferry, 69006 Lyon, France
annelaure.gauthier@developpement-durable.gouv.fr

MOTS CLÉS
Accidentologie, vanne, contrôle-commande, sûreté, ARIA, analyse des causes, perturbations, causes profondes, REX.

RÉSUMÉ
Le partage et l'exploitation des informations et enseignements tirés de l'analyse des incidents et accidents constituent des éléments fondamentaux du processus d'amélioration continue de la prévention des risques. L'arrêté du 21 mai 2010 impose aux propriétaires l'obligation de déclarer les EISH ainsi que, pour les barrages de classe A et B, les PSH (précurseurs pour la sûreté hydraulique). Une analyse des causes doit ensuite compléter la déclaration « à chaud ».
Depuis juillet 2010, les informations recueillies sur les événements relatifs aux barrages - et en premier lieu les EISH – sont enregistrées dans la base de données ARIA (analyse, recherche et informations sur les accidents). La consultation de cette base, accessible au public via le site www.aria.developpement-durable.gouv.fr, permet d'obtenir des éléments sur le retour d'expérience des accidents technologiques ainsi que les résumés des événements.
Fin 2014, ARIA recense 304 événements concernant les ouvrages français ou étrangers. Si cette base de données n'est pas vouée à une exploitation statistique (taille réduite de l'échantillon, problèmes de représentativité), elle permet le partage par tous des enseignements tirés de l'analyse des accidents. A l'issue de ces premières années de mise en place du dispositif, une analyse des informations reportées dans la base de données ainsi que celles connues du BETCGB peut être établie afin de donner, notamment concernant les organes hydromécaniques et de contrôle commande des barrages, un panorama qualitatif et quantitatif des éléments de REX disponibles.
A travers quelques exemples - s'intéressant plus particulièrement aux domaines des automatismes et des équipements hydromécaniques - il est possible de mettre en évidence la manière dont une analyse du retour d'expérience permet de s'intéresser aux causes profondes d'une défaillance.

ABSTRACT
Sharing and use of information and lessons learned from the analysis of incidents and accidents are fundamental elements of the continuous improvement of risk prevention process. The decree of 21 May 2010 imposes a duty on owners to report IESH (Important Events for Hydraulic Safety) and, for class A and B dams, the PSH (Precursors of Hydraulic Safety). A root cause analysis must then complete the on-the-spot statement. Since July 2010, informations collected on events related to dams - and primarily the IESH - are recorded in the ARIA database (analysis, research and information on accidents). The consultation of this database, accessible to the public via the www.aria.developpement-durable.gouv.fr site, provides feedback from technological accidents and summaries of events. End of 2014, ARIA lists 304 events concerning French or foreign structures. If the database is not doomed to a statistical analysis (reduced sample size, representativeness problems), it allows the sharing by all of lessons learned from the accident analysis. After these first years of implementation, an analysis of the informations reported in the database and of the BETCGB' knowledge can be established to provide, particularly concerning gated dams, a qualitative and quantitative overview REX items available.
Through some examples - focused in the areas of automation and hydromechanical equipment - it is possible to show how an analysis of feedback allows to focus on the root causes of a failure.

1. INTRODUCTION

Afin de s'interroger sur la robustesse et la pertinence des règles en usage pour la conception, le dimensionnement et l'exploitation des barrages, ou après un accident, l'analyse des accidents et incidents affectant les ouvrages hydrauliques est un souci constant de la profession. Il fait l'objet de publications régulières. Les bulletins 99 et 109 [1] de la CIGB, largement exploités et diffusés, sont régulièrement cités dans le cadre des études de dangers. Plus récemment, le colloque organisé par le CFBR en 2011, concernant les études de dangers, a donné lieu à une présentation du dispositif réglementaire français de recueil des événements importants pour la sûreté hydraulique (EISH) et des précurseurs de la sûreté hydraulique (PSH) [2].

Fort heureusement aux regards des enjeux, les accidents demeurent peu nombreux. Chaque ouvrage n'est généralement concerné que par un faible nombre d'incident. La réflexion unitaire doit pouvoir s'appuyer sur les enseignements tirés du retour d'expérience (REX) accumulé sur le plus grand nombre d'ouvrages et équipements similaires, en France ou à l'étranger. Bien entendu, les similarités ne sauraient être cantonnées à la typologie de l'ouvrage, voir même, au seul domaine des ouvrages hydrauliques, mais doivent être abordées en termes de composants ou d'éléments fonctionnels ainsi que de mode d'organisation tout particulièrement en ce qui concernent les domaines du contrôle-commande et des équipements hydromécaniques [2].

Ce travail suppose d'avoir accès à une information concernant un grand nombre d'événements et un REX permettant de sélectionner les événements dont les similarités permettront d'en utiliser les enseignements. Cela, sachant que chaque barrage est généralement un prototype, résultat unique de l'utilisation de techniques variées, assemblages d'équipements et de technologies diverses. On remarquera à ce sujet que l'utilisation des seules données statistiques mondiales, voire de liste d'accidents ou d'incidents, sans en retirer une analyse spécifique ne saurait alors être suffisant [2] [3]. Cette remarque est d'autant plus prégnante lorsque l'on s'intéresse à des équipements spécifiques comme les vannes ou les dispositifs de contrôles commandes (au sens large) des barrages.

2. GENERER ET PARTAGER UN RETOUR D'EXPERIENCE

2.1. Accident, incident : l'intérêt de s'intéresser à l'ensemble des événements

Il est souvent d'usage de définir par accident tout événement conduisant à des conséquences graves pour les biens ou les personnes et par incident tout événement sans conséquences matérielles graves. Il est également possible s'agissant des barrages de ne parler d'accident que pour des ruptures d'ouvrages – conduisant, par la vidange incontrôlée de la retenue, à des conséquences graves mais pas systématiquement – et d'incidents pour des événements n'ayant pas conduit à la rupture de l'ouvrage ou la vidange de la retenue. Les publications de la CIGB font ainsi généralement référence à des ruptures majeures (impliquant l'abandon de l'ouvrage ou ayant permis une réparation, respectivement F1 et F2) ou à des accidents distinguant se produisant dans la vie de l'ouvrage, lors de la mise en eau ou à la construction (respectivement A1, A2 et A3). Les scénarios accidentels ne sont que très rarement le résultat d'une cause unique mais généralement la conjonction de défaillances matérielles, organisationnelles ou humaines qui prises séparément seraient sans conséquences mais dont l'enchainement dans certaines circonstances cause l'accident. Tous les événements, que leurs conséquences soient graves ou non, permettent de construire un retour d'expérience pour l'amélioration de la sûreté.

2.2. Contrôle commande et organes hydromécaniques : analyser les signaux faibles

S'agissant des dispositifs de contrôles-commandes et des organes hydromécaniques, il convient de remarquer qu'en l'absence de crue, a fortiori d'une crue importante, la défaillance d'un dispositif de sécurité ne généra pas systématiquement des conséquences graves. On pourrait donner en exemple ici la perte d'une alimentation électrique d'organes de crue qui tant qu'il n'y aura pas nécessité de manœuvrer ces organes restera sans conséquences. L'étude de cette défaillance n'est cependant pas sans intérêt ; le retour d'expérience est généralement largement transposable à une situation de crue. Un dispositif présentant un risque de défaillance en temps normal verra généralement ce risque aggravé lors d'une crue significative générant des sollicitations importantes dans une situation rarement observée.

Par ailleurs, les barrages, particulièrement les grands barrages, étant conçus pour résister à des crues d'occurrences rares il est logique de n'observer qu'un nombre réduit d'événements ayant des conséquences graves avec pour initiateur une défaillance de leurs organes de sécurité. Les travaux de l'US National Research Council (1983) estiment à 2% le nombre de barrage en remblais ayant subi un accident en raison d'un dysfonctionnement de leurs vannes [4]. Dans le cadre de ses recommandations concernant la fiabilité des évacuateurs de crue, en s'appuyant sur l'analyse de différents scenarios accidentels, l'ANCOLD montre que l'accident résulte généralement de la combinaison de défaillance de différentes barrières matérielles et organisationnelles [5]. Ces défaillances seules ou dans d'autres circonstances n'auraient pas conduit à l'accident.

Partant, il est évidemment nécessaire pour produire un REX pertinent, intéressant les grands barrages, de s'intéresser aux événements sans conséquences, mais également aux événements concernant des barrages plus modestes qui constituent un ensemble de signaux faibles dont le traitement permet de faire progresser la sûreté. On ajoutera que la mobilisation autour du recueil et de l'analyse de ces signaux faibles est de nature à alimenter une dynamique d'amélioration de la sûreté à travers la démarche d'analyse des scénarios accidentels et donc de renforcement de la résilience des structures et des organisations.

2.3. L'analyse des causes.

Pour analyser l'origine d'un événement afin d'éviter sa récurrence, il faut en premier lieu refuser de concevoir un événement comme le résultat d'un concours de circonstances malheureux. De plus, une erreur humaine ne peut pas être la seule cause profonde d'un événement. Seules des analyses en profondeur des événements permettent de définir des mesures qui corrigeront durablement la situation. Elles consistent en une démarche systématique et organisée. L'objectif est de tirer les enseignements sur les causes des événements, leur déroulement et leurs conséquences. Idéalement, elle doit permettre d'adopter les mesures correctives les plus appropriées. Il est important dans cette réflexion de ne pas chercher à définir des responsabilités ni de déterminer les coupables.

Il existe aujourd'hui de nombreuses approches ayant comme objectif d'expliquer un événement a posteriori [13]. Dans tous les cas, l'enjeu des analyses est de comprendre pour agir et de partager les analyses pour aider à la prise de conscience, par les personnes concernées, des mécanismes de défaillances techniques, humaines et organisationnelles engagés. Un événement doit donc être considéré dans sa profondeur, en couches superposées. Si les premières couches sont accessibles au regard, on n'accède aux secondes que par l'analyse approfondie. L'analyse de la séquence d'un événement peut alors faire apparaître les perturbations (ou causes premières) et les causes profondes. Il est essentiel de ne pas les confondre.

Les perturbations désignent les défaillances directes qui ont contribué à l'événement étudié. Elles sont accessibles à l'observation (vues, entendues, senties). Ce niveau de causalité présente souvent un caractère technique ou humain. Les causes profondes, situées en amont des causes apparentes, sont des dysfonctionnements du système sociotechnique où s'est déroulé l'accident. Elles renvoient généralement à des dimensions relevant des facteurs humains et des dimensions organisationnelle et managériale. Accéder aux causes profondes, c'est être capable d'identifier les facteurs de fond de l'exploitation (ex : défaillances des barrières de défense en profondeur) qui ont créé des conditions accidentogènes dans la situation de travail. Ce souhait de compréhension fine conduit nécessairement l'analyse vers les aspects collectifs (collaboration, communication), l'organisation du travail, le mode de management, la gestion des priorités, sans négliger l'état physique et mental des personnels, l'environnement social et technique du travail. La méthode d'analyse utilisée par les ingénieurs du bureau d'analyse des risques et pollutions industriels (BARPI) [6] vise à mettre en lumière perturbations et causes profondes. Voici quelques perturbations types dont on peut donner l'exemple.

- les défauts matériels sont fréquemment présents dans les accidents. Exemple : rupture d'une vis sous l'effet de la corrosion, brèche provoquée par de l'érosion interne, colmatage d'une conduite par des embâcles, blocage d'une vanne vétuste…
- les agressions externes. Dans ce type de perturbation, on retrouve les agressions d'origine naturelle, (foudre ; glissement de terrain, épisodes de crue) ainsi que des agressions d'origine anthropique peuvent être rencontrées (perte d'utilités externes (énergie, télécommunications...) agression par un barrage amont, choc de bateau…)
- les interventions humaines qui se caractérisent soit par des actions requises qui n'ont pas été effectuées, soit par des actions effectuées mais non requises. Pour les perturbations de cette nature, il faut distinguer les erreurs involontaires des transgressions volontaires.

L'identification de ces perturbations permet de pointer le fait qui a affecté le fonctionnement des installations aboutissant au phénomène dangereux. Ces causes premières permettent de comprendre comment s'est déroulé l'événement, mais pas pourquoi. Comme explicité précédemment, pour que le retour d'expérience ait une forte valeur ajoutée, il faut analyser ce qui est à l'origine de ces perturbations. Les familles de causes profondes auxquelles font appel les ingénieurs du BARPI dans l'examen d'un accident sont par exemple :

- **les conditions de travail des opérateurs**. Lorsqu'une intervention humaine est à l'origine d'un phénomène dangereux, il peut être utile de s'interroger sur la formation et la qualification des personnes, l'adéquation des procédures et consignes ou bien encore l'ergonomie de l'espace de travail. Une réflexion sur l'organisation du travail et l'encadrement (répartition des tâches, définition rôles et responsabilités...) et sur l'environnement psychosocial de travail peuvent également apporter des éléments de réponse.
- **des défaillances dans la gestion des risques** font parties des facteurs organisationnels fréquemment impliqués dans les accidents. L'organisation peut par exemple présenter des lacunes dans l'identification des risques liée à son activité, du fait d'analyse des risques insuffisante. Le choix des équipements, au niveau de leur dimensionnement ou de leur matériau, peut également s'avérer inapproprié à leur condition de fonctionnement. Ou bien encore c'est l'organisation des contrôles qui peut ne pas être suffisamment robuste de par des fréquences inadaptées ou l'absence de prise en compte de résultats. Enfin, certaines organisations présentent une carence en culture de sécurité, à différents niveaux hiérarchiques.
- **des facteurs impondérables** peuvent aussi déclencher des accidents. Il s'agit par exemple d'actes de malveillance. On retrouve ici des phénomènes dangereux qui ne pouvaient pas être connu de l'exploitant au moment de son analyse des risques. Il s'agit par exemple de phénomènes physiques ou chimiques qui n'ont pas encore été mise en évidence (non connu de la profession), ou de vice de fabrication non identifié.

2.4. EISH – PSH : dispositif réglementaire

Le recueil d'information d'accidentologie en France dans le domaine des ouvrages hydrauliques ne débute pas uniquement avec la publication de l'arrêté ministériel du 21 mai 2010 [7]. On peut notamment citer les dispositifs internes mis en place par les grands maitres d'ouvrages. Les dispositions pratiques mises en œuvre au sein de l'administration avec la circulaire du 23 juillet 2006 conduisant déjà à la déclaration des EISH pour les barrages relevant du régime de la concession. C'est à la suite du bilan de ce processus de recueil établi par un groupe de travail conduit par la Direction Général de la Prévention des Risques (DGPR) du Ministère de l'Ecologie du Développement Durable et de l'Energie (MEDDE) que ce dispositif a été élargi aux barrages autorisés par l'arrêté pris en 2010, texte élargissant le dispositif en instituant également les PSH.

2.4.1. Les EISH

L'arrêté ministériel du 21 mai 2010 impose la déclaration comme EISH l'ensemble des accidents et incidents concernant des barrages classés (au sens du décret du 11 décembre 2007) relatif à la sûreté des ouvrages hydrauliques et de l'article R214-112 du Code de l'Environnement) *« relatifs à une action d'exploitation, au comportement intrinsèque de l'ouvrage ou à une défaillance d'un de ses éléments, lorsque de tels évènements ont au moins l'une des conséquences suivantes : atteinte à la sécurité des personnes (accident, mise en danger ou mise en difficulté) ;dégâts aux biens (y compris lit et berges de cours d'eau et retenues) ou aux ouvrages hydrauliques ; pour un barrage, une modification de son mode d'exploitation ou de ses caractéristiques hydrauliques (cote du plan d'eau …). »*

2.4.2. Les PSH

Doivent être déclarés comme PSH, selon la définition fixée par l'arrêté du 21 mai 2010 [3] est la suivante : *«Evénements précurseurs ou évolutions pouvant avoir un impact en termes de sûreté hydraulique. Sont concernés les dysfonctionnements liés aux défaillances de « barrières de sécurité », identifiées dans une étude de dangers, pouvant entraîner la perte de fonctions de sécurité du type « retenir l'eau », « maîtriser la cote de la retenue à l'amont de l'ouvrage » ou « maîtriser le débit relâché à l'aval ». Les PSH sont notamment destinés à alimenter une base de données et à faciliter la réalisation et la lecture critique de l'étude accidentologique requise dans les études de dangers des barrages.* »

De fait, la déclaration des PSH concerne la communication des évènements n'ayant pas entrainé de conséquences significatives (donc non classés comme EISH) mais qui concernent des composants ou fonctions importantes de l'ouvrage pour la maitrise des risques. Il peut donc s'agir d'événements qui, dans des circonstances différentes (par exemple en crue), aurait pu conduire à des conséquences graves.

La réglementation a fait le choix d'adosser le dispositif de déclaration des PSH aux exigences de production d'une étude de dangers formalisant une analyse de risque pour les barrages de classes A et B et identifiant pour chaque scénario accidentel des barrières de sûreté. Au-delà des considérations réglementaires, l'expérience de l'analyse d'un nombre important d'études de dangers ou de déclaration de PSH établies par des rédacteurs variés permet de constater une importante diversité dans la formalisation des analyses de risques et donc dans la définition de la notion de barrière et de leur contenu. L'objectif de la réglementation ne sauraient donc être perdu de vue par une interprétation formaliste restrictive au risque de faire perdre l'intérêt collectif du dispositif qui est d'alimenter le REX grâce au recueil des informations concernant les presque accidents et précurseurs d'accidents.

2.5. L'organisation du recueil des EISH – PSH : enseignements et perspectives.

Le recueil des événements repose sur un processus de déclaration à l'administration par les responsables des ouvrages, donnant lieu à un classement selon une échelle de gravité [2], ainsi qu'à des échanges permettant d'établir une analyse des causes. Cette analyse des causes, selon la complexité de l'événement, peut dans certains cas nécessiter des investigations de la part du responsable de l'ouvrage. Le processus de recueil du REX est décrit par la figure 1. Dès la connaissance d'un événement par l'administration, celui-ci fait l'objet depuis 2010 d'un enregistrement dans la base ARIA par le BARPI, conjointement avec le BETCGB.

Délais de déclaration des PSH et EISH :
Les événements doivent faire l'objet d'une déclaration sous des délais d'autant plus brefs que la gravité des conséquences est importante : *immédiat pour les EISH rouge et dans les meilleurs délais sans excéder une semaine pour les EISH orange, sous un mois pour les EISH jaune. Les PSH doivent être déclarés a minima au pas annuel, accompagnés d'une analyse des causes.*

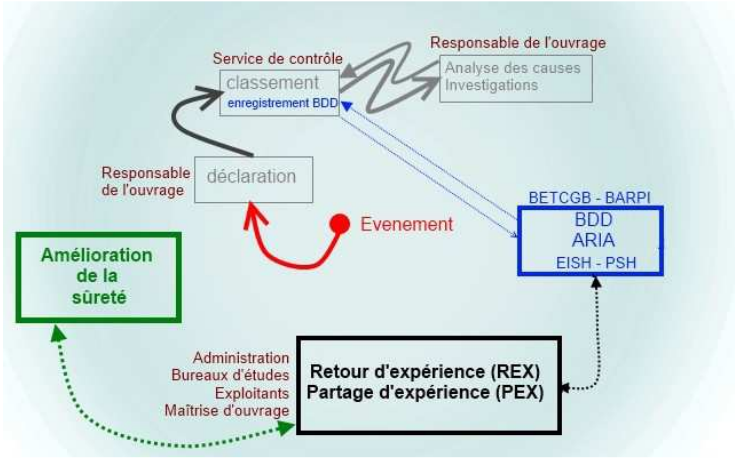


Figure 1: *Processus d'élaboration du REX à partir des EISH / PSH : recueil et échanges entre acteurs*

Le groupe de travail de 2009 sur les EISH a établi une fiche modèle de déclaration [2]. Elle donne les bases d'une déclaration d'un événement et invite à l'analyse des circonstances, des conséquences, des domaines fonctionnels concernés ainsi qu'à la recherche des enseignements tirés. Cette fiche est désormais d'usage courant, ce qui permet d'établir une première catégorisation des circonstances et causes premières des événements. La déclaration faisant immédiatement suite à l'événement ne peut dans bien des cas établir une analyse suffisamment profonde des causes profondes de l'événement. La première étape de communication de l'événement, essentiellement descriptive, doit donc être accompagnée d'une seconde étape d'analyse, établissant avec certitude aussi bien les causes premières (les perturbations) que les causes profondes de l'événement.

S'agissant des EISH déclarés jusqu'à présent il est rare que les analyses ultérieures établissant les causes profondes de l'incident fassent également l'objet d'une formalisation et d'une transmission à l'administration. De fait, les déclarations d'EISH demeurent pour le moment essentiellement descriptives et centrées sur la défaillance de composants matériels des installations. L'analyse des causes et la description des mesures correctives sont autant de points qui restent dans la plupart des cas documentées partiellement, ne reprenant que les éléments connus lors de la déclaration. Quelques cas ont cependant fait l'objet d'analyses complémentaires.

Un nombre significatif d'événements ne mettent pas directement en cause la sûreté des ouvrages hydrauliques : il s'agit notamment des mises en danger de personnes dans le cadre du fonctionnement normal d'une installation.

Ceci est dû à l'historique du dispositif EISH dont le but initial était une communication vers le public, d'urgence et de pédagogie, sur les dangers à l'aval des installations hydrauliques. Ces événements, s'ils participent à l'appréciation du risque aval, problématique majeur vis-à-vis de la sécurité des personnes, n'apportent souvent que peu d'information en termes de scénarios accidentels pouvant affecter l'ouvrage.

Le BETCGB a conduit en 2015 une analyse sur un recueil des PSH de 2013 transmis par les services de contrôle. La très grande variabilité des contenus et des événements concernés ne permet pas d'intégrer tous ces événements à la base de données ARIA. De façon générale, l'analyse des déclarations permet de constater que le niveau de description et a fortiori d'analyse est très notablement réduit par rapport aux déclarations d'EISH, se réduisant à la défaillance matérielle observée. L'identification des conséquences potentielles et des scénarios accidentels redoutés n'est pas systématique. Le périmètre de déclaration est très variable selon les responsables d'ouvrages, en raison des divergences d'interprétation de la notion de barrière de sécurité ou de perte de barrière de sécurité ainsi que par l'hétérogénéité des analyses de risques conduites dans le cadre des études de dangers.

Depuis 2010, près de 200 EISH ont fait l'objet d'une déclaration. L'extension du dispositif au parc des ouvrages autorisés n'a pas réellement conduit à une augmentation du nombre de déclarations qui reste stable autour d'une quarantaine par an. La majorité (54%) des EISH déclarés concernent des ouvrages concédés. Le processus de recueil, encore jeune, connaît des difficultés de remontée des informations ; soit les événements ne font pas l'objet de déclaration, soit la transmission aux services de contrôle puis aux services d'appui technique n'est pas encore pleinement opérationnelle. En toute logique, les déclarations de PSH concernent un nombre d'événements notablement plus important que les EISH.

Aussi bien concernant les EISH que les PSH, les premières années de fonctionnement du dispositif permettent de constater un tropisme à se limiter à l'identification des causes matérielles. Les inspections des services de contrôle peuvent être l'occasion d'approfondir l'analyse des événements observés et d'améliorer notablement la richesse du retour d'expérience.

2.6. La base ARIA ; Analyse, Recherche et Information sur les Accidents.

Le site internet www.aria.developpement-durable.gouv.fr permet d'accéder aux différentes productions du BARPI. Ce site héberge également la base de données ARIA, noyau dur de la capitalisation du retour d'expérience qui recense 46 000 évènements concernant un large périmètre d'activités concernées. Les professionnels et le public peuvent donc explorer la base à l'aide d'un moteur de recherche. Afin d'encourager les efforts de partage des informations, le principe de l'anonymat s'applique à l'ensemble des accidents figurant dans les publications. Seul le nom de la commune est communiqué pour permettre les recherches par critères géographiques.

La recherche d'événements dans la base ARIA peut s'effectuer de différentes façons. Plusieurs filtres sont proposés. Le filtre principal permet de définir les critères les plus larges. La recherche peut alors s'effectuer par date, par période ou par lieu ; il est possible de cibler la recherche sur les ouvrages hydrauliques en sélectionnant ce champ dans l'onglet « Type d'événement ». La mise en cause de la sécurité hydraulique peut également être un critère de recherche en sélectionnant ce champ dans l'onglet « Phénomène ». Une fois ce critère coché, il est possible d'effectuer une recherche plus précise encore en sélectionnant le champ « EISH ». Cette sélection permet de n'obtenir que les événements ayant fait l'objet d'une déclaration d'EISH au sens de l'arrêté du 21 mai 2010. Les filtres secondaires permettent d'employer des critères supplémentaires : selon de mots clés (présent ou absent) du résumé, selon les conséquences humaines, environnementales ou économiques (onglet conséquence). Enfin, il est possible de n'étudier que les événements initiés par certaines familles de causes premières ou profondes.

La base ARIA a initialement été conçue pour rassembler des informations sur les accidents industriels, en particulier pour les activités visées par la nomenclature des installations classées. Afin d'assurer un retour d'expérience le plus large possible dans le domaine de l'hydraulique, le périmètre de saisie dans ARIA inclut les évènements qui ont fait l'objet d'une déclaration EISH ou, dans certains cas, PSH ainsi que ceux vérifiant les critères et en attente de déclaration. Des événements par nature non-déclarés – par exemple survenus à l'étranger ou sur un ouvrage n'entrant pas dans la nomenclature « loi sur l'eau » mais apportant un retour d'expérience transposable, sont également inclus

Les sources d'information sont variées. Ainsi, les services de contrôle s'intéressent en premier lieu aux causes de l'accident dans une perspective de prévention à la source. Les services de secours privilégient la chronologie des faits et apportent des enseignements précieux sur la cinétique de développement du sinistre et les difficultés d'intervention rencontrées. Enfin, les médias reflètent enfin le regard de la société sur l'évènement.

3. SYNTHESE DU REX DES OUVRAGES VANNES ET DU CONTROLE-COMMANDE

Les résultats d'une synthèse du REX présentés sous forme de statistiques ci-après le sont par rapport à des échantillons rassemblant des événements pour lesquels l'information est connue. Selon le type d'information, les échantillons sont donc variables. Les pourcentages ne sont donc indicatifs que de proportion et non de statistique.

3.1. De l'utilisation probabiliste d'informations quantitatives

Notre travail nous conduit à présenter une description quantitative des événements, notamment en termes de sous-ensemble fonctionnels. Une mise en garde s'impose contre une exploitation statistique d'une base de données. Ce serait une erreur que d'établir des lois probabilistes en considérant assimilables les modes de défaillances de chacun de ces sous-ensembles.

- D'une part, cela reviendrait à étendre de façon imprudente à l'ensemble des ouvrages les lois observées sur les seuls ouvrages concernés sans tenir compte des inévitables biais importants inhérents à la composition de ces bases de données qui ne peuvent être exhaustives.
- D'autre part, cela reviendrait à nier la diversité des conceptions, des modalités d'exploitation et de sollicitation des barrages et de leurs équipements. Un même équipement selon l'architecture à laquelle il est intégré, son environnement, ses conditions de maintenance, de surveillance et d'exploitation peut avoir un comportement tout à fait différent [3].

3.2. Résultat de l'analyse des bases de données

De même que les scénarios accidentels intéressant les barrages poids [8] ou encore les fondations de barrages [9] l'analyse des incidents impliquant des organes hydromécaniques a fait l'objet de diverses publications du CFBR au cours des années 1990 [10] ou de communication récente [11]. A l'étranger, le récent bulletin de recommandation de l'Ancold pour la fiabilité des évacuateurs de crues, sur la base des travaux de (Hobbs, 2003) exploitant une soixantaine d'incidents concernant des vannes, donne par exemple une répartition statistique indicative des domaines impliqués (fig 4). Il est intéressant de remarquer que dans son analyse Hobbs cite explicitement les facteurs humains. L'exploitation de la base ARIA et des bases de données documentées par le BETCGB dont le contenu est présenté ci-après permettent de produire des analyses similaires et de préciser l'importance des domaines du contrôle-commandes et des organes hydromécaniques dans les événements observés et recensés.

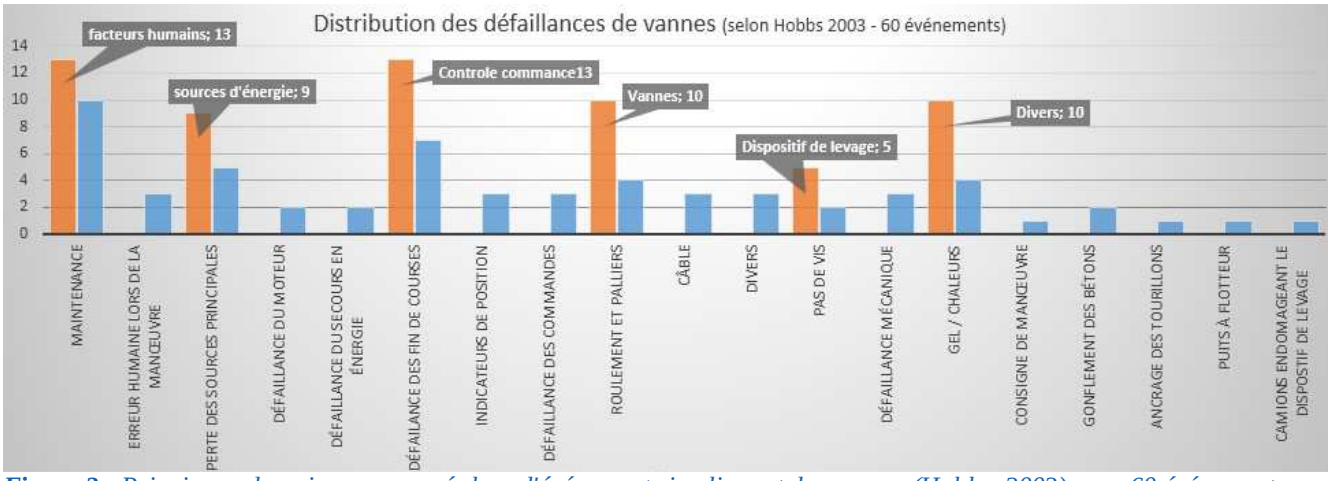


Figure 2 : *Principaux domaines concernés lors d'événements impliquant des vannes (Hobbs, 2003) - sur 60 événements*

3.2.1. ARIA : le REX des barrages

Au regard des critères de sélections évoqués précédemment il apparaît logiquement que sur les 228 événements concernant des barrages, 211 portent sur une mise en cause de la sureté hydraulique. Plusieurs phénomènes dangereux peuvent être présents au cours d'un même événement. Leurs occurrences sont représentées en figure 3.

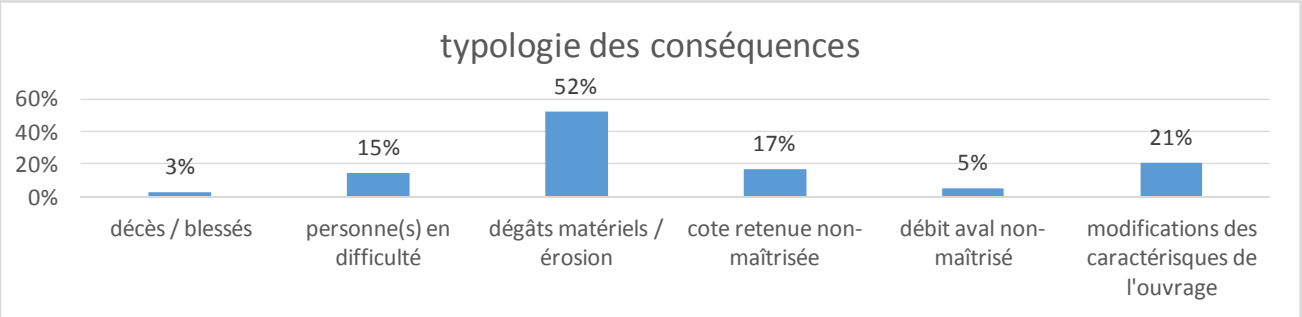


Figure 3 : ARIA, événements importants pour la sûreté hydraulique – type de conséquence

Un tiers des événements concernent un défaut de maîtrise de la cote amont, de la fonction retenir l'eau ou de la maitrise du débit relâché pouvant impliquer des organes hydromécaniques ou de contrôle commande.

Sur 228 événements enregistrés, 179 ont fait l'objet d'une déclaration d'EISH au sens de l'arrêté du 21 mai 2010. Le niveau de classement retenu n'est pas toujours renseigné dans la base, notamment pour les premiers cas saisis. Le tableau n°2 montre que 77% des EISH dont le niveau a été renseigné dans ARIA sont de niveau jaune.

Niveau EISH retenu	Nombre	Pourcentage (sur total des renseignés)
Jaune	113	77%
Orange	32	22%
Rouge	2	1%

Tableau 1: Classement des EISH.

Comme développé précédemment, l'analyse des causes d'un accident peut comporter différents niveaux d'étude. L'identification des causes premières, ou perturbations, est l'étape la plus fréquemment effectuée. Ainsi sur les 228 cas étudiés, 192 événements ont au moins une perturbation identifiée dans la base. L'identification des causes profondes n'apparaît pas systématiquement dans les sources exploitées par le BARPI. Certaines sont néanmoins été identifiées pour 135 événements sur les 228 enregistrés dans la base (tableau n°3). Plusieurs causes profondes peuvent être à l'origine d'un phénomène dangereux.

Causes profondes	*Nombre*	*Pourcentage (sur total des renseignés)*
Facteurs humains, dont :	2	1%
- facteur personnel (négligence, distraction, maladresse, oubli...)	2	1%
Facteurs impondérables	4	3%
- malveillance	2	1%
- phénomène inconnu au moment de l'accident	1	1%
Facteurs organisationnels	180	133%
- conditions de travail des opérateurs	26	19%
* organisation du travail et encadrement	18	13%
* procédures et consignes	5	4%
* formation et qualification des personnels	2	1%
* ergonomie inadaptée	1	1%
- gestion des risques	154	114%
* organisation des contrôles	29	21%
* choix des équipements et procédés	15	11%
* identification des risques	15	11%
* REX insuffisant	14	10%
* culture de sécurité insuffisante	8	6%
* communication	6	4%

Tableau 2: Causes profondes.

3.2.2. Base accident du BETCGB :

BETCGB entretient une veille pour enregistrer les accidents (rupture de barrages et accidents graves des catégories F1 et F2 ainsi que A1, A2 et A3 au sens de la CIGB) se produisant en France et dans le monde. Cette veille médiatique et technique utilisant les retours d'expérience publiés ainsi que les informations diffusées via la CIGB a permis de constituer à ce jour une base accident de 706 événements sur la période 1799-2014 et concernant 57 pays. Du fait des modalités de recueil, le niveau de connaissance des scénarios accidentels est bien évidemment variable selon les accidents allant d'une connaissance très sommaire (date, lieu et type d'ouvrage au moins, pour 77% des cas) à une analyse précise des causes notamment lorsque l'accident a fait l'objet de communication scientifique ; cette base de données ne peut viser ni à l'exhaustivité ni à une représentativité statistique solide de l'accidentologie mondiale.

Une analyse de cette base de données permet de situer de façon qualitative l'importance du domaine du contrôle-commande et des organes hydromécaniques comme causes du scénario de rupture (fig 4).

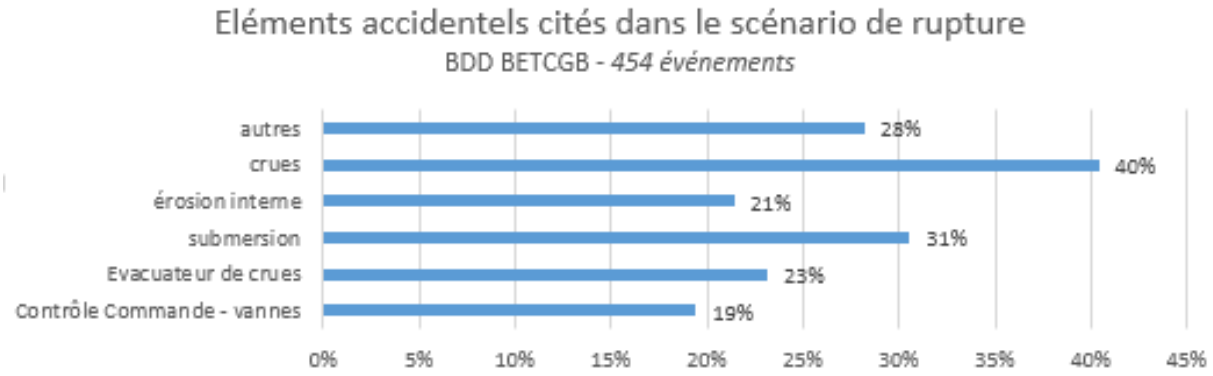


Figure 4 : Base de données accidents BETCGB – éléments accidentels cités dans le scenario de rupture

Si l'on retrouve très logiquement les crues et la submersion comme causes premières des scénarios accidentels (ce qui est assez logique en considérant que 77% des accidents documentés dans cette base de données concerne des barrages en remblais), le domaine des organes hydromécaniques et de leur contrôle-commande demeure un facteur de cause important dans les scenarios accidentels puisqu'il est cité pour près d'un événement sur 5 ; dans près de 40% de ces cas, l'accident se produit dans un contexte de crue.
On pourra observer que pour 27 cas sur les 194 ruptures lors d'une crue (14%) et que pour 33 cas sur les 140 ruptures de barrage dues à une submersion (23%) les scénarios accidentels pointent une défaillance des organes de crues. Il s'agit là d'une proportion importante si l'on considère que la grande majorité des ouvrages ne comporte que des évacuateurs de crues passifs. A titre indicatif, la proportion d'évacuateurs de crue passifs varie entre respectivement 54% et 77% pour les ouvrages concédés [12] et autorisés en France. Par comparaison, une synthèse des analyses de risques conduites dans le cadre des Etudes de Dangers de barrages en France identifie comme événement initiateur critique une défaillance au niveau de vannes ou de leur contrôle commande dans 15% des cas [14].

3.2.3. Base incident du BETCGB

Cette base « incident » est alimentée par les événements ne conduisant pas à une rupture, c'est-à-dire principalement les EISH et PSH recueillis depuis 2006 et des événements connus par le BETCGB dans le cadre de ses missions d'appuis, mais également les événements tirés de publications scientifiques. Comme toujours, le nombre d'événements renseignés est limité par la capacité de recueil et de traitement, notamment pour l'introduction des événements antérieurs aux dispositifs de déclaration des EISH, ne permettant pas à ce jour de disposer d'une base de données intégrant l'exhaustivité des événements connus par l'administration. Le travail réalisé à ce jour a cependant permis d'enregistrer près de 400 événements (concernant 36 pays, 95% des événements sont postérieurs à 2000) composés pour majorité d'EISH (20%) et de PSH (40%). L'alimentation de cette base de données dans le cadre du travail présenté ici a nécessairement conduit à une alimentation préférentielle par des éléments concernant les organes hydromécaniques ou de contrôle-commande introduisant mécaniquement un biais statistique dans la représentation de ces événements au sein de cette base de données.

Sur les quelques 200 EISH déclarés depuis 2008 relus par le BETCGB, 70 événements intéressent au moins l'un des champs du domaine des organes hydromécaniques ou du contrôle commande, soit près de 30% des événements déclares, ce qui est cohérent avec la distribution des événements de la base de données accident du BETCGB. Cette proportion est bien plus importante si l'on considère les événements ayant fait l'objet d'une déclaration de PSH puisque sur les 153 PSH déclarés analysés, 19% se rapportent à un événement concernant des organes hydromécaniques, 20% concernent les alimentations en énergie, 56% concernent les automatismes/contrôle-commande et 5% les dispositifs d'auscultation. Cette analyse met en évidence l'intérêt majeur du dispositif de recueil des PSH pour permettre une analyse des scénarios accidentels impliquant des équipements de contrôles-commandes ou des organes hydromécaniques sur la base de ces signaux faibles.

3.3. Organes hydromécaniques et système de contrôle-commande : description statistique générale du REX

3.3.2. Base accident BETCGB

L'analyse de la base de données selon la structuration proposée par la CIGB [1], en intégrant notamment les cas qui y sont développés, permet d'imputer dans 21% des cas l'origine de la rupture aux ouvrages annexes, intégrant notamment les vannes et organes de contrôle commande. La figure 5 donne une décomposition des facteurs de causes concernant ces accidents. Le mauvais fonctionnement des organes d'évacuation est la première des causes principales citées.

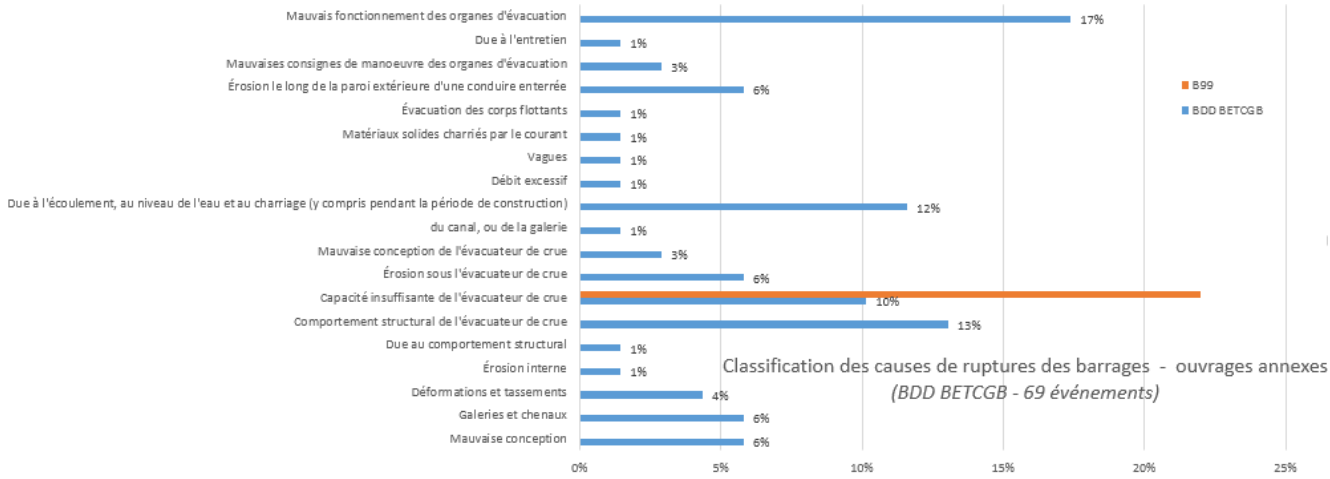


Figure 5 : *Ruptures de barrages : cause principale de rupture ; ouvrages annexes (NB : les items sans occurrence dans la base de données ne sont pas représentés)*

3.3.3. Base de données incidents du BETCGB

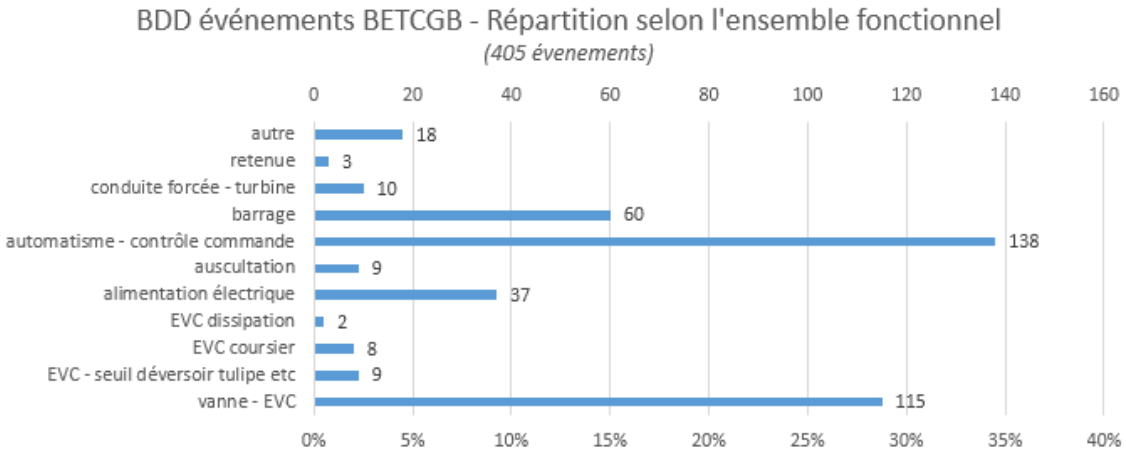


Figure 6 : *Répartition des ensembles fonctionnels*

A un premier niveau d'analyse, il est intéressant de mettre en évidence pour chaque événement le principal ensemble fonctionnel concerné par l'événement. Pour les besoins de l'étude nous nous sommes appuyés sur une décomposition analytique simple concernant respectivement les organes hydromécaniques, les alimentations électriques et les équipements de contrôle-commande (figure 6).

S'agissant des organes hydromécaniques, on note (figure 7) que l'ensemble de la chaine cinématique ainsi que les actionneurs et les dispositifs de sécurité / protection (par exemple limiteur de couple) représentent la majeure partie des événements enregistrés. Pour autant l'ensemble des ensembles fonctionnels est ici représenté.

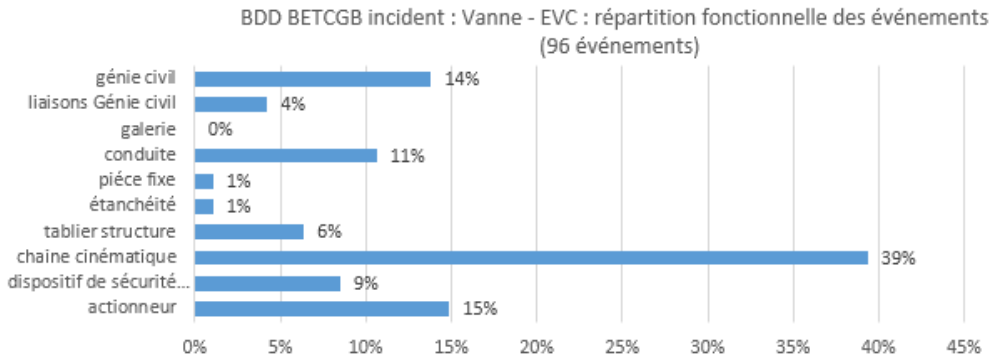


Figure 7: *Répartition fonctionnelles des événements impliquant des vannes et EVC.*

Il est possible lorsque l'échantillon d'évènements est suffisant d'approfondir la distinction fonctionnelle. Par exemple, s'agissant des défaillances de la chaîne cinématique, les éléments concernés sont : des vérins hydrauliques (6 cas), des vérins mécaniques (2 cas), des brimbales (1 cas), le circuit hydraulique de manœuvre (6 cas), les mécanismes (3 cas) des câbles (3 cas), des attaches de vannes (3 cas), des chaînes galles (1 cas), des mécanismes de vanne papillon (2 cas) ainsi que des chenilles de roulement de vanne (1 cas). Cette répartition est bien différente de celle de l'étude du CFBR de 1998 [10] portant sur un échantillon indépendant de 28 cas de défaillance d'EVC se répartissant de la façon suivante : dispositif de manœuvre hydraulique (3) / capteur (1) / vérin hydraulique et mécanique (2) / dispositif de sécurité (1) / arbre de synchronisation de manœuvre (3) / mécanisme (2) / chaîne galle (8) / câbles (2) / brimbales (3) liaisons (2). Cela démontre les forts biais potentiels interdisant une traduction probabiliste sur un échantillon aussi réduit. Dans la majorité des cas (16) un défaut de conception est mis en avant, les autres causes principales identifiées étant des défauts de maintenance ou de conception.

Concernant les actionneurs, les défaillances de centrales hydrauliques (6 cas) et de manœuvre par flotteurs (6 cas) sont nombreuses. Système de contrepoids, moteurs thermiques et électriques sont également concernés (1 cas).

S'agissant du contrôle-commande, le principal ensemble fonctionnel générant les événements enregistrés dans la base accident concerne les automates (figure 8). On notera que la tendance à ajouter de l'instrumentation et des automatismes pour se prémunir des défaillances humaines ne protège pas de tous les aléas. Les capteurs (position et mesure de plan d'eau) ainsi que les dispositifs de sécurité / protection) sont également une part non négligeable des incidents. On observera que c'est là un domaine pour le moment assez peu mis en évidence par les analyses de risques au niveau des études de dangers.

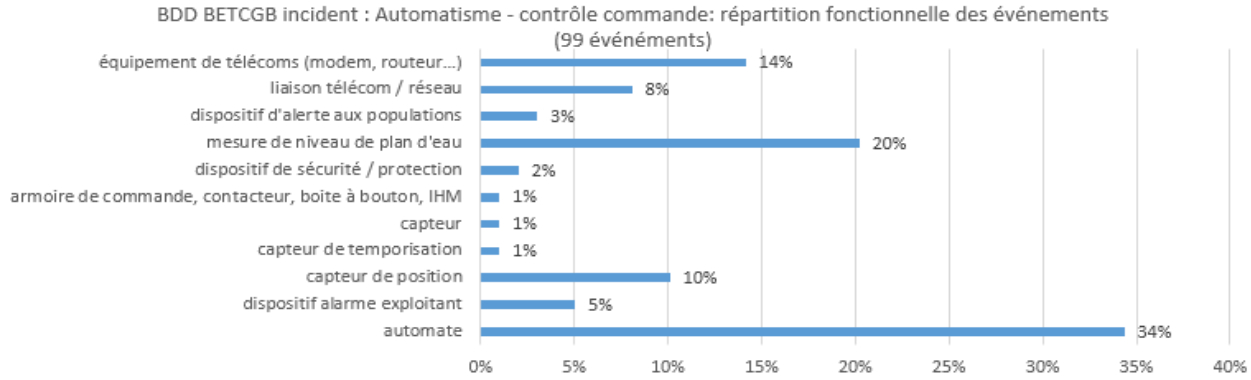


Figure 8 : *Répartition fonctionnelle des événements implant l'automatisme ou le contrôle commande.*

Alimentations en énergie : la plupart des événements enregistrés concernent ici les sources d'énergies, soit qu'ils s'agissent de sources principales, soient de sources de secours (figure 10). Dans de nombreux cas, il s'agit de dysfonctionnement des sources de secours lors d'essais ou d'opération de maintenance.

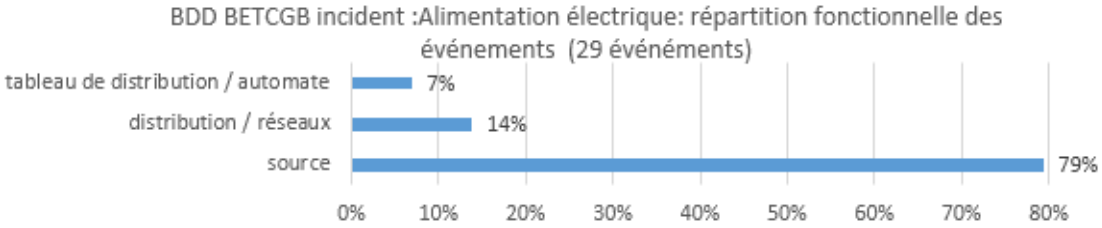


Figure 9 : *Répartition fonctionnelle des événements implant l'automatisme ou le contrôle commande.*

Assez logiquement, les défaillances matérielles ressortent comme la principale perturbation citée dans les scenarios de défaillance des événements concernant les organes hydromécaniques et de contrôle commande (figure 10). Le niveau d'analyse des événements enregistrés ne permet pas à ce jour de communiquer une synthèse statistique des causes premières des incidents enregistrés. Qualitativement, dans de nombreux cas des facteurs organisationnels peuvent être postulés. Les défauts de maintenance (56 cas), de conception (77 cas), d'organisation et de consignes procédures (19 cas) et plus rarement des erreurs humaines (10 cas) sont fréquemment cites.

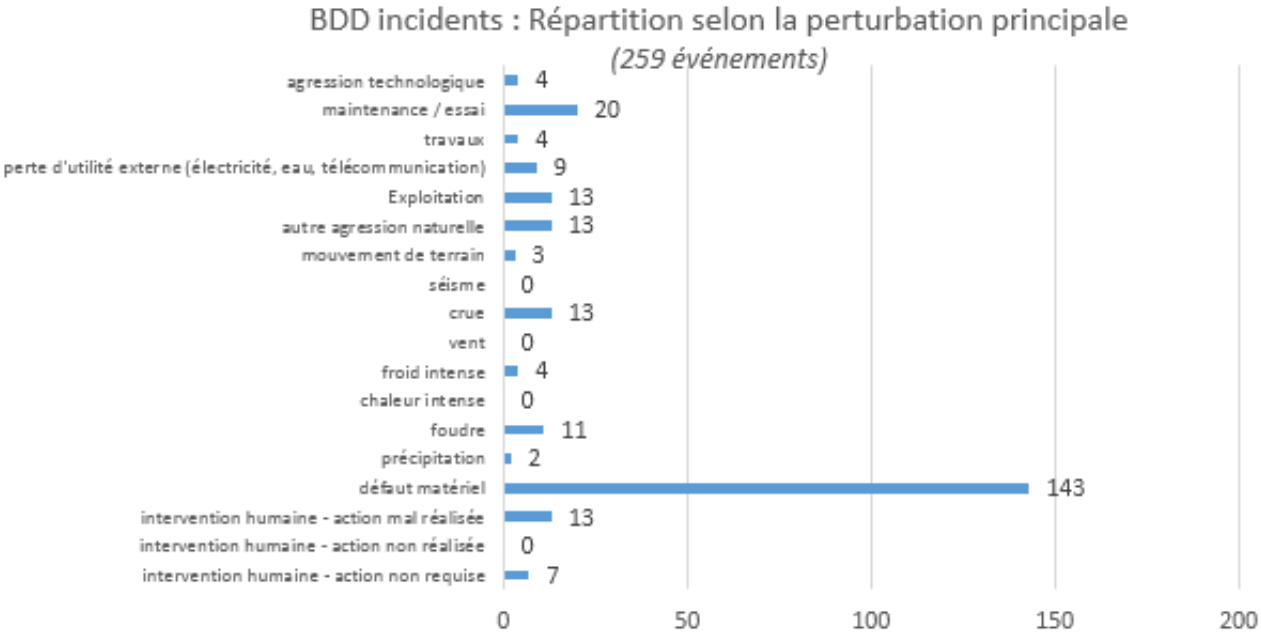


Figure 10 : *événements concernant la défaillance d'organes hydromécanique ou de contrôle commande et perturbations principales associées – BDD événements BETCGB*

4. EXEMPLES D'EVENEMENTS.

Pour 4 événements récents intéressant le domaine du contrôle commande et des organes hydromécaniques enregistrés dans la base ARIA, les figures 11 à 14 donnent en correspondance avec le résumé disponible une représentation sous forme graphique de l'événement, illustrant le processus d'analyse visant à mettre en évidence les causes profondes de ces incidents. On notera que le retour d'expérience d'un événement affectant un barrage de classe D (figure 14) est largement transposable à des barrages plus importants.

N° 46064 - Vanne - 2014 – crue – barrage de classe A
Lors d'un épisode de crue, le clapet automatique d'évacuation des crues d'un barrage ne s'abaisse pas. Le niveau de la retenue monte jusqu'à 22 cm au-dessus de la retenue normale. L'origine du dysfonctionnement est rapidement identifiée. La grille d'admission de la chambre du contrepoids du clapet est obstruée par des feuilles. Or c'est le remplissage de cette chambre qui déclenche l'ouverture du clapet et l'évacuation de l'eau. L'exploitant nettoie la grille ce qui permet l'abaissement immédiat du clapet et la baisse du niveau de la retenue.
A la suite de l'événement, l'exploitant planifie un contrôle visuel de la grille à chaque automne, période de remontée de la retenue et de chute des feuilles.

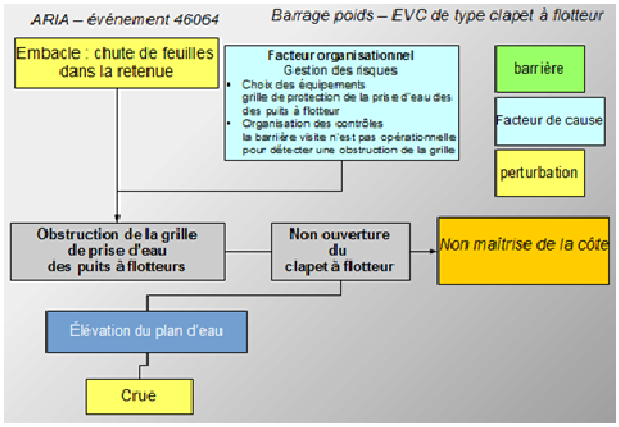


Figure 11 : Evénement ARIA n° 46064 résumé et représentation graphique

N° 43703 - Automatisme- 2013 - travaux
Une perte d'alimentation externe 90 kV se produit à 0h30 sur un barrage. Le groupe de production électrique se met automatiquement à l'arrêt et une alarme informe l'exploitant. En raison de travaux en cours, les vannes levantes de l'ouvrage se trouvent consignées en position fermée et le clapet automatique (à flotteur) est batardé : le débit est entièrement évacué par le clapet central. Les 2 codeurs de position du clapet central du barrage, alimentés par la même source non secourue, deviennent indisponibles et l'automate ne peut plus réguler la cote de retenue. A l'arrivée de l'exploitant vers 1 h, la cote dépasse de 15 cm le niveau des plus hautes eaux (PHE), atteignant la zone de sollicitation de l'automate de sauvegarde (déclenchant l'ouverture du clapet central et des vannettes sur les vannes consignées). L'exploitant abaisse le clapet central en mode manuel et rétablit à 1h30 la cote normale de retenue normale, égale aux plus hautes eaux. L'usine hydroélectrique redémarre ensuite. A la suite de l'accident, l'analyse de risques de la phase de travaux est mise à jour en intégrant un abaissement systématique du clapet central en fin de journée. De plus, le service de contrôle des ouvrages hydrauliques demande à l'exploitant de mener une réflexion globale sur son dispositif de contrôle commande (systèmes devant être secourus, modes communs de défaillance des codeurs et d'autres équipements...).

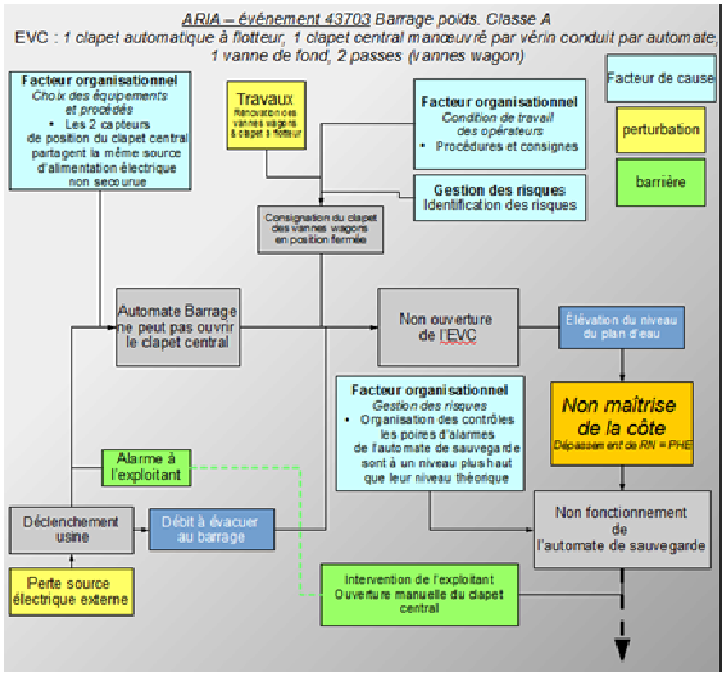


Figure 12 : Evénement ARIA n° 43703 résumé et représentation graphique

N° 44915 - 2014 – automatisme - essais

Deux agents effectuent des tests de performance au niveau d'un câble de télécommunication reliant un barrage et une usine hydroélectrique. Une mauvaise manipulation provoque la perte de l'alimentation en 48 V continu du barrage ainsi que la coupure de la liaison inter-automates (perte d'alimentation des modems). L'automate principal du barrage est neutralisé et les vannes ne peuvent plus être commandées. L'eau monte et se déverse au-dessus des vannes du barrage. Le niveau est resté sous la côte PHE (519,50 m NGF). Alerté par une alarme, un agent d'astreinte se rend sur place et ouvre manuellement les vannes.

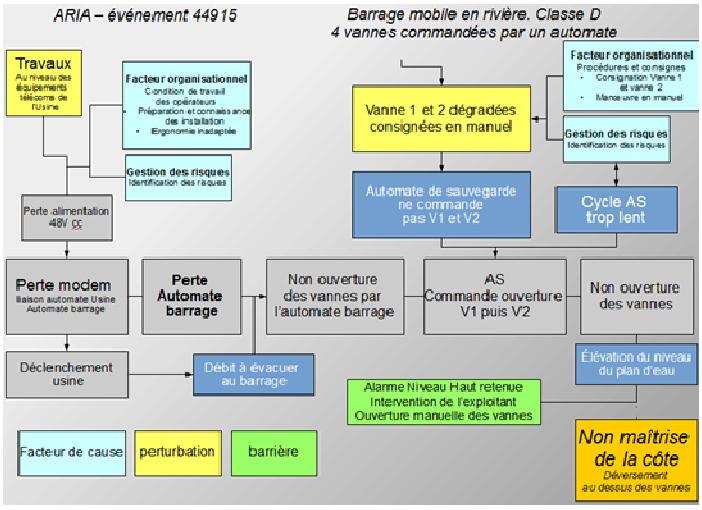


Figure 13 : Evénement ARIA n° 44915 résumé et représentation graphique

N° 44554 – 2013 – automatisme - travaux

Alors que le débit du RHIN fluctue autour du débit de saturation de sa partie canalisée (grand canal d'alsace), l'exploitant d'un barrage procède à des essais de qualification de son nouvel automate. En cas de dépassement du débit de saturation du canal, l'automate doit dévier une partie de l'eau vers le VIEUX RHIN en commandant l'ouverture de vannes d'évacuation de crue. A deux reprises dans l'après-midi, les seuils requérant l'ouverture de ces vannes sont atteints. A 11h45, le débit du VIEUX RHIN augmente brusquement de 600 m³/s entrainant une élévation de 1,75 m du niveau d'eau à l'aval du barrage. Les vannes se referment à 12h40. A 15h23, une seconde augmentation brusque de débit de 470 m³/s entraine une montée des eaux de 1,46 m à l'aval. Cette vague met en difficulté 3 personnes venant de s'installer, malgré l'interdiction d'accès, sur un îlot à 300 m en aval du barrage. L'une d'elles rejoint la berge allemande et donne l'alerte. Les secours allemands et français recherchent, à l'aide d'hélicoptères et de plongeurs, les deux disparus qui sont retrouvés sains et saufs en rive française à 17 h. L'exploitant du barrage remet en service l'ancien automate de régulation avec lequel les variations du débit relâché sont nettement moins importantes.

L'analyse de l'exploitant pointe des défaillances organisationnelles dans la définition des paramètres de régulation du nouvel automate : l'analyse des risques préalable à ce remplacement s'est focalisée sur la maîtrise de la cote amont du barrage et n'a pas apporté l'attention nécessaire au contrôle de débit dévié vers le VIEUX RHIN.

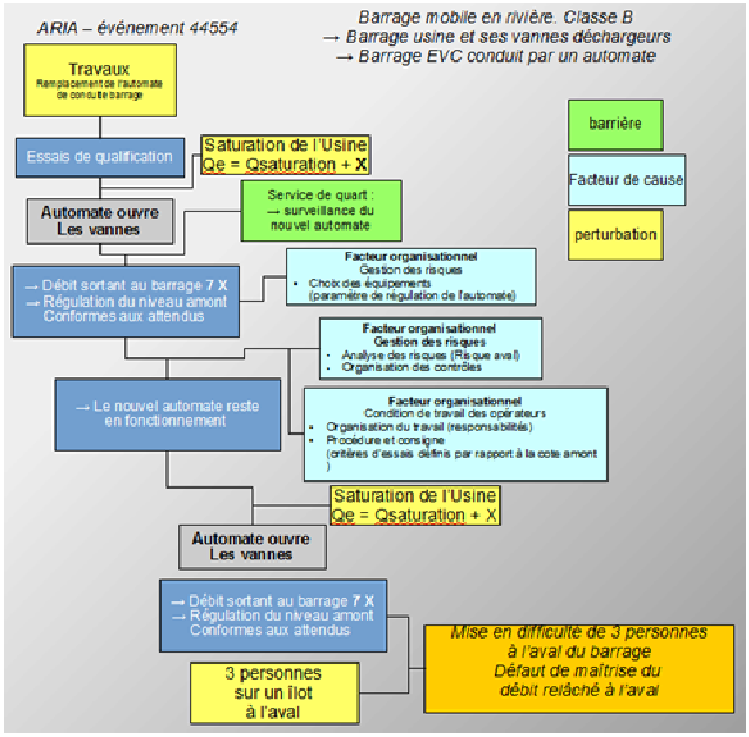


Figure 14 : Evénement ARIA n° 44554 résumé et représentation graphique

5. BILAN ET PERSPECTIVES

La mise en œuvre du dispositif EISH - PSH a permis d'enregistrer et de documenter un nombre significatif d'événements exploitables pour un retour d'expérience, accessible à tous via la base de données ARIA et intéressant la plupart des champs fonctionnels du domaine des organes hydromécaniques et de contrôle commande. Pour tirer le maximum de leçons du retour d'expérience, l'implication de tous les acteurs est nécessaire. Et particulièrement, l'engagement de l'exploitant est primordial. Le partage et la diffusion du retour d'expérience seront d'autant plus enrichissants que l'événement sera décrit et analysé en profondeur, permettant de dégager aussi bien les causes premières que les causes profondes des scénarios accidentels. Analyser les accidents et les incidents qui se sont produits permet d'en retirer et de partager des enseignements permettant aux acteurs de comprendre, agir et maitriser les scénarios accidentels potentiels concernant chaque ouvrage, de contribuer à animer une démarche de construction collective d'une culture de la sûreté et de transmettre l'expérience acquise. Les services de contrôles ont également un rôle important dans la démarche. Ils doivent convaincre les exploitants de l'intérêt d'être transparent sur les enseignements à tirer des accidents. Ils ont aussi pour mission de soutenir l'exploitant dans son analyse des causes et la définition de ses actions préventives et correctives. Enfin, la mise en valeur du retour d'expérience positif, notamment les mesures de maîtrise des risques qui ont fonctionné, fait partie intégrante de la démarche.

RÉFÉRENCES ET CITATIONS

[1] CIGB Bulletin 99 – Bulletin 109

[2] Rival F, Brandon E (2010). Apports de l'analyse des événements importants pour la sureté hydraulique (EISH) dans les études de dangers de barrages. *Colloque CFBR / AFEID : Pratique des études de dangers des barrages 28-29 novembre 2011, Lyon*

[3] Laloux S, Castel Y, Boubée D (2011), analyse de risques : comment faire quand la statistique ne suffit plus, *Colloque CFBR / AFEID : Pratique des études de dangers des barrages 28-29 novembre 2011,* Lyon

[4] Lewin J, Ballard G, Bowles DS (2003) Spillway gate reliability in the context of overall dam failure risk. *USSD Annual Lecture 2003*

[5] Dam Safety Committee New South Wales - Reliability of spillway flow control systems – Juin 2010

[6] Rival F, Eury S-P, Robache A (2014). ARIA 3 Identifier les causes profondes des accidents industriels par une modélisation graphique. *J. Math. Phys*, **33**, 308-330.

[7] Arrêté du 21 mai 2010 définissant l'échelle de gravité des événements ou évolutions concernant un barrage ou une digue ou leur exploitation et mettant en cause ou étant susceptibles de mettre en cause la sécurité des personnes ou des biens et précisant les modalités de leur déclaration ; Journal Officiel de la République Française du 11 juin 2010

[8] Deroo L, Jimenez B. Note sur l'accidentologie des barrages poids. Colloque CFBR / AFEID : Pratique des études de dangers des barrages 28-29 novembre 2011, Lyon

[9] Fry J.J Couriveau JR, Lévèque L (2015). Typologie des incidents d'érosion interne dans les fondations de barrage. *CFBR*.

[10] Bister D (1998) Synthèse du groupe de travail CFGB sur la sécurité des barrages et évacuateurs en service lors des crues. *Colloque CFGB 1998*

[11] Feuillas D, Fiabilisation des évacuateurs de crues (EVC) du parc de la CNR, Colloque CFBR-SHF « Dimensionnement et fonctionnement des évacuateurs de crues » 20-21 janvier 2009, Lyon

[12] Cottin L (2009). Les évacuateurs de crues des barrages hydroélectriques concédés ; vue synthétique du parc, vue synthétique du parc (2009), *Colloque CFBR-SHF « Dimensionnement et fonctionnement des évacuateurs de crues » 20-21 janvier 2009, Lyon*

[13] Bulletin ICSI n° 2014 04 : FHOS l'analyse approfondie d'évènement. Groupe de travail « amélioration du processus d'analyse d'incident » - Les Cahiers de la Sécurité Industrielle

[14] Prevot G, Schriqui C, Cloix R, Dieudonné S, Mériaux P, La vantellerie et le contrôle-commande dans les livrables réglementaires : la vision des services de contrôles et de leur appui technique, Colloque CFBR *«Vantellerie, contrôle-commande, télécom et alimentations électriques pour des barrages plus sûrs» 2-3 décembre 2015, Chambéry*

ESSH : « OUVERTURE INTEMPESTIVE » DU CLAPET CENTRAL DU BARRAGE DE SAILLANT

Philippe GIGUELAY
EDF, 10 allée de Faugeras – 87000 Limoges
philippe.giguelay@edf.fr

Nicolas JANKOWSKI
EDF, 18 avenue Poincare – 19100 Brive la Gaillarde
nicolas.jankowski@edf.fr
Téléphone : +00 (33) 05 19 76 22 00 , Fax : +00 (33) 05 19 76 22 32

MOTS CLÉS

ESSH, SAILLANT, UP Centre

RÉSUMÉ

Dans la nuit du 23 au 24 avril 2010, le clapet central du Saillant semble s'être ouvert de manière intempestive. Bien que l'évènement n'ait pas eu de conséquence à l'aval en termes de variation de débit, le caractère inexpliqué de l'évènement a conduit la DREAL à faire classer l'évènement comme un évènement Important pour la Sureté Hydraulique. Cet article fait ressortir les facteurs qui ont conduit le clapet central à s'ouvrir. Il pointe également la difficulté à maîtriser totalement la sûreté dans la conception de nos automatismes.

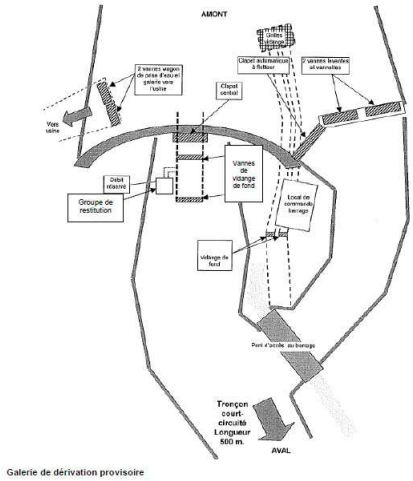
ABSTRACT

On April 24th 2015 the central flap of Saillant Dam open partially without any apparent justification. There was no consequence for public safety, but this event was apparently not understandable considering dam normal operation mode. This event was considered as "important for hydrosafety" under French Law and Authorities were informed. This article investigates the facts circumstances of the incident and later investigations. It also raises some key questions regarding influence of SCADA on dam safety

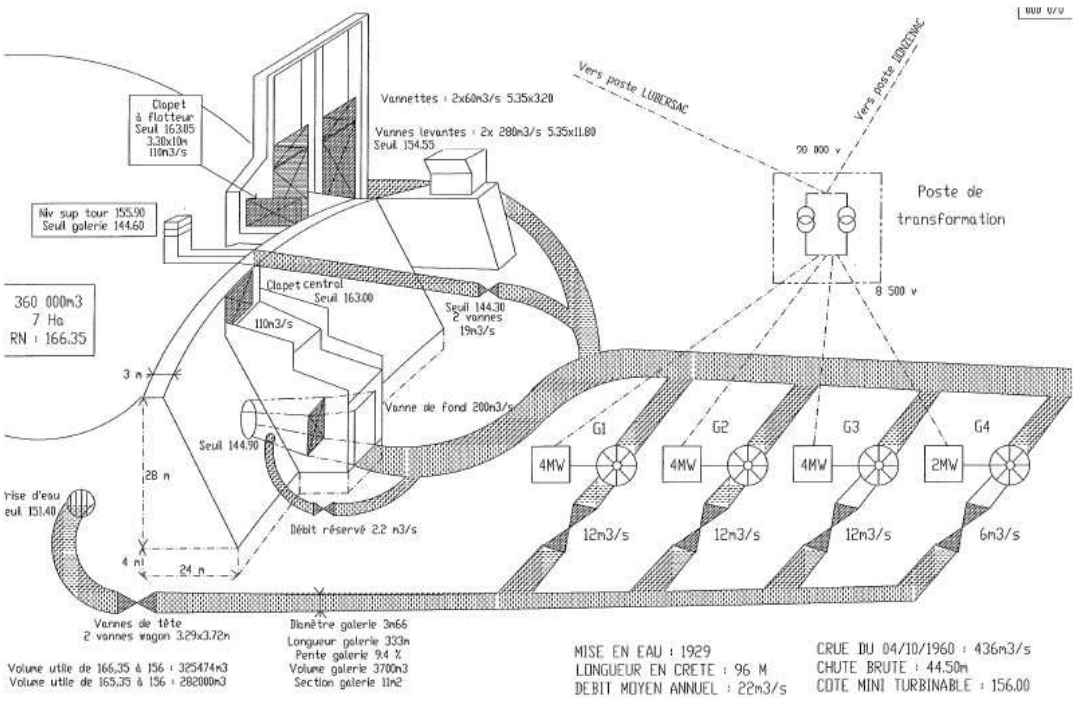
1. SITUATION

Le barrage du SAILLANT se situe sur la Vézère à environ 30 km de BRIVE en Corrèze. Il est exploité par un lot déporté du GU Vézère (GEH Dordogne).





Galerie de dérivation provisoire



2. DESCRIPTION DES INSTALLATIONS ET DE LA CONDUITE DE L'AMENAGEMENT

La centrale du Saillant est alimentée depuis le barrage du Saillant par une galerie en rive droite. L'évacuation des crues est réalisée par plusieurs organes de crue débitant dans un tronçon court-circuité de quelques centaines de mètres. Différents organes (Vannes wagon double corps dites « levantes », Clapet abaissant central, Vanne secteur en conduit, clapet abaissant automatique manœuvré par flotteur) contribuent au passage des crues. Seul le clapet abaissant central est piloté par un automate programmable barrage.
La centrale est conduite au fil de l'eau par un Automate de conduite (APC) qui commande les 4 groupes de production pour maintenir la cote de la retenue à la consigne de régulation usine.
Lorsque la cote monte au dessus de la consigne de régulation usine, et atteint la consigne de régulation du barrage, le clapet central piloté par l'automate barrage (APB) est actionné pour réguler le niveau de la retenue.
En raison d'une faible capacité de la retenue (7 ha), le déclenchement partiel ou total de l'usine risque de provoquer une élévation rapide de la retenue et de solliciter des organes d'évacuation des crues.
Afin d'éviter ce phénomène qui risque de mettre le régulateur du barrage en difficulté, l'APC informe l'APB d'un déclenchement total ou partiel de la centrale, ce qui revient à anticiper le report du débit turbiné par l'usine sur le clapet central.
Un automatisme de sauvegarde agit également sur l'ouverture du clapet à flotteur et des vannes levantes au dessus de la zone de fonctionnement du clapet central.
La centrale du Saillant est équipée de 4 groupes de production pour un débit d'équipement de 42 m3/s .



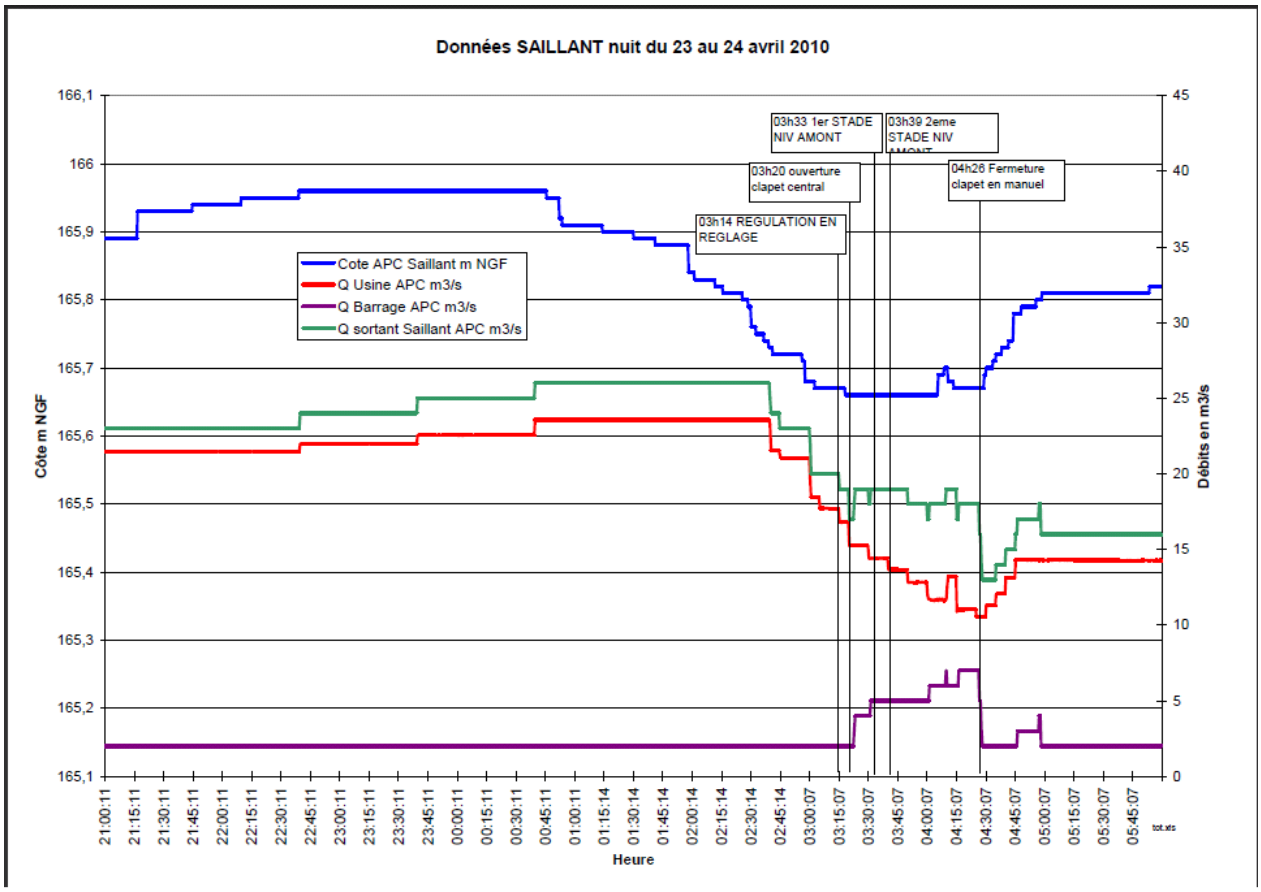
166,70	Cote de couronnement du barrage
166,35	PHE, RN, cote de régulation du clapet à flotteur
166,06	Consigne de Régulation de l'automate Barrage

3. L'EVENEMENT

Dans la nuit du 23 au 24 avril l'exploitant reçoit une alarme normale issue de l'APB. Lorsque l'exploitant arrive sur site, il constate que le clapet central est en train de s'ouvrir alors que la cote est en dessous de la cote de régulation de l'usine. Deux groupes de la centrale continuent de fonctionner.
L'exploitant reprend localement la manœuvre du clapet en le refermant (4h 26) puis essaye de repasser le clapet en mode automatique. L'APB aussitôt cherche à ré-ouvrir le clapet central. Ne comprenant pas ce qui se passe, l'exploitant prend la décision de consigner le clapet et de remettre au lendemain ses investigations.



Le graphique ci-après extrait de la TELEX permet de visualiser les principales données d'exploitation correspondantes à la nuit de l'évènement.



4. CONSEQUENCES

Au regard d'une absence d'explication immédiate de l'événement, celui-ci, est qualifié en ESSH par une ouverture non-maitrisé d'un organe de crue. Le CIH est mandaté pour analyser cet évènement.
De manière très factuelle, le graphique montre qu'il n'y a pas eu de conséquences à l'aval de l'usine en termes de variation de débit (Courbe verte). Mais l'absence d'explication ne permettait pas d'exclure que la situation se reproduise avec potentiellement des conséquences.
La DREAL est informée de cet évènement et demande que l'évènement soit classé en EISH. (Evènement Important pour la Sureté Hydraulique)
Un fin de course est installé afin de limiter le report de débit en mode automatique.

5. PREMIERES ANALYSES

La consignation d'état indique que l'APB est passé en réglage à 3h14. Le Dossier de Spécification Spéciales (DSS) de l'APB précise que le passage en réglage n'est possible qu'en mode régulation si au moins une des conditions suivantes est présente.

- Mode régulation et Atteinte de la cote de régulation barrage :
- Mode régulation et Clapet pas fermé
- Le débit à compenser est > 0 m3/s

Au regard des enregistrements de la mesure de niveau et de la position du clapet, le CIH démontre que ni l'atteinte d'une certaine cote, ni une dérive de la position du clapet ne peuvent être les conditions initiales à l'origine de cet évènement.
La dernière condition, est le débit à compenser qui correspond à la valeur transmise par l'APC à l'APB sur un déclenchement total ou partiel de l'usine.
N'observant pas de déclenchement de groupe sur la consignation d'état au moment du passage en réglage, le CIH ne parvient pas à conclure sur l'origine du passage en réglage, et propose de mettre en place un PC d'acquisition qui permettrait d'enregistrer différentes variables d'échange entre les deux automates.
La période qui a suivi cet incident n'a pas été favorable aux investigations. Pendant l'été le clapet est consigné et de nombreux travaux ont rendu la centrale indisponible. Les tentatives pour reproduire l'incident sont restées infructueuses.

6. LA CLEF DU MYSTERE : L'INCENDIE DU G4



En regardant de plus prés, l'analyse à ce stade n'a pas pris suffisamment en compte un autre évènement significatif qui s'était déroulé la veille. Dans la nuit précédente l'ouverture intempestive, le Groupe 4 de la centrale du Saillant a pris feu avant son couplage au réseau. Le déclenchement du groupe alerte l'exploitant qui intervient en urgence pour éteindre l'incendie. Bien que l'ouverture du clapet central et l'incendie du G4 soient à première vue de natures très différentes, leur caractère exceptionnel dans un intervalle de temps réduit établit une forte présomption qu'ils aient un lien entre eux. Fort de cette conviction, il s'agissait alors de comprendre le lien entre ces deux incidents en reprenant l'analyse.

6.1 Pourquoi le débit à compenser serait-il devenu positif ?

Pour répondre à cette question détaillons ici comment le calcul du débit à compenser est établi.
L'objectif est de transmettre à l'APB l'excédent de débit qu'il doit compenser suite à un déclenchement total ou partiel de l'usine.
La première des conditions est la détection d'au moins un groupe en arrêt sur déclenchement en mode manuel ou automatique. Cette condition n'est plus validée par l'APC si le groupe en défaut et sur arrêt clavier.
Tant qu'aucun groupe n'est en arrêt sur déclenchement, le débit usine courant est recopié dans une variable « débit usine avant déclenchement ». Lors de la détection d'au moins un groupe en arrêt sur déclenchement, le calcul du débit excédentaire de l'usine est égal à la différence entre le débit usine avant déclenchement qui est mémorisé, et le débit usine courant.

Ce calcul étant toujours vrai, tant qu'au moins un groupe en mode manuel ou automatique est vu par l'APC comme déclenché.
Le débit excédentaire qui sera transmis à l'APB est égal à 0 tant que le débit excédentaire calculé est inférieur ou égal à 5m3/s .
Dit autrement :

Débit à compenser = Débit usine avant déclenchement – débit usine courant > 5
(Si et seulement si au moins un groupe est vu déclenché)

Une fois cette équation posée, on comprend que la condition de passage en réglage est validée si le débit à compenser devient supérieur à 5m3/s . Le seul paramètre variable de cette équation est le débit usine courant.
Au moment du passage en réglage, la courbe rouge du graphique ci-dessous confirme que le débit usine est décroissant. En comparant le débit usine de la veille lors du déclenchement du G4 et le débit usine au moment du passage en réglage, on constate une différence légèrement supérieur à la valeur talon de 5m3/s .
Le lien avec le déclenchement du G4 peut être établi
Cette étape étant franchie, il en découle le questionnement suivant :

6.2 Pourquoi le débit à compenser serait-il devenu positif ?

La condition du passage en réglage n'était pas atteinte au moment du déclenchement du groupe. Le groupe n'étant pas couplé au moment de son déclenchement, le delta entre le débit avant déclenchement et le débit usine était inférieur à 5 m3/s . Le débit entrant dans la retenue étant à la hausse, la régulation usine a compensé en augmentant le débit usine par répartition sur les 2 groupes disponibles. C'est le lendemain, lorsque le débit entrant a baissé que la régulation usine a diminué le débit usine et que la condition a été atteinte.

6.3 Pourquoi l'APC a-t'il conservé la valeur du débit usine en mémoire alors que le groupe était consigné ?

L'édition des défauts présents de la consignation d'état montre bien que l'APC « voyait » toujours le groupe en défaut « Défaut DH », alors que celui-ci était consigné. On peut penser dans un premier temps qu'il s'agit d'une erreur de schéma et que l'inter de tranche ne coupe pas toutes les polarités en provenance du groupe. Après un essai sur site, il est mis en évidence que le paramétrage de repli de la carte d'acquisition des informations en provenance du G4, est configurée pour maintenir les entrées en l'état sur coupure de son alimentation. Vu de l'APC, l'entrée DH du G4 reste active même si celui-ci est consigné.
On comprend que la priorité de l'exploitant lorsqu'il est intervenu sur le G4 était d'éteindre l'incendie. Le groupe étant à l'arrêt en rotation, il a agit d'abord sur l'ouverture de l'inter de tranche pour intervenir en sécurité. Dans une situation classique de consignation, ce geste ne serait intervenu qu'après avoir appuyé sur le bouton arrêt du groupe, permettant l'inhibition de la condition arrêt sur déclenchement et ainsi réinitialisé le calcul du débit excédentaire.

6.4 Que se serait-il passé si l'exploitant n'était pas intervenu pour refermer le clapet ?

En observant le graphique on s'aperçoit que le clapet s'ouvre au fur et à mesure que le débit de l'usine décroit, le clapet compensant la baisse de charge des groupes de l'usine.
La cote étant passée en dessous de la consigne de régulation de niveau de l'usine (165,85), la régulation a tendance à baisser le débit de l'usine et de ce fait d'augmenter le débit à compenser. En conséquence le clapet central s'ouvre. Cette ouverture du clapet accentue encore la baisse de la retenue puis la baisse du débit des groupes….Au final, cette situation met en évidence une divergence du système.
La conséquence de cette divergence même si elle est anormale, n'est pas grave en soit. Elle aurait produit un arrêt de la centrale et une ouverture progressive du clapet central jusqu'à la valeur du débit de l'usine avant déclenchement.

CONCLUSION

L'aboutissement de cette analyse a été long mais les doutes sont enfin levés !
La décision a été prise par le directeur du GEH de lever la limitation d'ouverture du clapet et de remettre le clapet en service sans modification de l'APB. La DREAL en a été informé.

Cet évènement a été intégré au cursus de formation crue…
Il a été demandé à MII de formaliser l'analyse en émettant des propositions d'évolutions. Sur la base de cette analyse la décision d'un retour à la conception devra être prise.

Les enseignements de cet évènement sont nombreux

On pourrait développer la réflexion sur la méthodologie de l'analyse, sur les configurations à prendre en compte dans les spécifications d'une conduite d'aménagement, sur les risques induits par un APC sur la conduite d'un barrage, sur les limites du traitement de certaines évolutions par MII et de la nécessité d'un retour à la conception… mais la question de fond qui embarque dans la réflexion tout cela est celle de la fiabilité des automatismes.

EXPLOITATION DES BARRAGES VANNES - RETOUR D'EXPERIENCE SUR LE CALCUL DE LA DEBITANCE DES BARRAGES - ETUDES SUR MODELES PHYSIQUE ET MODELES NUMERIQUES

Operation of gated dams- feedback on physical and numerical models studies for calculation of dams flow rates

Magali DE CACHARD[1], Pierre ROUMIEU, Sébastien ROUX
4 rue de Chalon sur Saône, 69007 Lyon
m.decachard@cnr.tm.fr, s.roux@cnr.tm.fr, p.roumieu@cnr.tm.fr

Nicolas BOISSON, Antoine VOLLANT, Yannick BAUX
66 boulevard Niels Bohr, CEI1, CS 52132, 69603 Villeurbanne Cedex, France
nicolas.boisson@optifluides.net, antoine.vollant@optifluides.net, yannick.baux@optifluides.net

MOTS CLÉS

Modèle hybride, Modèle de turbulence, Maillage, Ecoulement mixte, Vannes segment

RÉSUMÉ

CNR exploite une vingtaine de barrages vannés dont la mise en exploitation a été réalisée entre 1949 et 1987. L'article rappelle en premier lieu les enjeux liés à la bonne connaissance des débits transitant par les ouvrages, en particulier dans le cadre du mode d'exploitation Rhône. Il décrit les principaux résultats des études de débitance réalisées sur modèles physiques, outils utilisés à la CNR depuis 70 ans, qui permettent d'être garant de la cohérence des débits sur le Rhône. L'article traite en particulier de la débitance des vannes en fonction de leurs localisations (passe de rive ou centrale) et du mode d'exploitation du barrage. Pour cela, des essais récents ont été réalisés sur un modèle physique (échelle1/30) représentant l'ensemble de l'aménagement de Vaugris. La problématique d'écoulement mixte (volet + vanne) est également abordée, et l'intérêt d'une modélisation hybride (couplage modèle numérique/ modèle physique) est présentée.

ABSTRACT

CNR operates around twenty gated dams whose operation began between 1949 & 1987. This article mainly describes the stakes regarding the appropriate knowledge of the flow passing through the structures, specifically in the context of Rhône River Valley scheme operation principle.
It deals with the main tests and results of physical scale modelling, tool that has been used by CNR for the last 70 years in order to ensure the consistency of flow rates along the Rhône River. Specific analyses have been performed on the flow rates related to the operation of the dams and the location (side or central pass) of the opened gates. For that purpose dedicated tests have been performed on overall physical scale model. The issues of shared flows (i.e both under the gates and over the flaps) and of the benefits of hybrid modelling (coupling between numerical modelling and physical experiments) are addressed.

[1]Auteur correspondant

1. CONTEXTE

Créée en 1933, la Compagnie Nationale du Rhône a reçu de l'Etat en 1934 la concession du plus puissant fleuve français pour l'aménager et l'exploiter selon trois missions solidaires : production, navigation, irrigation et autres usages agricoles. La CNR a construit, développé et mis en service sur le Rhône 19 centrales hydroélectriques. Ces installations de fortes capacités (entre 45 et 420 MW de puissance installée) sont complétées par 4 Petites Centrales Hydroélectriques (PCH, puissance inférieure à 10 MW) et par 8 Mini-Centrales Hydroélectriques (MCH de 0.5 à 2 MW), pour la plupart destinées à valoriser énergétiquement les débits réservés.

2. ENJEUX LIES A LA BONNE CONNAISSANCE DES DEBITS

Assurer la sûreté hydraulique sur les aménagements est la priorité pour la Compagnie Nationale du Rhône. Pour la régulation automatique des aménagements, le calcul de la commande prédictive s'appuie sur des mesures de niveaux en certains points caractéristiques des retenues (points de réglage), ainsi que sur les débits aux ouvrages (barrages et usines). Il est donc nécessaire de disposer de données de débits suffisamment précises pour obtenir une régulation globale efficace de la chaine des aménagements hydroélectriques du Rhône. Le débit des barrages est déterminé par un calculateur dans lequel sont intégrées les équations appelées « Equations Rhône 2000 ». Ces équations permettent de déterminer le débit transitant par les volets supérieurs et par les vannes (cf. Figure 5). Elles ont été ajustées, pour chaque barrage à partir d'essais réalisés sur modèle physique, dans les années 2000, représentant une vanne et deux demi-passes latérales à l'échelle 1/35 (cf. Figure 6).

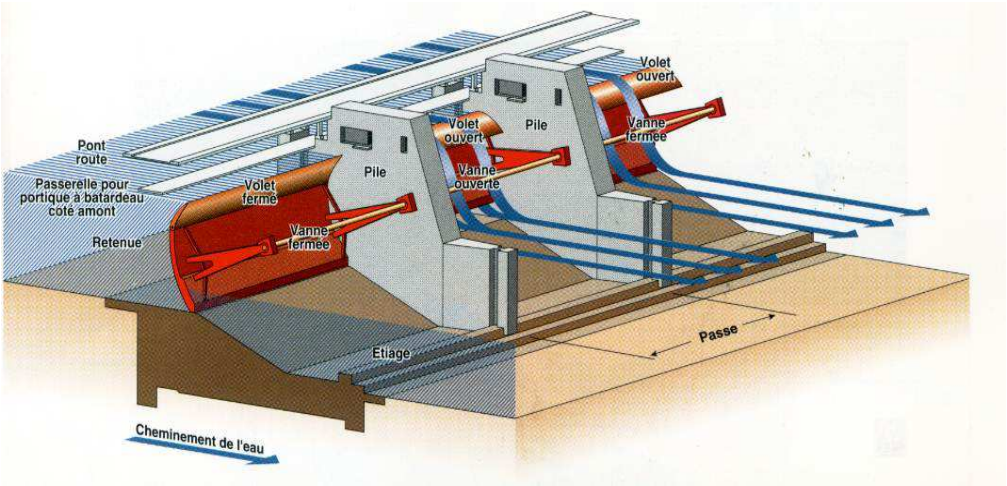


Figure 5 : *Schéma de principe d'un barrage équipé de vannes segments et de volets*

Dans une démarche d'amélioration continue de la connaissance de la débitance[2] des ouvrages, des études permettant de prendre en compte certains phénomènes de second ordre sont menées. Il s'agit de déterminer notamment l'influence du fonctionnement des barrages en équi-ouverture (influence du fonctionnement des passes adjacentes), l'influence de la localisation de la passe (en rive, ou dans la zone centrale) ou encore l'influence d'un fonctionnement d'une passe en écoulement mixte (écoulement simultané sur le volet et sous la vanne). Pour ce faire, une étude sur un modèle physique de l'ensemble d'un ouvrage (aménagement de Vaugris) a été réalisée, et des études numériques 3D (avec calage préalable sur les résultats du modèle physique) sont en cours.
L'article balaiera la méthodologie des études menées et finalisera sur l'intérêt, aujourd'hui, d'un modèle hybride permettant d'analyser l'ensemble des phénomènes physiques mis en jeux.

[2] Débit qui transite par le barrage pour des conditions hydrauliques définies (niveau amont, niveau aval, ouverture des passes du barrage)

3. ETUDES 2000-2004 - MODELE PHYSIQUE AVEC UNE PASSE DU BARRAGE

Les équations de débitance ont été déterminées à partir des résultats d'essais en canal vitré au 1/35 (cf. Figure 6). Un modèle a été réalisé pour chaque barrage. Il représente une passe complète (une vanne avec volet et deux piles) et la moitié des 2 passes adjacentes, ces dernières étant fermées lors des essais.



Figure 6 : *Vue de l'amont du modèle physique de Vaugris en canal vitré au 1/35*

Les études ont été menées en canal vitré de 2000 à 2004 sur 12 barrages du Rhône en aval de Lyon. Les essais ont été réalisés de manière à balayer l'ensemble des débits, des niveaux et des ouvertures de vanne et volet possibles. Ils ont permis de déterminer les équations de débitance des vannes en fonction des niveaux d'eau amont/aval et des ouvertures vanne/volet. Pour chaque barrage, environ 350 essais ont été réalisés. L'écoulement au-dessus des volets est toujours dénoyé. En revanche, en ce qui concerne les vannes, il existe quatre régimes d'écoulement en fonction des hauteurs amont et aval, et en fonction de l'ouverture de la vanne: submergé noyé et submergé dénoyé, non submergé noyé et non submergé dénoyé (cf. Figure 7).

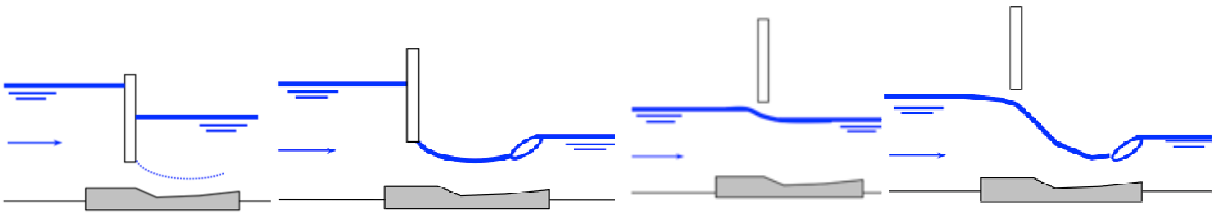


Figure 7 : *Régime submergé noyé, submergé dénoyé, non submergé noyé et non submergé dénoyé*

A chacun de ces quatre régimes d'écoulement correspond une équation de débitance de la vanne, de la forme suivante (en négligeant les termes d'énergie cinétique) :

$$Q = m \cdot A_{eq} \cdot L \cdot \sqrt{2g \cdot \left(h_{am_{eq}} - h_{av_{eq}}\right)} \quad (1)$$

où m est le coefficient de débitance, L est la largeur de la vanne, g est l'accélération de la pesanteur, A_{eq}, $h_{am,eq}$ et $h_{av,eq}$ sont définis dans le tableau 1.

Régime	**A_{eq}**	**$h_{am,eq}$**	**$h_{av,eq}$**	**x**	**y**	**z**
Submergé noyé	A	h_{am}	h_{av}	h_{am}	h_{av}	A
Submergé dénoyé	A	h_{am}	m.A	h_{am}	knd*A	A
Non submergé noyé	h_{av}	h_{am}	h_{av}	h_{am}	h_{av}	$\alpha*h_{am}$
Non submergé dénoyé	h_{am}	h_{am}	-	h_{am}	$\alpha*h_{am}$	$\alpha*h_{am}$

Tableau 4 : *Variables Aeq, ham,eq et hav,eq de l'équation (1) et variables x, y, z des équations (2) et (3) en fonction du régime d'écoulement sous la vanne*

L'équation Rhône 2000 (2) a été définie pour calculer la débitance des vannes quel que soit le régime d'écoulement. Cette équation comporte notamment un coefficient de débitance m (3) qui est exprimé sous forme paramétrique (cf. tableau 1) et qui a été calé à partir des essais réalisés, pour chacun des barrages étudiés.

$$Q_{vanne}(x,y,z) = m(x,y,z)zL\sqrt{2g(x-y)} \qquad (2)$$

$$m(x,y,z) = a + b*\left(\frac{z}{x}\right) + c*\left(\frac{y}{x}\right) + d*\left(\frac{z}{x}\right)^2 + e*\left(\frac{y}{x}\right)^2 + f*\left(\frac{z}{x}*\frac{y}{x}\right)^2 \quad (3)$$

Les équations calées sur les résultats du modèle physique permettent gérer les aménagements en calculant le débit transitant à travers les barrages.

4. ETUDES 2012-2014 MODELE PHYSIQUE D'ENSEMBLE

Le modèle d'ensemble choisi est celui de l'aménagement de Vaugris construit au 1/30 (cf. **Figure 8**). L'étude a été réalisée de 2012 à 2014. L'aménagement est composé d'un barrage comportant 6 passes dont 4 sont équipées de volets et d'une usine équipée de 4 groupes bulbes.

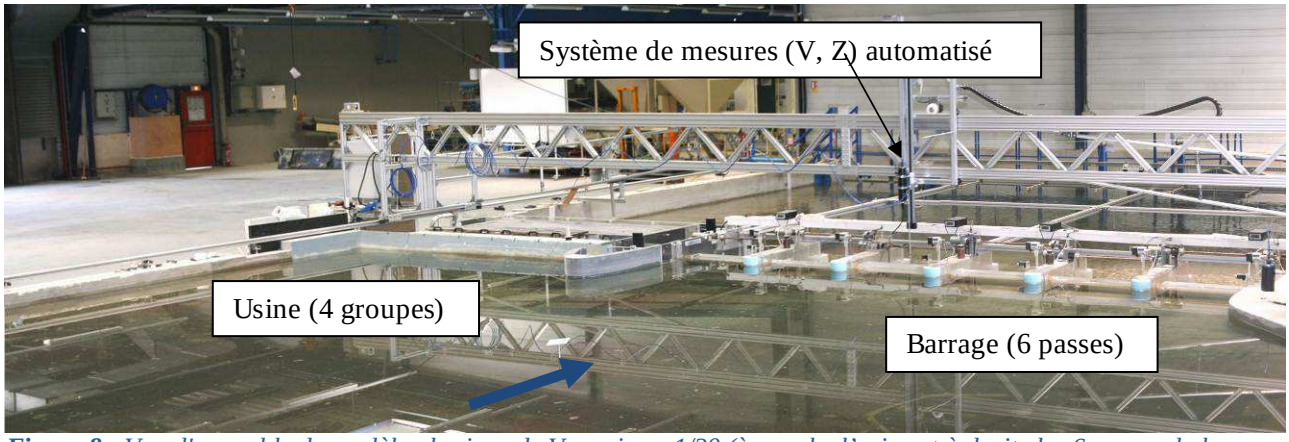


Figure 8 : *Vue d'ensemble du modèle physique de Vaugris au 1/30 (à gauche l'usine et à droite les 6 passes du barrage*

4.1 Résultats du modèle physique d'ensemble

Les résultats du modèle physique d'ensemble sont cohérents avec ceux issus des modèles physiques réalisés en canal vitré.

L'exploitation du modèle physique d'ensemble a permis de fournir des résultats complémentaires aux études antérieures. Notamment, il a été mis en évidence les phénomènes hydrauliques principaux suivants :

- Le débit transitant par une passe est sensiblement plus important lorsque les passes adjacentes sont ouvertes. Il est probable que ce soit le phénomène de contraction en amont des passes qui modifie la débitance selon le nombre de passes ouvertes ou fermées au barrage ;
- Pour des débits par vanne inférieurs à environ 500 m3/s, le débit transitant par une passe de rive est légèrement plus faible que le débit transitant par une passe centrale. Pour les débits par vanne plus important cet écart devient négligeable ;
- Lorsque l'écoulement est en régime mixte (écoulement simultané sous la vanne et sur le volet), le débit est, en moyenne, très proche du débit calculé en réalisant la somme des débits de la vanne et du volet pris séparément Toutefois, compte tenu des limites du modèle physique pour ce type d'essais (cf. 0) , il a été décidé de lancer une étude spécifique sur modèle numérique.;
- Il existe un régime intermédiaire entre le régime noyé (le niveau aval est à prendre en compte pour le calcul du débitance des vannes) et le régime dénoyé (débitance des vannes indépendante du niveau aval).

4.2 L'écoulement mixte

4.2.1 Phénomène physique

Le phénomène d'écoulement mixte se produit pour des crues intermédiaires (< environ Q2). Pour les crues plus importantes, l'écoulement ne se fait que sous les vannes, les volets étant hors d'eau.

Le calculateur détermine le débit en écoulement mixte en considérant la somme de la débitance du volet et de la vanne prise séparément « Qvanne » + « Qvolet », cf. Figure 9.

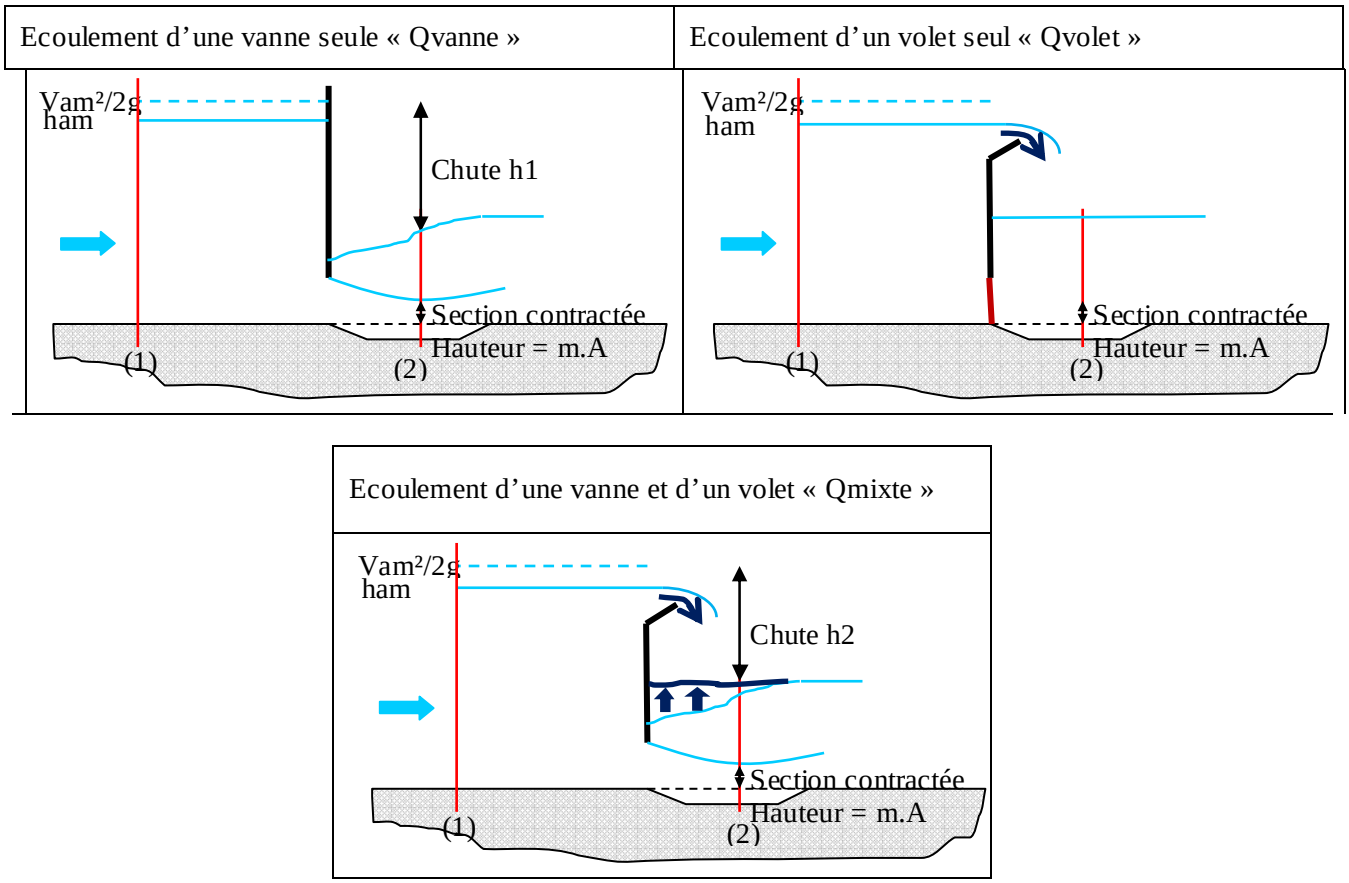


Figure 9 : *Ecoulement d'une vanne seule, d'un volet seul et écoulement mixte (vanne et volet simultanément)*

On notera que les conditions hydrauliques sont différentes pour les différents cas d'écoulements. On peut citer notamment, la modification du champ de vitesse à l'amont de la vanne, l'augmentation de la perte de charge liée à la rencontre du jet passant sous la vanne et du jet issu du déversement au-dessus du volet (cf. Figure 13), et l'augmentation du niveau à l'aval immédiat de la vanne (diminution de la hauteur de chute locale).Ainsi, afin de quantifier plus en détails les éventuelles corrections à apporter dans le calcul du débit en écoulement mixte, des essais complémentaires vont être réalisés sur modèle numérique (cf. §5).

4.2.2 Limites de l'étude sur modèle physique

Les mesures issues du modèle physique permettent de mettre en évidence et de quantifier le phénomène physique. Afin de pouvoir proposer une correction à appliquer au calculateur, il est nécessaire de disposer de valeurs sur l'ensemble de la gamme d'utilisation de la vanne et du volet.

Compte tenu d'une part, qu'il existe des effets d'échelle sur le modèle physique pour les faibles hauteurs d'eau sur les volets (hauteurs inférieures à 3 cm), et que d'autre part, il est nécessaire d'étudier les écoulements mixtes sur les autres barrages du Rhône, il a été décidé, à ce stade de l'étude de confier à la société Optifluides une étude sur modèle numérique 3D.

Dans une première phase, un modèle numérique 3D établi à l'échelle 1/30 est calé sur les résultats issus du modèle physique. Dans une deuxième phase, ce modèle numérique sera exploité à l'échelle réelle (échelle 1) afin d'évaluer et de corriger les effets d'échelle et de déterminer les lois de caractérisations en écoulement mixte.

5. ETUDE 2015 - MODELISATION HYBRIDE POUR LA PROBLEMATIQUE D'ECOULEMENT MIXTE

5.1 Présentation du modèle numérique

L'étude sur modèle numérique est en cours de réalisation. La démarche de modélisation hybride ainsi que les résultats de calage sont présentés. Elle constitue une démarche innovante car elle permet de bénéficier à la fois des atouts de la modélisation physique (pour exemple, représentation de l'ensemble des phénomènes 3D en similitude) et de ceux issus de la modélisation numérique 3D (pour exemple, détermination/visualisation des champs de vitesses, de pression sur de larges domaines), et ceci pour des couts d'études optimisés.

L'étude sur modèle numérique est réalisée à l'aide d'une modélisation 3D à l'échelle 1 dont le domaine de calcul est restreint à une passe centrale et les deux demi-passes adjacentes (dit domaine intermédiaire). Les choix de modélisation (modèle de turbulence, domaine de calcul, maillage, etc.) sont fait dans une phase de calage. Le calage est réalisé en comparant les résultats du modèle physique à un modèle numérique à l'échelle du modèle physique (1/30) sur le domaine intermédiaire et sur le domaine de calcul complet, c'est-à-dire de même emprise que le modèle physique.

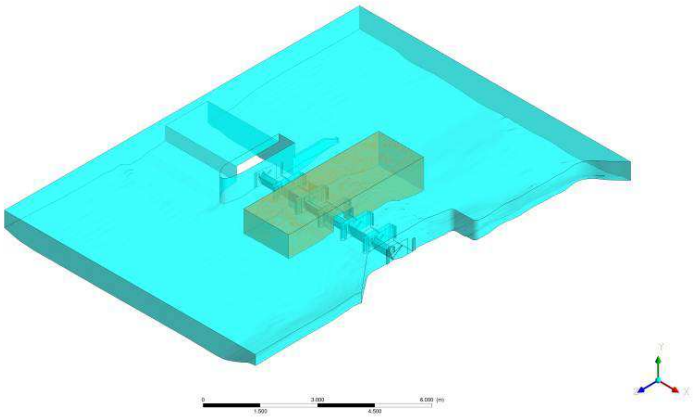


Figure 10 : *Étendue du domaine de calcul complet, en bleu, et étendue du domaine de calcul intermédiaire, en vert.*

5.2 Calage du modèle numérique

5.2.1 Système d'équations

L'écoulement concerné par cette étude est un écoulement gravitaire, diphasique air-eau à surface libre et incompressible. Il est instationnaire, c'est-à-dire que ses caractéristiques évoluent au cours du temps. Une estimation des nombres de Reynolds au niveau de la vanne prévoit l'apparition de structures turbulentes qui doivent être prises en compte dans la modélisation. D'autres phénomènes tels que la rugosité des parois ou les effets de tension superficielle sont susceptibles d'influer sur les caractéristiques de l'écoulement. L'ensemble des phénomènes physiques considérés permet de sélectionner les équations numériques qui vont servir à simuler le modèle numérique.

Les équations qui décrivent le mouvement des fluides newtoniens comme l'air et l'eau sont les équations de Navier-Stokes. La méthode « volume of fluid » (VOF) introduite par Hirt et Nichols [1] est utilisée pour décrire l'écoulement diphasique. Cette méthode introduit un champ de scalaire α variant entre 0 et 1 qui représente la fraction volumique d'eau dans le domaine de calcul. Les zones pour lesquelles α est strictement compris entre 0 et 1 contiennent un mélange diphasique qui indique la présence de l'interface. Cette approche complète les équations de Navier-Stokes avec une équation de transport non diffusive du scalaire α.

5.2.2 Discrétisation spatiale (maillage)

Le système d'équations évoqué dans le paragraphe précédent est résolu pour chaque maille. La qualité d'un maillage est conditionnée à la fois par l'assemblage régulier de ses mailles, et par leurs tailles suffisamment petites dans les zones de forts gradients. La taille des plus petits mailles est déterminée dans les zones de forts gradients de vitesse, qui se situent au niveau de la lame d'eau sur le volet et dans le rétrécissement brusque sous la vanne. Ailleurs, les mailles sont plus grandes car le nombre de mailles est limité par la complexité du modèle numérique à résoudre et par les capacités de calcul disponibles. Un exemple du maillage du domaine intermédiaire est présenté sur la **Figure 11**.

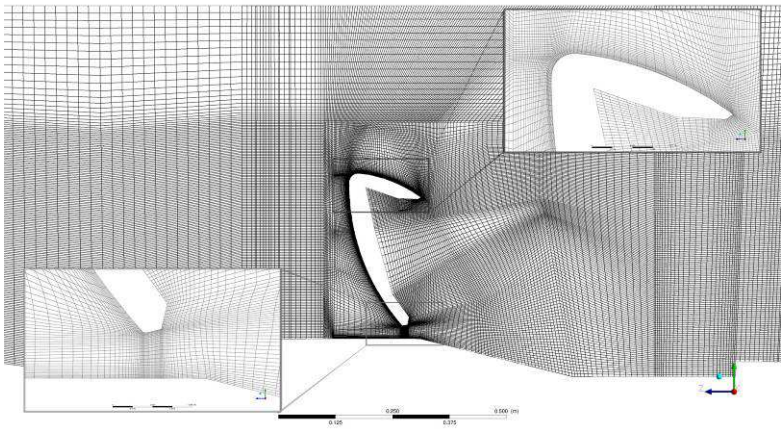


Figure 11 : *Coupe et détails du maillage au niveau de la vanne 3 du domaine intermédiaire.*

Dans un premier temps, l'intégralité du modèle physique a été maillée pour effectuer les premières simulations à l'échelle maquette. Les hypothèses faites *a priori* sur l'écoulement pour générer le maillage sont validées *a posteriori*. La précision de la description de l'interface air/eau, qui ne peut pas être prédite *a priori*, est améliorée par des étapes de raffinement de maillage en cours de calcul qui augmentent l'efficacité du processus de reconstruction d'interface air/eau du modèle VOF. Avec les raffinements successifs, le nombre de mailles des simulations à l'échelle maquette est de l'ordre de 16×10^6 cellules. Les dimensions à l'échelle maquette des plus petites cellules sont de l'ordre de 0.3 mm et celles des plus grandes sont d'environ 20 mm. Compte tenu du jeu d'équations à résoudre et des moyens de calcul (30 cœurs), il faut environ 2 à 5 jours pour que les statistiques des grandeurs physiques comme le débit convergent.

Le temps de résolution des équations sur le domaine intermédiaire à l'échelle modèle, qui contient 7×10^6 cellules, est réduit de 53%.

5.2.3 Conditions aux limites

Les conditions aux limites suivantes sont utilisées dans le modèle numérique :

- Les parois et le fond du domaine de calcul sont définis en tant que murs avec une condition d'adhérence (la vitesse contre les parois est nulle) ;
  En fonction du modèle de turbulence, une loi de paroi sera incluse pour modéliser le gradient de vitesse en proche paroi. De plus, une rugosité artificielle calibrée sur les états de surface du béton dans les ouvrages de génie civil [2] sera ajoutée afin de se rapprocher de la géométrie réelle.
- La face supérieure du domaine de calcul est définie comme condition de symétrie. Elle est positionnée suffisamment loin de la surface libre pour ne pas contraindre l'écoulement d'air et ainsi limiter les effets de confinement ;
- La section d'entrée du domaine est paramétrée comme "open channel pressure inlet", sur laquelle sont définies la hauteur de la surface libre et la vitesse de l'écoulement d'air ;
- La section de sortie du domaine est paramétrée comme "open channel pressure outlet", sur laquelle est définie la hauteur de la surface libre.

5.2.4 Paramètres de calage du modèle numérique

Le modèle numérique est calé en comparant le modèle numérique à l'échelle de la maquette sur le domaine intermédiaire aux paramètres d'entrée et de sortie du modèle physique :

- les paramètres de sortie sont le débit qui transite par les vannes, les mesures temporelles de vitesse en plusieurs points de plans orthogonaux à l'écoulement situés en amont et en aval immédiat de la passe 3, la hauteur d'eau en aval de la passe 3 et la hauteur de la lame d'eau sur les volets.
- Les paramètres d'entrées sont utilisés pour créer le domaine de calcul et définir les conditions aux limites. Les paramètres de sortie servent de référence pour caler le modèle numérique. L'objectif de cette étude étant d'extraire des lois de débitance, il est logique que le débit d'eau soit le paramètre majeur à respecter pour le calage du modèle. Les mesures de vitesses et de hauteurs d'eau, qui sont des grandeurs locales, serviront à confirmer le calage du modèle numérique lorsque leur précision le permet. Les paramètres numériques servant à étalonner le modèle numérique sont décrits dans le paragraphe suivant.

5.2.5 Modélisation de la turbulence

Les écoulements sous la vanne et sur le volet sont pilotés par la turbulence de paroi et donc par des phénomènes visqueux. Dans le cas de l'écoulement sous la vanne, la brusque accélération du fluide au passage de la vanne va générer un décollement en aval causé par le gradient de pression adverse à l'écoulement. La cellule de recirculation qui apparaît diminue la section de passage apparente du fluide à l'aval du couteau et influence immédiatement le débit sous la vanne. Par conséquent, un modèle de turbulence approprié à la simulation des décollements est recommandé. Quatre modèles de turbulence ont été testés. Le modèle k-ε standard de Launder et Spalding [3], sa correction "RNG" proposée par Yakhot et al. [4], sa version réalisable proposée par Shih et al. [5] et enfin le modèle k-ω SST de Menter [6]. La famille des modèles k-ε qui est généralement utilisée, n'est pas adaptée pour ce type d'écoulement contrairement au modèle k-ω SST qui associe les bonnes propriétés du k-ω en proche paroi avec un k-ε en champ lointain.

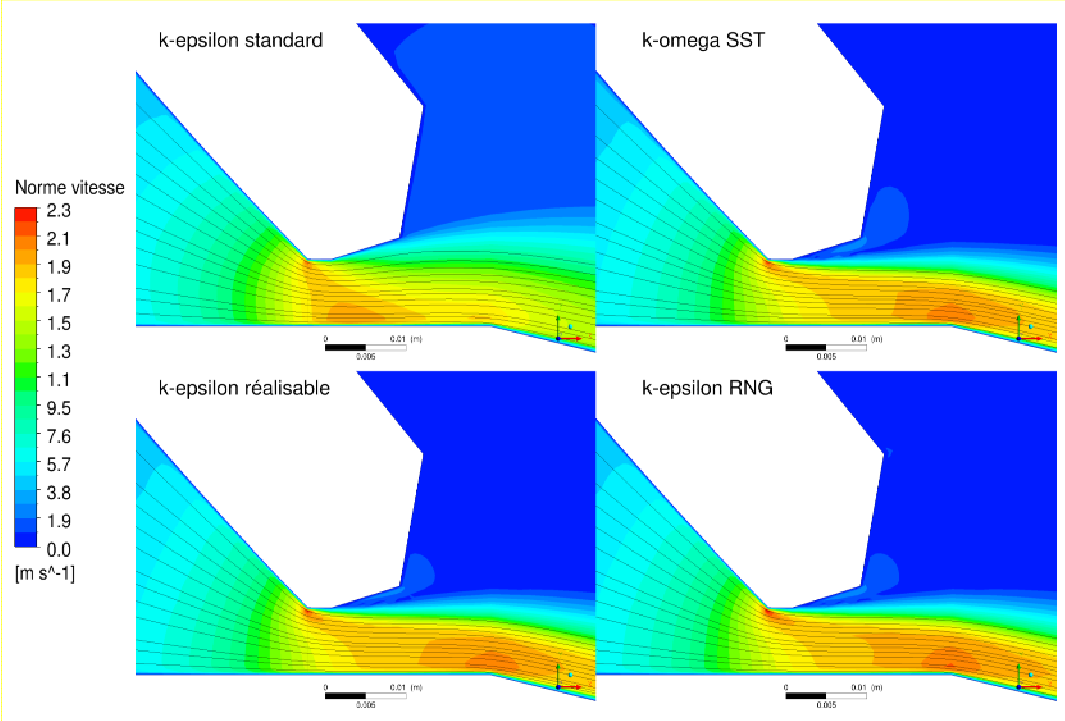


Figure 12 : *Iso-contours de la norme du vecteur vitesse moyen de la phase eau au passage de la vanne avec une représentation des lignes de courant pour les simulations numériques utilisant les différents modèles de turbulence.*

L'utilisation du modèle de turbulence est validée par la comparaison des champs de vitesse moyens de simulation 2D représentant l'écoulement dans le plan de coupe transverse de la vanne (cf. **Figure 12**). Les lignes de courant et les isocontours de la vitesse moyenne montrent que le modèle k-ε ne prédit pas de décollement de l'écoulement sur la face inférieure du couteau de la vanne. La prédiction de celui-ci est faite par les corrections RNG et réalisable du k-ε.

Pour chaque modèle de turbulence, le débit qui passe sous la vanne est comparé au débit du modèle physique. Le modèle k-ω SST présente le plus faible écart en termes de débit par rapport au modèle physique.

k-eps standard	k-epsilon RNG	k-epsilon réalisable	k-omega SST
+14.6 %	+8 %	+6.8%	+3.8 %

***Tableau 5** : comparaison des débits dans le modèle par rapport au débit du modèle physique pour différents modèles de turbulence.*

À l'instar de ces deux modèles le k-ω SST prédit un décollement plus important limitant d'autant plus la section de passage apparente. Ces prédictions sont consistantes avec les débits sous la vanne qui sont surestimés par les k-ε alors que le k-ω SST rentre dans les marges d'erreur des incertitudes des mesures. Ces résultats 2D sont confirmés par les résultats 3D sur les domaines intermédiaires en comparaison avec les mesures expérimentales menées sur le modèle physique.

Simulations à l'échelle 1 pour déterminer les lois de débitance des vannes

Le modèle à l'échelle 1 a été construit. A ce jour, le maillage est en cours d'optimisation. Les premiers résultats sont présentés dans la **Figure 13**.

Les simulations vont être réalisées pour 20 points de fonctionnement du barrage de Vaugris en écoulement mixte. Pour chaque point de fonctionnement, des simulations seront réalisées pour 3 cas, le débit transite uniquement par-dessus le volet, uniquement sous la vanne, simultanément sur le volet et sous la vanne, soit un nombre de 60 simulations du modèle numérique à l'échelle 1.

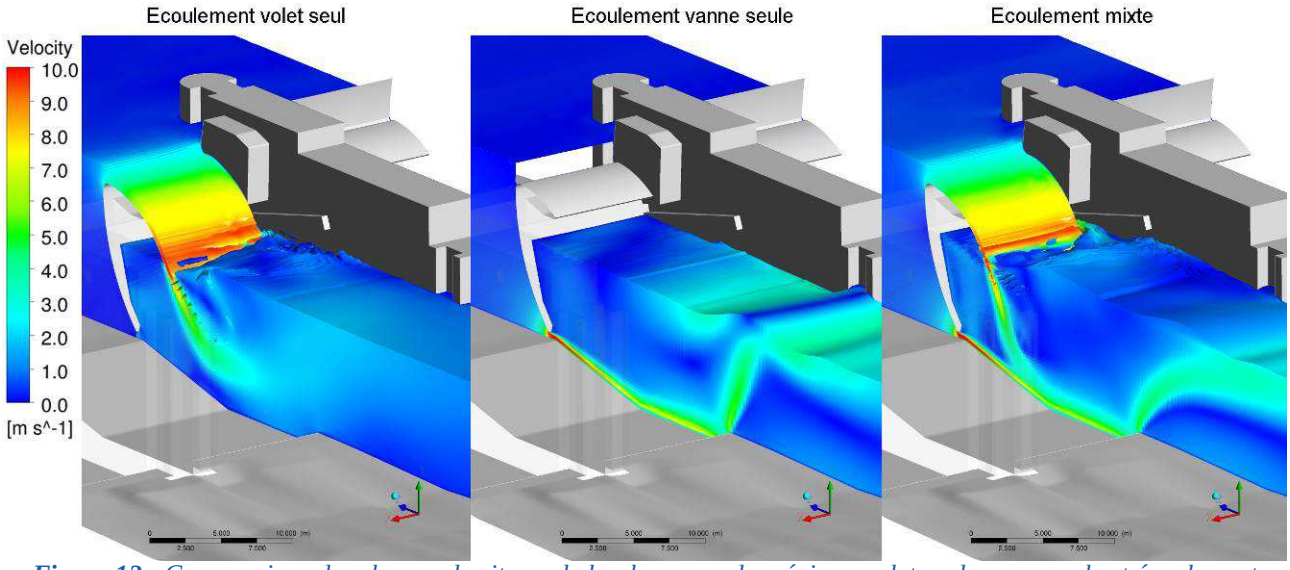


***Figure 13 :** Comparaison des champs de vitesse de la phase eau des régimes volet seul, vanne seule et écoulement mixte.*

Il est prévu d'utiliser, très prochainement, ce type de modélisation sur un autre barrage du Rhône équipé de vannes secteurs. L'objectif étant de déterminer s'il est possible de proposer une correction adimensionnelle sur les lois de débitance pour les écoulements mixtes.

6. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

La connaissance de la débitance des barrages est un enjeu clé pour la CNR et les exploitants en général. La méthode choisie par la CNR pour établir les équations de débitance à partir de mesures réalisées sur un modèle physique en canal vitré est appropriée et performante. Des essais sur un modèle physique d'ensemble ont permis de valider le domaine d'application de ces équations.

Les dernières avancées en cours concernent l'utilisation d'un modèle hybride (modélisation physique et modélisation numérique) pour étudier les corrections de débit à apporter en écoulement mixte (écoulement simultané sous la vanne et sur le volet). Le modèle numérique 3D est calé sur les résultats du modèle physique. Il est d'ailleurs important de noter que cette phase de calage du modèle numérique est essentielle. En effet, les écarts peuvent être très significatifs (> 10%) suivant le choix des paramètres de calage. Les paramètres de calage sont la densité du maillage, le choix du modèle de turbulence, le choix du domaine de modélisation. Le modèle de turbulence retenu est le k-ω SST qui permet une bonne représentation des décollements à l'aval immédiat de la vanne.

Le modèle numérique à l'échelle 1 est en cours d'étude. Les résultats sont attendus pour 2016. Il est à noter que type de modélisation hybride a déjà fait ses preuves pour de nombreuses études réalisées par la CNR (études du système d'alimentation des nouvelles écluses de Panama, études de PCH, étude de la passe à poissons de Sauveterre sur le Rhône,..).

Le choix de la modélisation hybride permet de bénéficier à la fois des atouts de la modélisation physique (pour exemple, représentation de l'ensemble des phénomènes 3D en similitude) et de ceux issus de la modélisation numérique 3D (pour exemple, détermination/visualisation des champs de vitesses, de pression sur de larges domaines). L'ensemble des résultats va permettre de disposer d'une meilleure connaissance des phénomènes physiques mis en jeux.

RÉFÉRENCES ET CITATIONS

[1] Hirt, C.W. & Nichols, B.D. (1981). Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *J. of Computational Physics*, **39(1)**, 201–225.

[2] Paraschivoiu, I., Prud'homme, M., Robillard, L. & Vasseur, P. (2003). *Mécanique des fluides*. Montréal, Presses internationales Polytechnique.

[3] Launder, B.E. & Spalding, D.B. (1974). The numerical computation of turbulent flows. *Comp. Meth. Appl. Mech. Engng.*, **3(2)**, 269–289.

[4] Menter, F.R. (1994). Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA J.*, **32(8)**, 1598–1605.

[5] Yakhot, V., Orszag, S.A., Thangam, S., Gatski, T.B. & Speziale, C.G. (1992). Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique. *AIAA J Physics of Fluids A:Fluid Dynamics.*, **4(7)**, 1510–1520.

[6] Shih, T.H., Liou, W.W., Shabbir, A., Yang, Z. & Zhu, J.. (1995). A new k–ε eddy-viscosity model for high Reynolds number turbulent flows. Model development and validation. *Computers & Fluids.*, **24(3)**, 227–238.

DIAGNOSTICS DE TENUE EN FATIGUE DES VANNES DE FOND

Fatigue analysis of butterfly discharge vaves

Philippe BRYLA, Romain BEAUFILS, Jean-Louis BALLESTER, Laurent SUBLET
EDF-DTG 21, Avenue de l'Europe, 38 040 Grenoble cedex 9, France
philippe.bryla@edf.fr, romain.beaufils@edf.fr , laurent.sublet@edf.fr, jean-louis.ballester@edf.fr

MOTS CLÉS

Vanne de fond, vanne papillon, vibrations, fatigue, concentration de contrainte, rainflow, étendue de contrainte.

RÉSUMÉ

Récemment, EDF a effectué plusieurs diagnostics de vannes de fond de type papillon avec comme objectif de vérifier l'admissibilité des vibrations subies par la vanne en service. Sur quelques cas, la démonstration de la tenue en service de la vanne a nécessité une analyse en fatigue. Les vannes de fond de Gnioure et d'Izourt ont notamment fait l'objet de tels diagnostics. Au fil de ces diagnostics, EDF a dégagé une méthodologie générale d'analyse en fatigue applicable aux vannes de fond. La communication propose une description détaillée des principales étapes de cette méthodologie dans leur généralité et les illustre sur quelques cas de diagnostics récents.
Du fait de l'impossibilité de modéliser ou mesurer l'écoulement hydraulique très complexe à l'aval de la vanne (tourbillonnaire et souvent diphasique dans le cas d'une vanne papillon), la démarche de diagnostic repose sur des mesures directes des niveaux vibratoires ou mesures extensométriques sur des composants de la chaîne cinématique.
Cette méthodologie nécessite la réalisation d'un modèle de calcul de la vanne et/ou de sa chaîne cinématique afin d'identifier les zones à instrumenter, la réalisation d'une analyse modale et la mise en œuvre d'une campagne d'essais comprenant des mesures vibratoires et extensométriques lors de séquences de manœuvre de la vanne. L'analyse des enregistrements comprend un comptage « rainflow » des cycles de contrainte dans les zones critiques. L'étendue de contrainte dans ces zones est obtenue en pondérant si nécessaire la contrainte mesurée par un coefficient de concentration de contrainte issu du calcul.

ABSTRACT

Recently, EDF completed several diagnoses of discharge butterfly valves with the objective of assessing the in-service vibrations level of the valve. On some cases, the valve assessment required a detailed fatigue analysis. Such diagnoses were performed for Gnioure and Izourt discharge valves. In the course of these diagnoses, EDF developed a general framework for fatigue analysis. This communication proposes a detailed description of the main stages of this methodology and illustrates them on some cases of recent diagnoses.
Because of the impossibility to model or measure the very complex hydraulic flow in the downstream of the gate (whirling and often dysphasic in the case of a butterfly gate), direct vibratory and extensometric measures are completed on the components contributing to the command of the valve.
This methodology requires a finite element model of the gate and its command to identify zones to be instrumented. It also requires a modal analysis and the implementation of a performance test with vibratory and extensometric measures.
The analysis of the recordings includes a "rainflow" counting of the stress cycles in the critical zones. The stress amplitude in these zones is obtained by applying a calculated stress concentration coefficient to the measured stress level.

1. LA PROBLEMATIQUE DES VANNES DE FOND DE TYPE PAPILLON

Les vannes de vidange de fond sont des organes qui engagent la sureté hydraulique d'un aménagement hydroélectrique. En cas de besoin lié à la stabilité du barrage, elles doivent permettre la mise en sûreté de l'ouvrage en fonctionnant le temps nécessaire à la baisse rapide du plan d'eau. Ces dernières années, plusieurs vannes de fond ont fait l'objet d'un diagnostic approfondi afin de statuer sur l'acceptabilité du dommage en fatigue susceptible d'être induit par un fonctionnement prolongé à ouverture partielle. Ces diagnostics ont été engagés principalement dans deux cas :

- **Cas n°1 :** Des anomalies sont détectées par l'exploitant à l'occasion d'essais périodiques de fonctionnement : il s'agit généralement de vibrations et de bruits jugés importants. Dans ce cas, on cherche à déterminer l'origine des vibrations et on cherche à statuer sur leur éventuelle nocivité,
- **Cas n°2 :** On souhaite utiliser la vanne pendant une période prolongée à une ouverture intermédiaire, généralement en raison de contraintes à l'aval (limitation du débit admissible). Cette utilisation à ouverture partielle n'est généralement pas optimale pour une vanne papillon et est susceptible de générer des niveaux vibratoires élevés résultant d'un écoulement diphasique complexe. Dans ce cas, on cherche à démontrer la capacité de fonctionnement en sûreté d'une vanne à une ouverture partielle pendant la durée visée.

Ces demandes ont en commun de poser une problématique qui ne peut être traitée efficacement qu'en mobilisant simultanément deux types de compétences déjà impliquées de façon disjointe dans l'analyse des systèmes hydro mécaniques : celles construites sur le REX d'analyses de fonctionnement et de comportement dynamique (hydraulique et vibrations) et celles dédiées à l'analyse des structures et des mécanismes (calcul de structure, analyse des contraintes de service). La mission des premières étant de diagnostiquer le fonctionnement dynamique et de proposer des actions correctives. Et donc de contribuer à comprendre la nature des chargements dynamiques à l'origine des sollicitations. Le rôle des secondes étant de diagnostiquer l'état mécanique et d'analyser les contraintes de service et enfin donner un avis sur la tenue en service des systèmes mécaniques.

Dans cette communication, on expose tout d'abord la méthodologie de diagnostic proposée par EDF, puis on illustre son application sur deux cas de vannes de fond ayant récemment fait l'objet d'un diagnostic détaillé ainsi que sur une vanne pour laquelle l'approche a été appliquée de façon simplifiée sans mesures extensométriques.

2. COMPORTEMENT DYNAMIQUE DES VANNES : INVESTIGATIONS PREALABLES A L'ANALYSE DE LA TENUE EN FATIGUE

L'analyse de la tenue en fatigue d'une vanne implique de comptabiliser les cycles de contrainte ou de déformation auxquels est soumise la structure et à totaliser le dommage qui en résulte. Or une vanne est un ensemble mécanique complexe et particulier sur le plan du comportement dynamique. Cette caractéristique rend la modélisation de la structure incertaine et empêche une approche directe de dimensionnement dynamique par un calcul aux éléments finis prédictif. On distingue plusieurs sources d'incertitudes :

- **Les chargements hydrauliques dynamiques** s'appliquant à la structure sont généralement difficiles à mesurer et généralement impossibles à calculer. Une vanne est soumise en fonctionnement à des efforts fluctuants liés à l'écoulement autour de l'opercule. Ces efforts sont responsables des vibrations et donc de la fatigue de la structure. Une abondante littérature décrit qualitativement les particularités de ce type d'écoulement et les mécanismes d'excitation fluide appliqués aux structures des composants de différent types de vannes. Mais si ces efforts sont prévisibles en nature (fréquence de détachements tourbillonnaires, bruit large bande de turbulence, implosion de poche de cavitation, évolution avec les conditions hydrauliques) ils restent inconnus quantitativement (forme d'onde, amplitude, points d'application) et inaccessible lors d'une approche industrielle,
- L'évaluation des modes vibratoires est très sensible aux hypothèses faites sur la **rigidité des liaisons internes de la structure** ainsi qu'aux **conditions aux limites** retenues,
- Les vannes sont en effet constituées de plusieurs composants assemblés rigidement (assemblages boulonnés, ajustements bloqués) ou avec jeu (mécanisme de commande, mobilité, guidage et étanchéités de l'opercule ou du tablier). Les mécanismes de commande constituent des structures périphériques

généralement découplées mécaniquement du corps principal (arbre de commande, ou brimballes par exemple). Le comportement vibratoire de ce système mécanique sous l'effet des efforts hydrauliques va donc impliquer à la fois des modes de déformations locaux des structures périphériques et des modes des composants principaux (opercule, corps de vannes). En pratique, il est très délicat de modéliser correctement les liaisons entre les composants du système,

- Les liaisons du système avec l'extérieur impliquent généralement des interfaces avec des éléments de génie civil qui peuvent être représentées par des raideurs et des amortissements. Cependant, la rigidité de ces liaisons est souvent mal connue.

On expose, dans la suite, une méthodologie permettant de contourner empiriquement ces particularités par une approche mixte : essais vibratoires et extensométriques, calcul, traitement des contraintes mesurées et calcul d'endommagement.

3. METHODOLOGIE D'ANALYSE DE LA TENUE EN SERVICE DES VANNES SOUS ECOULEMENT

L'analyse de la tenue en fatigue d'une vanne consiste :

- à établir le niveau et la forme temporelle des contraintes dans les zones les plus sollicitées du système mécanique constituant la vanne,
- à déterminer le niveau d'endommagement en fatigue résultant de l'application de ces contraintes variables,
- à statuer sur l'admissibilité de ce dommage pour la tenue en service de la structure sur sa durée prévisionnelle d'exploitation.

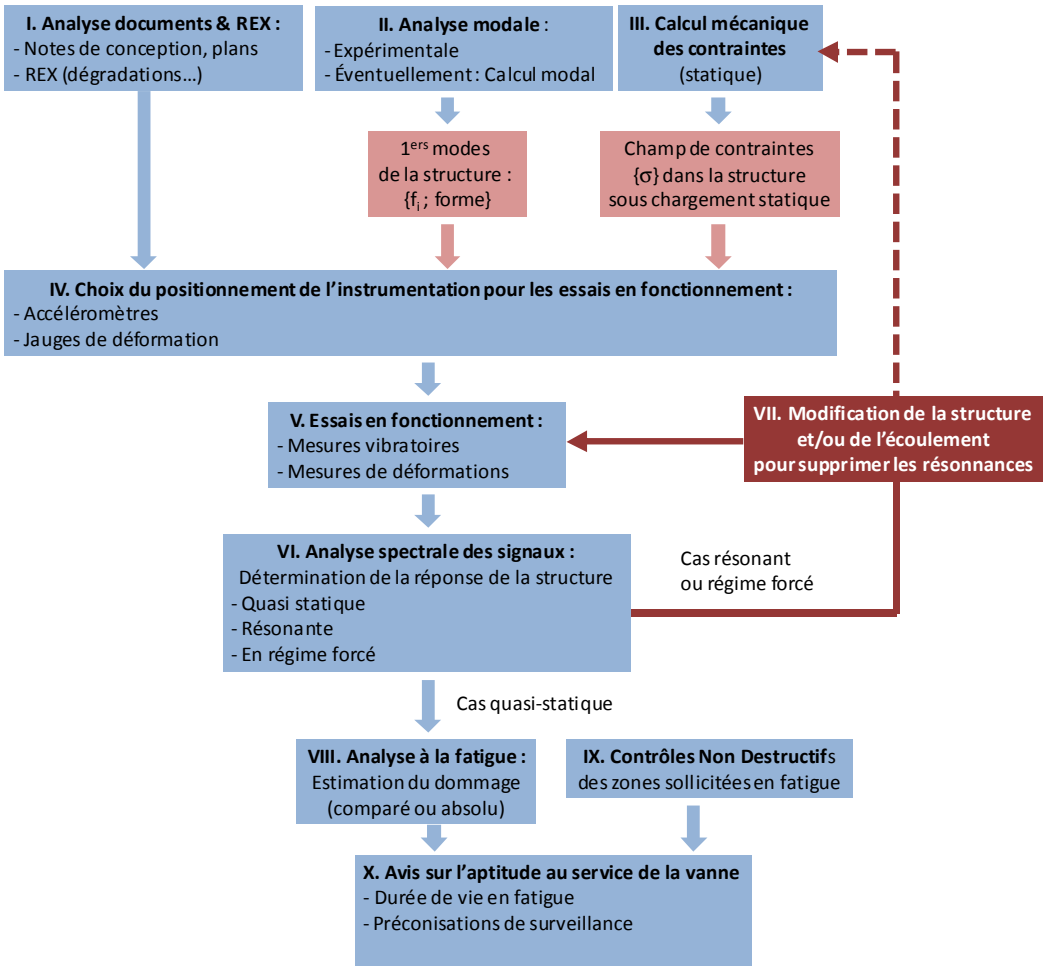


Figure 1 : *Enchaînement des phases de la méthodologie*

La méthodologie proposée a pour but de contribuer à réduire les incertitudes vibratoires décrites précédemment par une analyse préalable et un diagnostic vibratoire. Dans un 2ème temps, on cherche les possibilités de réduire les niveaux vibratoires. Enfin, on analyse les niveaux résiduels de contraintes et on quantifie leur nocivité en fatigue. Le synoptique ci-dessus détaille l'enchaînement des phases de la méthodologie proposée. Elle comprend 10 phases, qui sont décrites dans la suite.

Les phases II et VIII (respectivement l'analyse modale et l'analyse à la fatigue) sont par ailleurs détaillées au moyen de 2 synoptiques spécifiques.

3.1. Analyse documentaire et REX

Tout diagnostic de tenue en fatigue commence par une analyse de la documentation disponible sur la vanne et du REX associé. Sans nécessairement effectuer un diagnostic complet de la vanne, on analysera *a minima* les points suivants en préalable au diagnostic de tenue en fatigue (phase I):

- La technologie : Type de vanne, de commande, implantation mécanique et hydraulique, analyse du REX de fonctionnement hydromécanique, avis d'expert,
- La morphologie : ensembles monolithiques composant la vanne et ses liaisons, conditions aux limites des structures fonctionnellement nécessaires et liées à la vanne, possibilité de modes propres vibratoires (locaux ou d'ensemble),La santé structurelle : on localise « à vue d'expert » à l'aide des plans mécaniques, lors d'une visite sur site et après examen du REX de maintenance de la vanne, les zones susceptibles de présenter des niveaux d'efforts vibratoires particuliers (matage, produits de friction).

3.2. Analyse modale

La phase II du processus consiste à identifier les modes propres du système ou des différents systèmes le composant (corps, opercule, chaîne cinématique). Pour ce faire, on procède à une identification des modes, structure à l'arrêt : la réponse de la structure à des sollicitations ponctuelles est mesurée au moyen d'accéléromètres. Le positionnement des accéléromètres peut être choisi en fonction des modes calculés au préalable au moyen d'un modèle aux éléments finis ou déterminés par un avis d'expert *a priori*. Si un tel modèle est disponible, une comparaison calculs / mesures des 1ers modes est effectuée. Les désaccords entre ces résultats sont fréquents : ils peuvent provenir d'une modélisation incorrecte de la rigidité de liaisons internes au système, à la non prise en compte de jeux entre éléments mobiles ou à une mauvaise modélisation des conditions aux limites (par exemple : modélisation d'une liaison au béton par un encastrement infiniment rigide…). Au final, la modification des hypothèses du modèle peut permettre de recaler celui-ci pour réduire les écarts avec l'analyse modale expérimentale.

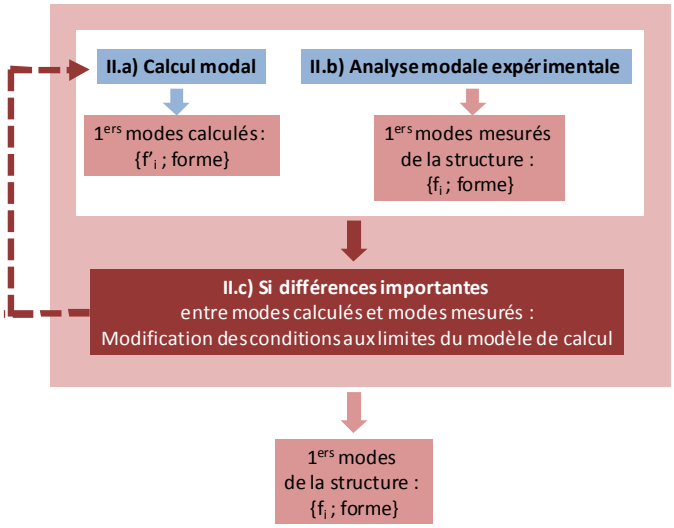


Figure 2 : *Détail de l'analyse modale*

3.3. Mesure du comportement vibratoire de la vanne en service

Les mesures réalisées lors d'un ou plusieurs essais de manœuvre de la vanne permettent d'appréhender le comportement du système mécanique dans son ensemble (tablier ou opercule, corps de vanne) ainsi que les comportements particuliers de certains composants de la chaîne cinématique (arbre ou bras de commande, vérin, tige). Ces mesures permettent aussi de localiser les zones les plus sollicitées lors des déformations vibratoires en service de la structure. Pour ce faire, on procède à une ouverture par paliers de la vanne. On effectue généralement deux types de mesures, pendant une durée de quelques minutes à chaque palier d'ouverture :

- **Des mesures vibratoires au moyen d'accéléromètres (phase V) :** Ces mesures visent à quantifier les plages de fonctionnement conduisant aux sollicitations enveloppes. Les grandeurs dynamiques mesurées sont le plus souvent des accélérations locales. Les paramètres d'état de la vanne sont collectés en même temps que les mesures de vibrations (position de l'opercule, cote ou pression amont et aval),
- **Des mesures de déformations dynamiques par jauges extensométriques (phase V) :** Ces mesures fournissent un complément précieux au diagnostic de fonctionnement vibratoire car elles donnent un moyen direct d'évaluer la nocivité éventuelle des vibrations à basse fréquence, même en présence de bruit large bande provoqué par les efforts lié à l'écoulement, ce qui est communément rencontré sur les vannes. Elles permettent souvent de contourner les problèmes de mesure liés à la saturation des accéléromètres du fait de leur résonnance. Ces mesures permettent également d'obtenir directement l'étendue de contrainte aux points instrumentés. Ces derniers sont positionnés en fonction de l'analyse mécanique préalable et des mesures à l'arrêt (Phase IX).

3.4. Analyse des mesures vibratoires et traitement du signal

L'analyse (phase VI) consiste à classer le comportement des composants du système mécanique constituant la vanne dans l'une des trois classes A, B, C décrites ci-après. Pour ce faire, on effectue un traitement des signaux (déplacements, déformations) mesurés lors des essais en fonctionnement, l'interprétation des fonctions spectrales étant guidée par les résultats de l'analyse modale. En particulier, le signal de déformation délivré par les jauges de contraintes doit être traité numériquement avec celui des capteurs de vibrations, notamment pour la recherche des bandes de fréquence pour lesquelles les fonctions de transfert et de cohérence entre vibrations et déformations sont d'amplitudes maximales, ce qui permettra de conforter le diagnostic de nocivité de chaque composante fréquentielle détectée par les capteurs de vibration. Suivant les composants, les différentes classes peuvent être présentes simultanément :

- Classe A : Le comportement vibratoire est **« quasi statique »** c'est-à-dire que les fréquences propres des structures impliquées excitées par les efforts hydrauliques à large bande ne sont pas associées à des facteurs d'amplification importants. Aucun sous ensemble mécanique ne présente de niveaux de vibrations amplifiés par des résonances. La forme d'onde des contraintes est simple : son spectre fréquentiel comprend quelques émergences de pics assez larges,
- Classe B : Le comportement d'ensemble est du type **« régime forcé »** : les niveaux de vibration sont élevés sous l'effet de l'excitation large bande lié à l'écoulement. Plusieurs composantes de fréquences propres sont détectées lors du traitement du signal des mesures de vibrations, mais sans émergence marquée de l'une d'entre elles. La forme d'onde des contraintes est complexe,
- Classe C : Le comportement vibratoire est du type **« résonant »** : le composant de la vanne qui présente le plus fort niveau vibratoire est le siège de vibrations à bande étroite. La fréquence propre impliquée est voisine de celle identifiée ou détectée lors des mesures à l'arrêt.

3.5. Réduction des niveaux de réponses mesurés en service : diagnostic vibratoire

Suivant les classes de comportement vibratoire caractérisant le comportement, il y a lieu de s'interroger sur les possibilités de réduction des niveaux vibratoires mesurés : sont-ils la signature de dysfonctionnements, ou de défauts mécaniques ou de conditions d'écoulement particulières ? C'est l'objet de la phase VII de la méthodologie, qui doit être mise en œuvre dès lors que certains fonctionnements sont détectés comme ne présentant pas un comportement vibratoire « quasi-statique » (classe A), ce comportement n'appelant généralement pas de correction particulière et pouvant être traité directement sous l'angle de la tenue en fatigue.

Ainsi, un comportement de type « régime forcé » (classe B) doit plutôt inciter à une analyse des efforts appliqués (et donc des phénomènes générateurs) afin de rechercher une correction éventuelle.

De même, un comportement « résonant » (classe C) doit inciter à une critique dynamique de la conception des sous ensembles concernés et de la nature du phénomène d'auto excitation impliqué. La recherche de corrections agissant à la fois sur la structure et sur la nature des efforts hydrauliques fluctuants : corrections structurelles (masses-raideur) susceptible de déplacer les fréquences propres gênantes, de conception de forme modifiant les phénomènes d'excitation impliqués (par exemple : action sur les bords de fuite en cas de détachements tourbillonnaire de sillage, aération de l'écoulement, phénomènes hydro acoustique d'interaction vanne/conduit…).

3.6. Analyse en fatigue des contraintes de service

3.6.1. Description du processus général

Le comportement en fatigue des éléments de la vanne dépend de l'interaction complexe entre le chargement, les caractéristiques du matériau et la géométrie du (ou des) composant(s) concernés. Le synoptique ci-après décrit le processus général d'analyse à la fatigue à grand nombre de cycles. Il détaille les étapes de la phase VIII de la méthodologie.

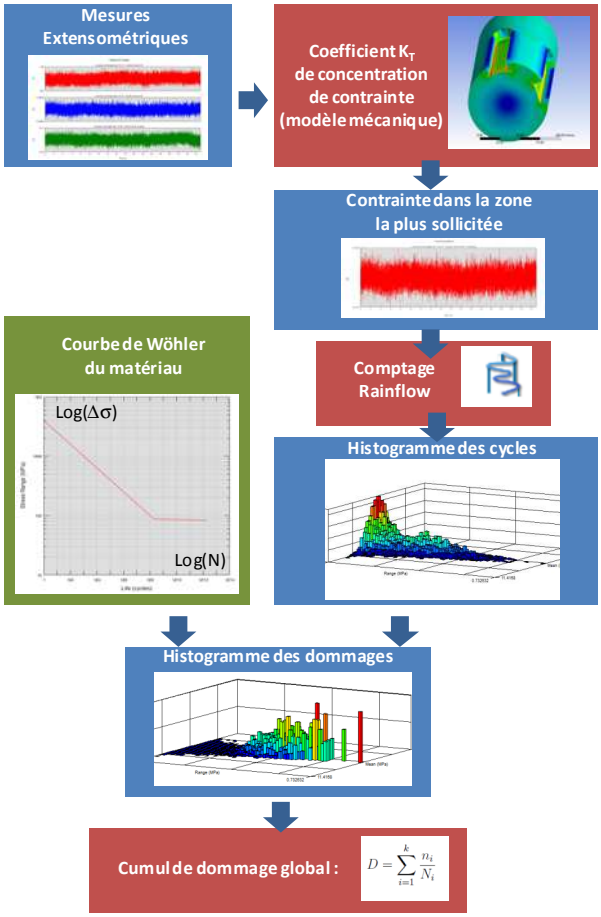


Figure 3 : *Processus général d'analyse en fatigue*

Dans ce processus, on estime tout d'abord le signal temporel de la contrainte dans la zone la plus sollicitée à partir du signal temporel des déformations enregistrées par les jauges de déformation. Cette estimation repose sur le calcul d'un facteur de concentration de contrainte plus ou moins élaboré suivant la précision souhaitée : voir §3.6.2. Dans le cas d'un chargement multiaxial, on s'intéresse à la 1ère contrainte principale $\sigma_I(t)$ susceptible d'amorcer un défaut de fatigue en mode I ou à la contrainte équivalente (Tresca ou Von-Mises) $\sigma_{éq}(t)$.

Le calcul du dommage en fatigue résultant de l'application de cette contrainte variable nécessite une caractérisation du matériau en fatigue. On indique au §3.6.3 quelques règles générales utilisables pour choisir une courbe de Wöhler enveloppe du matériau concerné cohérente avec le critère de contrainte retenu.

Enfin, un calcul du dommage peut être effectué. Ce calcul repose sur un comptage des cycles de contrainte (chaque cycle étant caractérisé par sa valeur moyenne et son amplitude) de type « rainflow » (voir [4]), puis sur un cumul linéaire des dommages élémentaires associés à chaque classe de cycles : voir §3.6.4.

3.6.2. Estimation des contraintes à partir des mesures en essai

En règle générale, les jauges de déformation sont positionnées dans des zones où l'amplitude de variation de la contrainte est significative. On évite cependant les zones où le champ de contrainte est trop perturbé. Ces zones sont en général trop complexes géométriquement (congés de raccordement, rainures de clavettes…) et le collage y est trop délicat. De plus, l'incertitude de positionnement des jauges de déformation dans ces zones peut conduire à une incertitude très forte sur le niveau de contrainte compte tenu des forts gradients locaux.
Par conséquent, on détermine, chaque fois que cela est possible, le positionnement des jauges à partir de la connaissance du champ de contraintes résultant d'un calcul mécanique préalable (phase IV). Suivant la complexité de la géométrie, il peut s'agir d'un modèle analytique ou aux éléments finis. Le calcul des contraintes dans les zones les plus sollicitées consiste alors à multiplier les contraintes mesurées à partir des jauges de déformation par le coefficient de concentration de contrainte K_T déduit du modèle mécanique. On peut rendre ce calcul moins conservatif en remplaçant le calcul du coefficient de concentration statique K_T de contrainte par le coefficient de concentration en fatigue K_F. Ce dernier coefficient, toujours inférieur au coefficient statique, intègre le gradient de contrainte $\chi_F = \frac{1}{\sigma} \times \lim_{x \to 0} \frac{d\sigma}{dx}$ perpendiculairement à la surface. On trouve dans [1] les abaques permettant de calculer le rapport K_F/K_T en fonction de χ_F.

Afin de permettre un calcul plus précis des contraintes pour l'analyse à la fatigue dans les zones les plus sollicitées, on peut estimer l'effet de l'incertitude de positionnement des jauges de déformation. Cette incertitude peut être couverte par un **coefficient K_{Loc}**, correspondant au rapport entre la valeur maximale σ_I^{sup} et la valeur minimale σ_I^{inf} de la 1ère contrainte principale sur le disque d'incertitude de positionnement. σ_I^{sup} et σ_I^{inf} sont calculées au moyen du modèle mécanique de calcul des contraintes.

Au final, la contrainte dans la zone de concentration s'obtient en multipliant la contrainte mesurée en zone courante par : $\mathbf{K_G = K_{LOC} \times K_T}$ **ou** $\mathbf{K_G = K_{LOC} \times K_F}$.

3.6.3. Caractérisation du matériau en fatigue

Afin de pouvoir calculer le dommage associé à chaque cycle de contrainte, on a besoin de connaître la courbe ($\Delta\sigma$, N) caractérisant l'endurance du matériau en fonction du nombre de cycles. Cette courbe est généralement décrite par une forme analytique de Wöhler de la forme : $\sigma_{adm} = C \times N^b$ (en log)

Dans la plupart des diagnostics de fatigue, on ne dispose pas de la courbe de Wöhler du matériau concerné. On doit donc procéder par analogie à partir d'une caractérisation sommaire du matériau. Suivant les cas, les données permettant de caractériser le matériau se limitent à sa limite de rupture R_m. Cette limite de rupture est obtenue à partir du plan d'origine, de la note de calcul, d'un certificat d'approvisionnement de la pièce ou ajustée sur des mesures de dureté. On distingue classiquement 3 types de matériaux pour la résistance à la fatigue :

- **Les matériaux mécano-soudés :** En fonction de la nuance du matériau (ou des caractéristiques mécaniques mesurées ou obtenues d'après la documentation de l'époque de la construction) et du type d'assemblage soudé, on retient une courbe de fatigue correspondant au couple {matériau ; classe de résistance à la fatigue de la soudure} conformément à l'Eurocode (section 1.9) ou au CODAP (section C11) : voir [2] et [3],
- **Les matériaux forgés :** On peut prendre en compte une limite d'endurance forfaitaire à 10^6 cycles égale à $\mathbf{\sigma_D = 0{,}45 \times R_m}$. Ce calcul de la limite d'endurance est enveloppe des différentes corrélations entre R_m et σ_D proposées dans [1]. En l'absence de toute donnée plus précise sur le matériau, on peut choisir une droite de Wöhler de pente b = -0,2 passant par le point ($N=10^6$; σ_D),
- **Les matériaux moulés :** On prend en compte la même loi d'évolution de la limite d'endurance que pour les matériaux forgés. Pour les matériaux moulés anciens dont l'état de surface présente généralement une rugosité élevée (absence de meulage), on diminue forfaitairement de 30% la limite d'endurance (enveloppe des courbes de coefficients d'état de surface proposée dans [1]). Comme dans le cas des matériaux forgés, on retient également une droite de Wöhler de pente b = -0,2 passant par le point ($N=10^6$;σ_D).

Enfin, quel que soit le matériau, on doit tenir compte des incertitudes sur la limite d'endurance afin de sélectionner une courbe de Wöhler correspondant à une probabilité de rupture adaptée à l'enjeu de la vanne étudiée. Dans le cas d'un organe à enjeu sûreté, on peut opter une loi correspondant à une probabilité de rupture inférieure ou égale à 10^{-3}. Des essais effectués sur un grand nombre de matériaux montrent que l'écart-type de la limite d'endurance est quasiment toujours inférieur à 0,1 x σ_D. Sous l'hypothèse d'une distribution normale, on peut donc retenir la courbe de fatigue située à 3 écart-types sous la courbe moyenne. On retient donc au final : $\mathbf{\sigma'_D = 0,7 \times \sigma_D}$.

3.6.4. Comptage des cycles en fatigue et calcul du dommage

Sur les zones de plus forte contrainte, on procède à un comptage de type « Rainflow », qui consiste à construire un histogramme global des cycles en fonction de l'amplitude de la contrainte σ_m et de l'étendue de contrainte $\Delta\sigma_m$ à partir du signal temporel de la contrainte $\sigma(t)$. Ce comptage est effectué pour chaque régime de fonctionnement.

A partir de cet histogramme, on construit ensuite un histogramme des dommages associés à chaque couple {amplitude de contrainte σ_m ; étendue de contrainte $\Delta\sigma_m$} en utilisant la courbe de Wöhler. Le cumul des dommages est ensuite calculé en appliquant la règle de cumul linéaire de Miner. Ainsi, pour chaque classe de cycles de fonctionnement i caractérisée par $\{\sigma_m(i) ; \Delta\sigma_m(i)\}$, on calcule le dommage correspondant : $d_i = n_i / N_{adm}(i)$ où $N_{adm}(i)$ désigne le nombre de cycles de contrainte admissible pour le niveau $\Delta\sigma_i$. Le dommage global sur la durée de vie du matériel s'obtient ensuite en appliquant la règle de cumul de Miner : $\mathbf{D = \Sigma_i d_i}$.

Une correction de contrainte moyenne de Goodman peut être appliquée pour prendre en compte la composante statique des cycles de contrainte. On considère que la probabilité de rupture par fatigue devient inacceptable lorsque le dommage global ainsi calculé est égal à 1.

3.7. Contrôles Non Destructifs

Une fois réalisée l'analyse en fatigue à grand nombre de cycles, on connaît les zones critiques de la vanne. Il convient donc de s'assurer de la qualité matière de ces zones. On vérifie notamment l'absence de défauts débouchant ou presque débouchant dans les zones de concentration de contraintes. En effet, l'analyse à la fatigue est menée en utilisant comme critère d'endommagement une courbe de Wöhler, mais en aucun cas on n'étudie la cinétique de propagation d'un défaut détectable préexistant dans la structure. On doit donc vérifier l'absence de tels défauts. C'est l'objet de la phase IX de la méthodologie. En pratique, les CND mis en œuvre sont du ressuage ou de préférence de la magnétoscopie ou de l'ACFM (« Alternating Current Field Measurement » : technique de Contrôle Non Destructif qui permet de détecter des défauts internes affleurant la surface de la pièce). En complément, des mesures ultrasonores peuvent être mises en œuvre pour caractériser la profondeur de défauts détectés par les techniques de détection surfaciques.

3.8. Avis sur la tenue en fatigue de la vanne et préconisations

A partir de la connaissance du nombre de la durée totale de fonctionnement prévue de la vanne sur sa période d'exploitation, on peut extrapoler le dommage mesuré sur des intervalles de temps limités pendant les phases d'essais.
Suivant les cas, l'avis sur la tenue en fatigue peut être complété par des préconisations de surveillance ou de contrôles périodiques. Par exemple, lorsque le niveau de dommage est jugé élevé (supérieur à 10^{-2}), on pourra recommander d'effectuer régulièrement des contrôles surfaciques des zones les plus sollicitées en fatigue.

4. EXEMPLE D'APPLICATION DE LA METHODOLOGIE A LA VANNE DE FOND DE GNIOURE

Début 2011, compte tenu de fuites constatées sur le parement amont du barrage, il a été décidé d'exploiter temporairement la retenue de Gnioure à une cote plus basse que celle des évacuateurs de surface. Dans cette configuration, la vanne de fond devait donc pouvoir servir à évacuer une partie des apports lorsque ceux-ci sont supérieurs au débit de l'usine. De plus, pour des raisons de sécurité hydraulique à l'aval du barrage, il n'est pas possible d'évacuer un débit supérieur à 8 m3/s , alors que le débit maximal de la vanne à la cote

maxi du barrage est de 23 m3/s . L'exploitant a donc sollicité DTG pour effectuer un diagnostic vibratoire de la vanne de fond, en vue de démontrer qu'elle pouvait être utilisée à ouverture partielle sur des durées de l'ordre de plusieurs mois.

La vanne de fond du barrage de Gnioure est une vanne de type papillon en acier moulé. Sa lentille est assemblée à son arbre de manœuvre par des goupilles. L'effort de manœuvre est transmis à l'arbre par un bras moulé via 2 clavettes. La chaîne cinématique est à vis + écrou et comporte un renvoi d'angle en sortie du motoréducteur. Le système comporte également un dashpot ayant pour fonction une réduction de la vitesse de fermeture de la vanne en cas de rupture de la chaîne cinématique côté moteur. A l'aval de la vanne, se situe un cône-diffuseur assez court (environ 1,5 m) totalement dénoyé. L'écoulement aval se produit donc sans dissipation d'énergie et est susceptible, aux ouvertures partielles de la vanne, de produire une excitation hydraulique très fluctuante. La figure 4.b montre une vue depuis l'aval en fonctionnement à ouverture partielle.

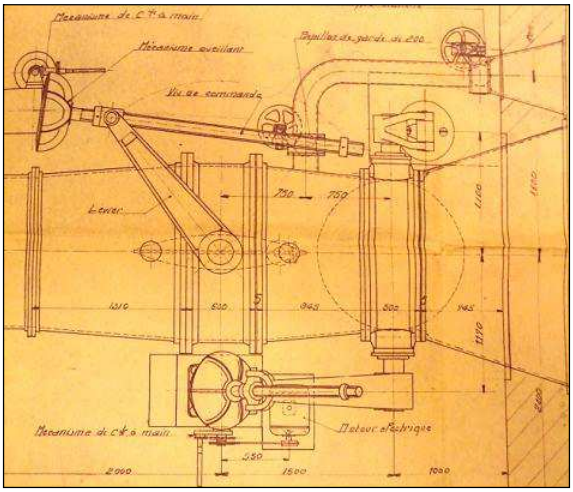


Figure 4.a : *Vue de dessus de la vidange de fond (vanne de garde et vanne de fond) de Gnioure*



Figure 4.b : *Vue aval de la vanne de fond de Gnioure à ouverture partielle (θ=50°)*

Pour les essais, le corps de la vanne, ainsi que les principaux éléments de sa chaîne cinématique (arbre et tige de manœuvre) ont été équipés de jauges de déformation. De plus, 16 zones ont été instrumentées par des accéléromètres. Les essais ont consisté à ouvrir progressivement la vanne de 0° à 60°, par pas de 5° environ.

Un calcul analytique préalable a montré que les zones de plus forte contrainte étaient, de très loin, les rainures de clavette de l'arbre moteur. Un calcul par éléments finis a donc été mené afin d'obtenir les niveaux de contrainte dans les rainures en fonction de la contrainte dans la zone courante de l'arbre (voir figures 6.a et 6.b), qui est la seule zone qu'il est possible d'instrumenter sur ce composant. La figure 5.a montre l'instrumentation (pont de torsion et accéléromètres) sur l'arbre de la lentille. On constate sur cet exemple que le coefficient de concentration de contrainte : $K_{TS} = \frac{\sigma_I^{max}}{\tau_{zone-courante}}$ peut être très élevé. Dans le cas étudié, on a K_{TS} = 4. Par ailleurs, l'incertitude de positionnement des jauges a une influence négligeable sur la mesure de la contrainte de torsion dans la zone non perturbée de l'arbre. On a donc K_{LOC} ~ 1. Enfin, le faible gradient de contrainte à partir de la surface (χ_F=0,18 mm^{-1}) conduit à un coefficient K_F de concentration en fatigue très peu différent du coefficient de concentration statique K_{TS}. Au final, on retient donc un coefficient de concentration global K_G = 4 à appliquer à la contrainte de torsion mesurée en zone courante de l'arbre.
L'analyse spectrale des accélérations enregistrées sur l'arbre de la chaîne cinématique (voir figure 5.b) montrent que le niveau global d'accélération est principalement porté par les émergences à 124 Hz et 342 Hz. Quelle que soit l'ouverture de la vanne entre 0° et 60°, ces niveaux restent cependant extrêmement faibles. On en déduit que les facteurs d'amplification des modes propres impliqués sont faibles, ce qui justifie la possibilité d'analyser les contraintes de façon **quasi statique.** Les déformations vibratoires de la structure de la vanne n'appellent donc pas de correction visant à réduire les chargements vibratoires.

Sur le plan du diagnostic vibratoire de fonctionnement, une analyse des signaux temporels d'accélération de la chaîne cinématique permet de déterminer un facteur kurtosis (ou coefficient d'aplatissement) assez voisin de 3. Ce

facteur caractérise la forme de la distribution des amplitudes de signaux. Un niveau voisin de 3 indique une distribution dont l'aplatissement est proche de celui d'une distribution normale, ce qui signe l'absence de jeux anormaux dans les dentures transmettant les efforts de manœuvre à la lentille de la vanne. On ne retient donc pas l'hypothèse d'un chargement vibratoire lié aux chocs résultant de jeux de fonctionnement.



Figure 5.a : *Instrumentation de l'arbre*

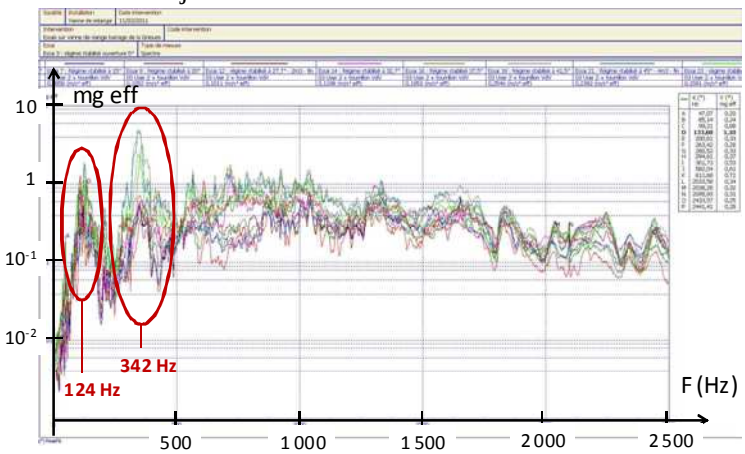


Figure 5.b : *Spectres des accélérations sur l'arbre côté bras moteur de la vanne de fond de Gnioure*

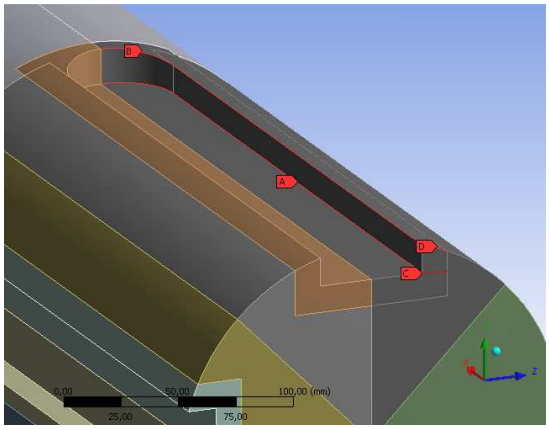


Figure 6.a : *Identification des lignes de dépouillement des contraintes (rainure de clavette)*

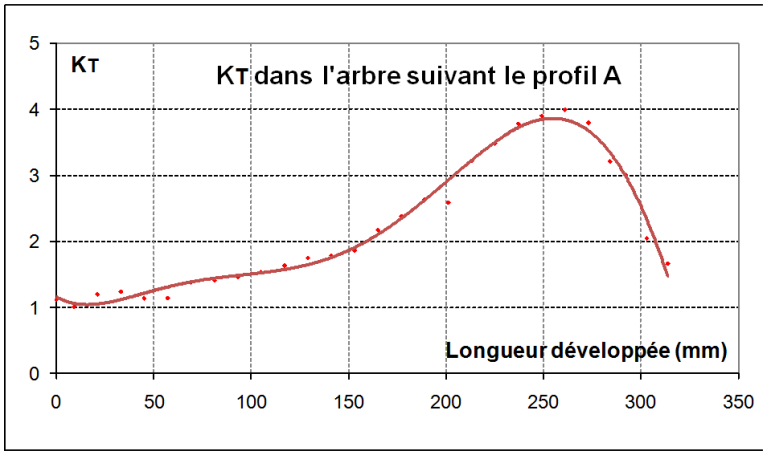


Figure 6.b : *Coefficient de concentration de contrainte le long des lignes A et B (en fond de rainure de clavette)*

L'arbre de la vanne de fond de Gnioure est en acier forgé. Des mesures de dureté ont permis d'estimer une limite de rupture R_m = 530 MPa. La limite d'endurance retenue à 3 écarts-types à 10^6 cycles vaut donc : σ'_D = 0,7 x 0,45 x 530 = 167 MPa. L'équation de la courbe de Wöhler retenue pour le calcul d'endommagement est donc : $N = 10^6 \times \left(\frac{\sigma'_D}{\Delta\sigma} \right)^5$.

Au final, on est donc en mesure de construire l'histogramme de cycles de contrainte et l'histogramme des contributions de chaque classe de cycles au dommage global en fond de rainure de clavette de l'arbre : voir figure 7. Les cycles et l'endommagement sont comptabilisés pour une ouverture de la vanne θ=60°, correspondant au mode de fonctionnement le plus endommageant en fatigue. Ils ont été obtenus au moyen du logiciel nCODE®. On a ensuite extrapolé, pour chaque ouverture θ de la vanne, une durée de fonctionnement de la vanne pendant une année entière. La figure 8 montre l'endommagement résultant d'une année complète de fonctionnement en fonction de l'ouverture de la vanne. On constate que l'endommagement cumulé en fatigue reste très faible (inférieur à 10^{-3} quel que soit l'angle d'ouverture).

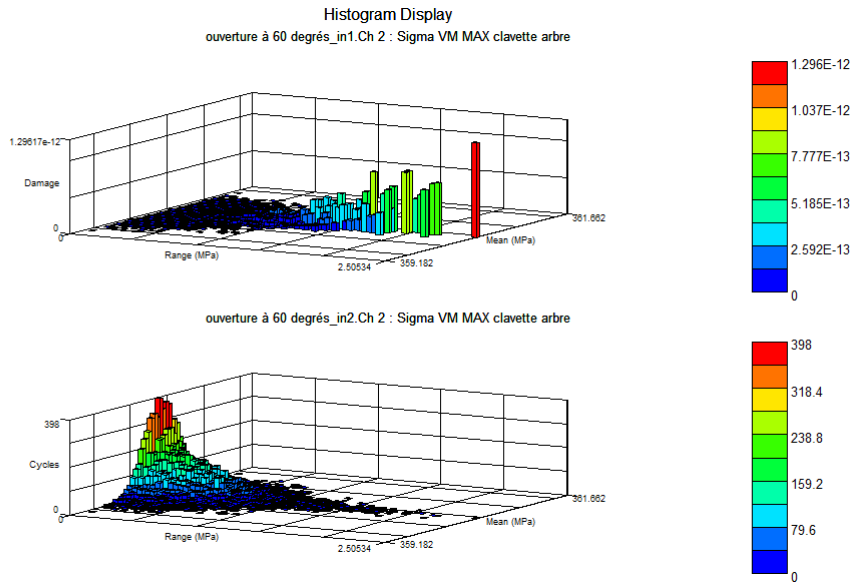


Figure 8 : *Détail du comptage des cycles et répartition du dommage en fond de rainure de clavette sur 100s*

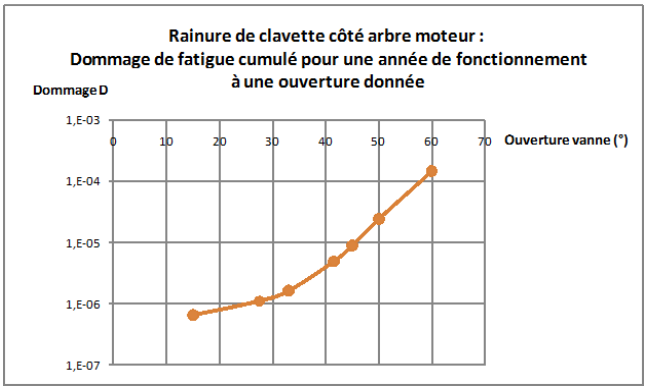


Figure 9 : *Dommage cumulé dans la rainure de clavette côté arbre pour une année de fonctionnement*

5. APPLICATION DE LA DEMARCHE A LA VANNE DE FOND D'IZOURT

Compte tenu des stocks neigeux importants cumulés pendant l'hiver 2013 dans les Pyrénées, une évacuation partielle des crues avec la vanne de vidange de fond du barrage d'Izourt a été envisagée, en complément du dispositif classique d'évacuation des crues (seuil déversant) du barrage.

La vanne de vidange de fond du barrage d'Izourt est une vanne de type papillon moulée à axe horizontal.
Cette vanne étant susceptible d'être ouverte partiellement de façon prolongée, il a donc été nécessaire d'évaluer le risque en fatigue d'un tel fonctionnement. Une analyse couplée vibratoire/extensométrique comme présentée précédemment a donc été menée.

Les points clefs de la démarche mise en œuvre sur Izourt ont été les suivants :

- Identification des zones critiques (liaisons mécaniques entre l'arbre et la lentille et entre l'arbre et le bras de manœuvre),
- Caractérisation de l'acier,
- Instrumentation,
- Calcul pour relier les contraintes mesurées aux zones de concentrations de contraintes,
- Définition d'une courbe de fatigue,
- Évaluation du dommage et préconisations.

Plusieurs mesures ont été réalisées à différents paliers d'ouverture une fois le régime d'écoulement stabilisé. L'ouverture la plus importante (32,5°) a été identifiée comme étant la plus endommageante avec un dommage cumulé non négligeable sur plusieurs jours de fonctionnement, comme le montre la figure 11 ci-après.



Figure 10 : *Corps de la vanne de vidange de fond d'Izourt*

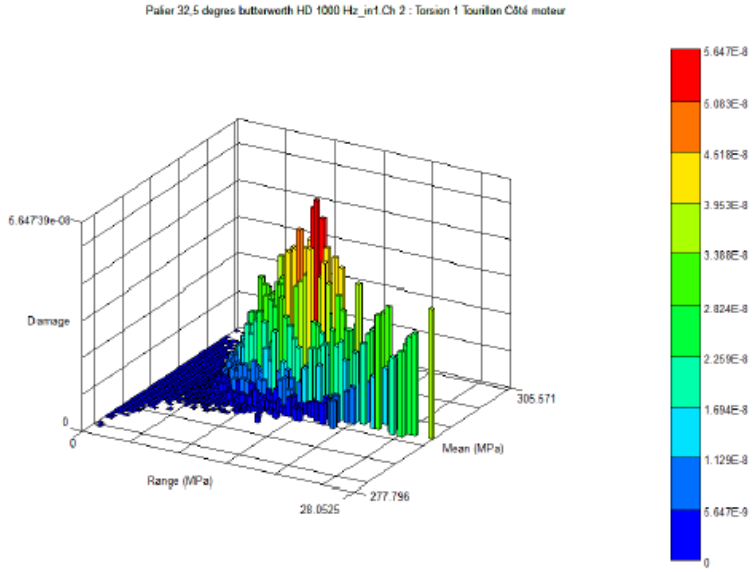


Figure 11 : *Répartition de la contribution au dommage des différents couples (σ moyenne ; σ alternée)*

Au final, il a été préconisé d'utiliser cette vanne ponctuellement de façon exceptionnelle et limitée. En cas d'utilisation supérieure à 30 jours, des contrôles supplémentaires devront être réalisés dans les zones à forte concentration de contraintes.

6. VERS UNE VERSION SIMPLIFIEE DE LA METHODOLOGIE GENERALE

6.1. Justification d'une méthodologie simplifiée sans mesures extensométriques

L'instrumentation en jauges extensométriques n'est pas toujours réalisable du fait des contraintes d'accès aux zones sollicitées mécaniquement. Dans ce cas la démarche présentée ici n'est pas concevable. En faisant l'hypothèse que le comportement des robinets est comparable pour des conceptions proches, une base de REX permet de palier au manque de mesure et de se prononcer sur la nocivité d'un fonctionnement particulier du robinet.

La base de REX en cours d'élaboration contient :

- Le suivi du comportement vibratoire en fonction de l'angle d'ouverture du robinet,
- Le suivi du couple de torsion sur l'arbre en fonction de l'ouverture (donnée généralement prédominante lors du calcul numérique). Cette donnée corrélée avec une valeur de débit pour chaque angle d'ouverture permet d'obtenir les coefficients réduits de couple de la vanne. Avec ces coefficients nous pouvons extrapoler les efforts statiques induits par des fonctionnements non réalisables lors des essais,
- Des exemples significatifs de dysfonctionnements, particularités rencontrées….

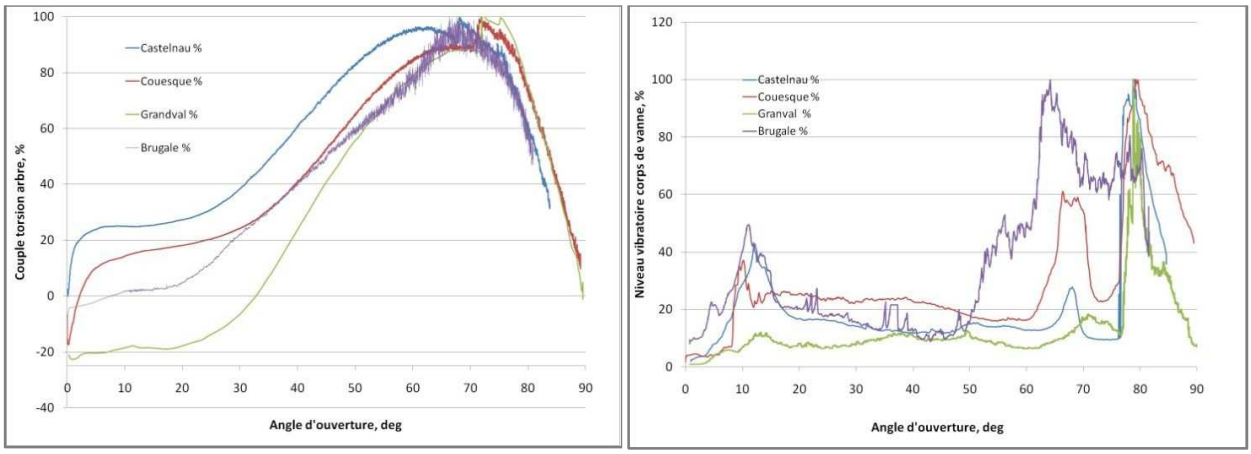


Figure 12 : *Présentation du comportement vibratoire et du couple de torsion de plusieurs robinets en fonction de l'ouverture*

Les premières analyses valident l'hypothèse de départ, justifiant de ce fait la pertinence d'une base de REX. De nos premières mesures nous pouvons déjà conclure :

- Les maxima d'efforts, en statique, sont généralement atteints vers 60 ° d'ouverture,
- Le comportement vibratoire présente en général un légère hausse en faible ouverture, il se stabilise ensuite avant de se dégrader fortement dans la seconde moitié d'ouverture. Cette dégradation est généralement liée à l'apparition d'un régime d'écoulement plus ou moins cavitant,
- En même temps que l'écoulement se dégrade et que les vibrations augmentent lors de la deuxième moitié d'ouverture, les sollicitations dynamiques (oscillations autour de la moyenne) deviennent de plus en plus importantes.

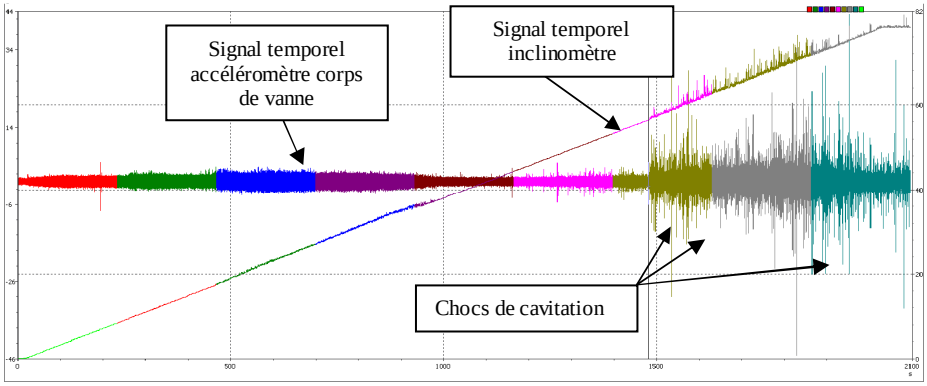


Figure 13 : *Exemple typique d'apparition d'un fort régime cavitant dans la seconde moitié d'ouverture*

6.2. Exemple d'application de la méthodologie simplifiée à la vanne de fond de Naguilhes

Des travaux sont réalisés sur la conduite forcée alimentée par le barrage de Naguilhes. Des contraintes environnementales ne rendent plus réalisable le déversement du barrage. L'exploitant souhaite utiliser la vanne de fond du barrage pour éviter le déversement du barrage durant des travaux.
L'espace entre le levier de commande et le corps de vanne n'est pas suffisant pour coller une jauge mesurant la torsion liée au couple hydraulique exercé sur la lentille. Pour cette vanne nous avons seulement réalisé des

mesures vibratoires. Celles-ci ont mis en évidence un comportement relativement calme sur la première moitié de manœuvre puis l'apparition d'un fort régime cavitant pour des ouvertures supérieures à 45°.
Les diagnostics déjà réalisés montrent que les efforts mécaniques ne sont pas maximums sur la première moitié d'ouverture. En vérifiant la conception de la vanne par rapport aux diagnostics déjà réalisés (dimensionnement/chargement) et en validant l'absence de fortes vibrations sur la première moitié d'ouverture (absence de phénomène de résonance pouvant accroitre fortement les sollicitations mécaniques), nous avons pu émettre un avis positif sur des ouvertures partielles prolongées entre 0 et 45 degré d'ouverture.

7. CONCLUSIONS

Le processus qui vient d'être présenté permet d'analyser de façon exhaustive le comportement vibratoire et la tenue en fatigue d'une vanne soumise à une excitation hydraulique quelconque. Ce processus a été élaboré à partir de plusieurs cas récents de diagnostics de tenue en fatigue Les cas récents d'application (Gnioure, Izourt) ont permis de valider le processus sous la forme présentée dans cet article et de tester le logiciel d'analyse en fatigue nC**ODE®.**
On a pu constater, au travers de l'exemple sur la vanne de fond de Gnioure, que l'application de ce processus permet de quantifier un majorant du dommage en fatigue. De plus, même si ce majorant est parfois très enveloppe du fait des hypothèses faites sur le comportement en fatigue du matériau, l'analyse est intéressante car elle permet de comparer différents modes d'exploitation de la vanne en termes d'endommagement en fatigue résultant.
La mise en œuvre de ce processus reste néanmoins complexe pour plusieurs raisons :

- Elle réclame la mobilisation de compétences multiples réparties dans plusieurs services: compétences en vibrations et en extensométrie, compétences en diagnostic de fonctionnement (impliquant une bonne compréhension du comportement hydromécanique de la vanne, une analyse de ses modes de défaillance potentiels et une analyse du REX événementiel la concernant), compétences sur l'analyse de tenue en fatigue et compétences en CND.
- Elle nécessite des moyens de mesure relativement lourds (instrumentation pouvant nécessiter une à deux semaines d'intervention) avec une durée de dépouillement conséquente. De plus, pour certains éléments mobiles de la chaîne cinématique, des moyens de télémesure peuvent s'avérer nécessaires.
- Elle exige la mise en œuvre de modèles mécanique parfois complexes (par exemple modèles aux éléments finis avec éléments contacts lorsqu'il s'agit de composants de la chaîne cinématique) afin d'estimer les coefficients de concentration de contrainte.
- Enfin, elle peut se heurter à des incertitudes parfois difficiles à réduire. La courbe de résistance à la fatigue du matériau est souvent inconnue et seule une courbe de Wöhler enveloppe est accessible au calcul, moyennant des hypothèses assez pénalisantes sur le comportement du matériau. Dans le cas d'organes fortement sollicités, cette incertitude peut conduire à être trop majorant sur l'estimation du dommage et au final à se trouver dans l'incapacité de démontrer la tenue en fatigue de la vanne.

Afin de surmonter ces difficultés, deux axes de progrès sont privilégiés :

- compléter les données de la littérature par quelques caractérisations en fatigue (courbes de Wöhler) de quelques matériaux fréquemment utilisés sur les vannes anciennes, notamment des aciers moulés et forgés,
- poursuivre la capitalisation de diagrammes de contraintes et de vibrations afin de permettre une application plus large de la démarche simplifiée sans mesures extensométriques.

RÉFÉRENCES ET CITATIONS

[1] Brand, A., Sutterlin, R., (1980). Calcul des pièces à la fatigue - Méthode du gradient, CETIM.

[2] CODAP 2005 (2005). Code de construction des appareils à pression non soumis à l'action de la flamme, – partie C11 « Admissibilité des sollicitations variables et analyse à la fatigue », SNCT.

[3] NF-EN-1993-1-9, (2005). EUROCODE 3 – Calcul des structures en acier - partie 1.9 : analyse à la fatigue, Norme AFNOR.

[4] NF-A-03-406, (1993). Fatigue sous sollicitations d'amplitude variable – méthode rainflow de comptage des cycles, Norme AFNOR.

RENOVATION DES VANNES DE L'EVACUATEUR DE CRUES DU BARRAGE DE LABARRE - ANALYSE REALISEE SUR LES EFFORTS DE MANOEUVRE

Renovation of spillway gates on the Labarre dam Analysis of operating forces

Manuel ALVES
EDF-CIH TOULOUSE 4, rue Claude Marie Perroud
31096 TOULOUSE Cedex
Téléphone : +00 (00) 82 527 789, Fax : +00 (00) 82 527 842, Courriel : manuel.alves@edf.fr

MOTS CLÉS

Vanne abaissante, écoulements hydrodynamiques, déversoir Creager, contrepoids immergés

RÉSUMÉ

Cet article présente la rénovation des vannes de l'évacuateur de crues du barrage de LABARRE et l'analyse réalisée sur les efforts de manœuvre des vannes.
Suite à des dysfonctionnements lors de manœuvres et aux rapports d'expertises réalisés début 2008 (état d'usure avancée de la mécanique, corrosion importante de certains éléments de structure des vannes et des attaches des contrepoids) l'UPSO a décidé le remplacement de ces vannes. Après remplacement des deux premières vannes, l'une motorisée par contrepoids immergés l'autre par vérins, un essai de requalification à pleine ouverture à l'occasion de la première crue a mis en évidence des efforts de manœuvre importants sur les grandes ouvertures qui interrogeaient sur le fonctionnement possible de vannes à flotteurs sur toute la plage. Une étude par modélisation numérique a permis de mieux comprendre les phénomènes en jeu et a amené à la conclusion qu'il n'était pas possible de manœuvrer, en crue, les vannes à flotteurs au barrage de Labarre en maintenant la cote amont à la valeur normale d'exploitation.

ABSTRACT

Due to malfunctions during operation and expert reports made in early 2008 (showing an advanced wear of mechanical components and corrosion of structural components) EDF has decided to replace the 3 gates of Labarre Dam. First, two gates have been replaced: one motorized with a hydraulic cylinders and the other one with counterweight/float. During the first flood a requalification in fully open position showed high operating forces that put into question the operation of gate equipped with counterweight/float over the entire range. A study by numerical flow calculation helped to understand the phenomenon and highlighted the conclusion that it is not possible to operate the gate equipped with counterweight, in flood condition, in order to respect the expected reservoir level.

1. INTRODUCTION

Le barrage-usine de Labarre est situé sur l'Ariège à l'aval de la ville de Foix au sud de Toulouse. Le barrage est du type poids, d'une hauteur de 15,5 m sur une longueur de 70 mètres. L'évacuation des crues de ce barrage, mis en service en 1948, est assurée par trois vannes wagon automatiques actionnés par des flotteurs EVC1, EVC2, EVC3 et de deux vannes de fond V4 et V5. Les trois vannes wagon de type abaissant (EVC1 à 3) sont manœuvrées chacune par un système de deux flotteurs permettant la régulation automatique du niveau amont. Les mouvements moteurs des flotteurs sont transmis aux vannes par l'intermédiaire de poulies et de câbles de renvoi.

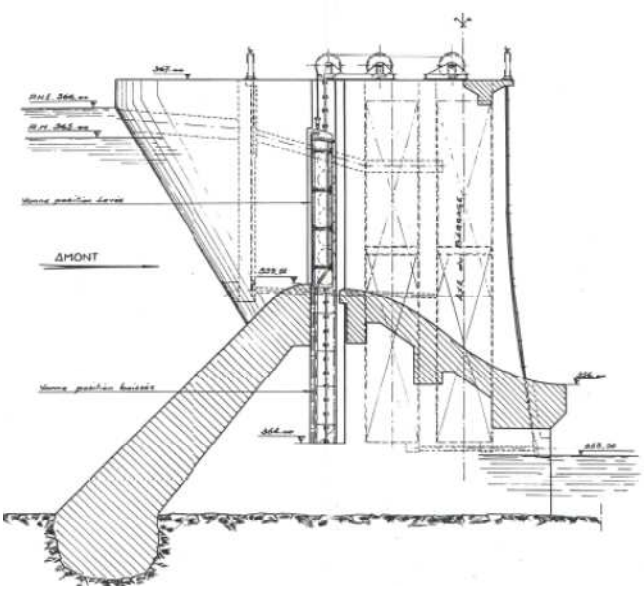


Figure 1 : Coupe de principe de l'EVC

Les trois évacuateurs de crue, répertoriés EVC1, EVC2 et EVC3 de la rive gauche vers la rive droite, sont de dimensions générales identiques : largeur 9m ; hauteur de 5,5 m ; pour une masse de chaque tablier de 24 tonnes. La débitance à RN pour chaque vanne est de 200 m3/s .

2. DESCRIPTIF DES EVC

2.1 Principe de fonctionnement des EVC-Système d'origine

Des vannettes d'admission, situées sur le bassin amont et réglées à 364,90 mNGF (soit RN-10 cm), règlent l'alimentation en eau des chambres des flotteurs, sachant que, pour une même vanne, les chambres RD et RG sont interconnectées afin de permettre l'équilibrage des pressions d'eau entre chaque pile. Les vannettes d'admission permettent le réglage du niveau de déclenchement d'ouverture de la vanne.

Pour les EVC1 et EVC2, une vannette d'alimentation de secours (à 359.50 NGF) permet de forcer le remplissage des chambres. Pour l'EVC3, cette vannette est pilotée permettant ainsi de forcer l'ouverture en mode déchargeur (arrêt du groupe). Les chambres des EVC1 et 2 sont équipées de vannettes d'échappement de Ø150, pour l'EVC3 la vanne de vidange est également pilotée afin de satisfaire le mode déchargeur.

A chaque chambre est associée une vanne de vidange réglée ouverte pour garantir et maintenir une fuite permanente égale au débit entrant à RN. Lors d'une crue, l'élévation du niveau de la retenue provoque une augmentation de la quantité d'eau entonnée dans les chambres, le débit évacué étant calibré à RN, le niveau d'eau dans la chambre augmente et déclenche la remontée des flotteurs par le principe de la poussée d'Archimède et par là même, l'abaissement des vannes wagon. Les vannes s'escamotent alors complètement dans le seuil afin d'ouvrir totalement la passe. Inversement lors de la décrue, les chambres se vident et les flotteurs redescendent en position basse ce qui entraîne la fermeture de la passe par la vanne wagon.

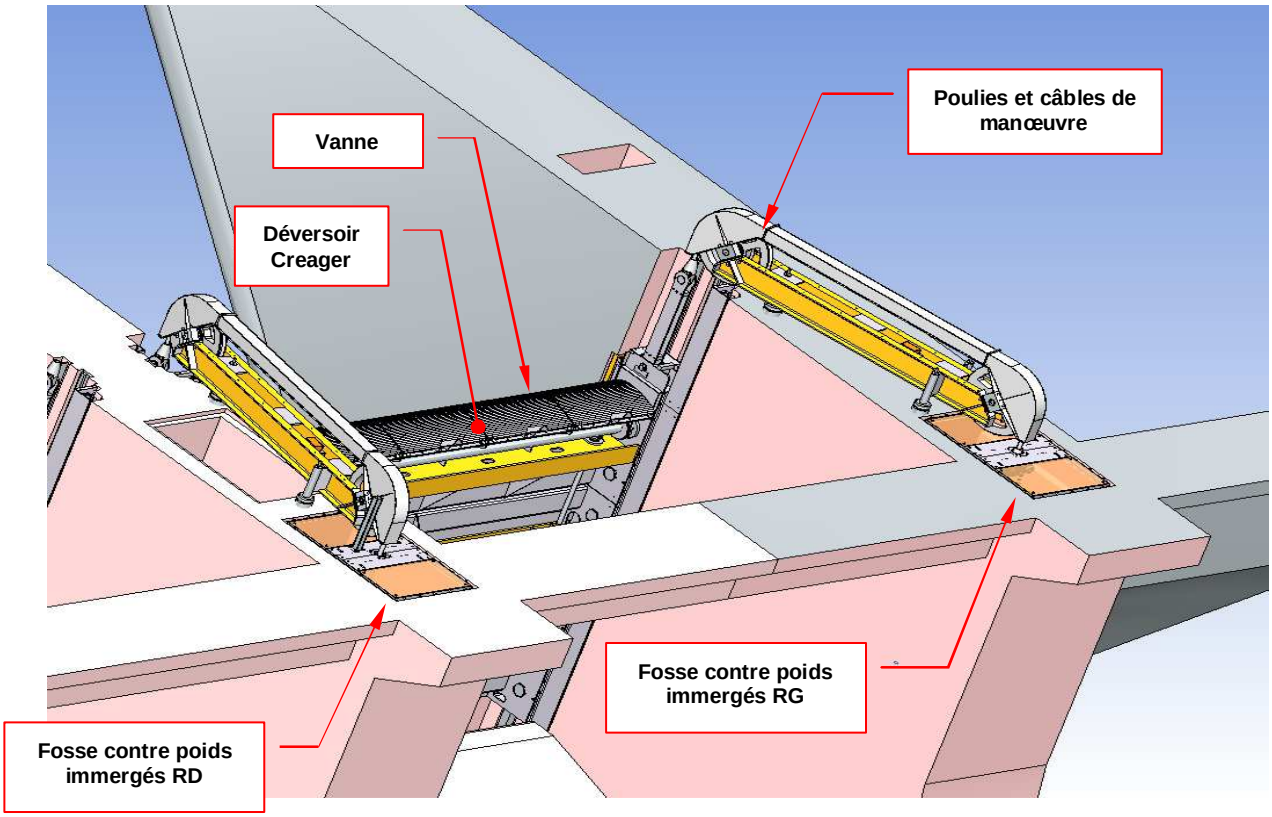


Figure 2 : Vue depuis l'aval de l'ensemble de l'EVC1 – Nouveau design

Ces flotteurs sont reliés à la vanne par l'intermédiaire de deux câbles accrochés sur la partie supérieure de la structure. La vanne n'étant pas dimensionnée pour supporter des efforts latéraux (arc-boutement), les déplacements des flotteurs RD et RG sont synchronisés par un arbre de synchronisme. Cet axe, équipé de 2 pignons à ses extrémités, s'engraine sur deux crémaillères implantées dans la rainure sur les pièces fixes en RD et RG.

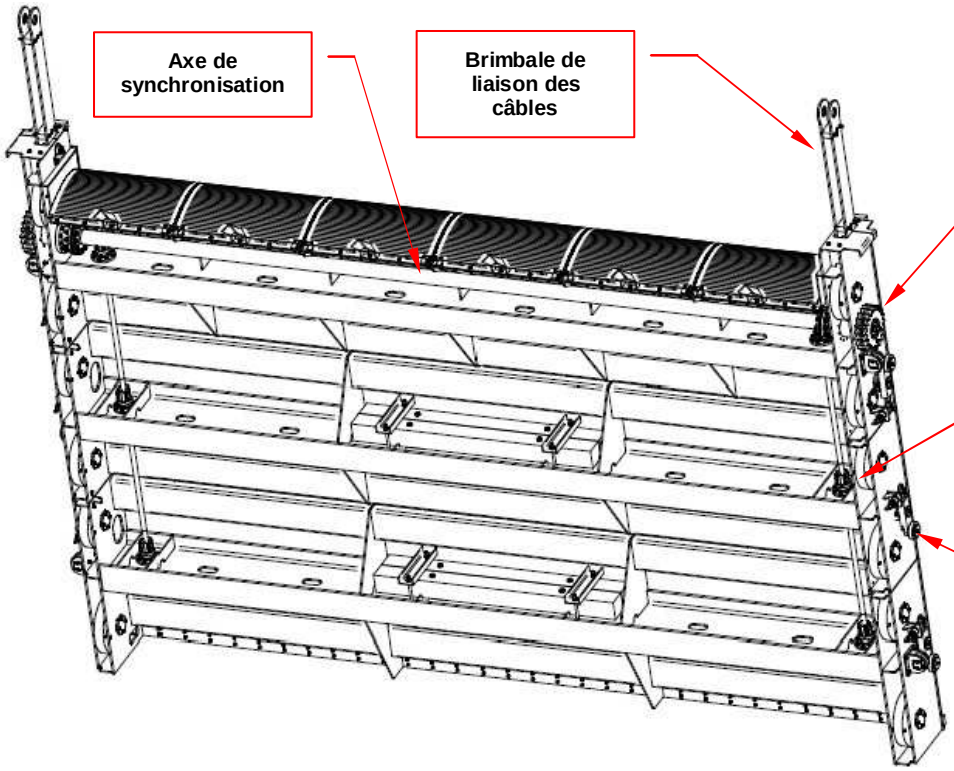


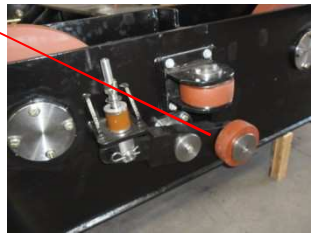
Figure 2 : Vue aval de la nouvelle vanne



Pignon de synchronisation



Galets de la vanne



Détail des galets presseurs

3. OBJECTIF ET CONSISTANCE DE LA RENOVATION

Au regard de divers dysfonctionnements constatés sur ces vannes, il a été décidé de procéder au remplacement à l'identiques des EVC1 et EVC2 et de remplacer également l'EVC3 mais en l'équipant de 2 vérins afin d'améliorer la maitrise des débits à l'aval (démodulation). L'état de la vanne de l'EVC2 étant moins préoccupant, son remplacement devait être réalisé en dernier. Les travaux de remplacement de l'EVC1 se sont déroulés début 2011. Les travaux sur l'EVC3 se sont déroulés de juin à octobre 2011. Les 2 vannes ont été rendues à l'exploitation après des essais satisfaisants sur des ouvertures partielles.

4. DEROULEMENT DES TRAVAUX ET ESSAIS

4.2 EVC1

Les travaux de remplacement de l'EVC1 ont débuté le 1er décembre 2010 et se sont terminés le 31 mars 2011. Les essais de requalification du 1er avril 2011 se sont correctement déroulés avec un débit entrant de 56,5 m3/s .

Ces essais montraient un taux d'immersion des flotteurs à l'ouverture de 63% alors que l'objectif était d'obtenir un taux d'immersion compris entre 70% et 80%. Pour augmenter le taux d'immersion à l'ouverture, les flotteurs ont été lestés. De nouveaux essais ont été réalisés le 10 novembre 2011, et les conditions hydrologiques du moment ont permis une ouverture de l'EVC1 sur une course de 2,52 mètres avec un taux d'immersion à l'ouverture légèrement supérieur à 80% (89% en RD et 86% en RG).

La vanne de l'évacuateur de crue N°1 (EVC1) a donc été considérée comme requalifiée jusqu'à une hauteur d'ouverture de 2,52 mètres et transférée à l'exploitant.

4.2 EVC3

Les travaux de remplacement de l'EVC3 ont débuté le 16 juin 2011 et se sont terminés par les essais de requalification réalisés le 27 octobre 2011. Lors des essais de requalification de l'EVC3, les conditions hydrologiques du moment n'ont permis de réaliser qu'une ouverture de la vanne de 1,0 mètre. Les valeurs de pression dans les vérins et les vitesses de manœuvre de la vanne sont conformes.

La vanne de l'évacuateur de crue N°3 (EVC3) a donc été considérée comme requalifiée jusqu'à une hauteur d'ouverture de 1,00 mètre et transférée à l'exploitant.

La mise en service de la conduite automatique de la vanne n'étant pas encore réalisée à cette date (prévue pour la mi-novembre 2011), tous les essais de requalification se sont déroulés en effectuant les manœuvres depuis l'armoire de commande de la vanne (mode dit « LOCAL »).

5. CRUE DU 7 NOVEMBRE 2011

L'exploitant a profité de la crue (forte hydrologie) pour faire une ouverture complète de la vanne EVC3 en mode LOCAL et permettre ainsi la requalification complète de la vanne.

5.1 Constat

Pendant la manœuvre d'ouverture de la vanne, les valeurs de pression augmentent considérablement, ce qui traduit une forte élévation des efforts de manœuvre. A partir de 4,4 m et jusqu'à l'ouverture complète (5,25 m), la valeur de pression dans les vérins est le double de celle du début d'ouverture (120 bars au lieu de 60 bars).

5.2 Analyse et décision

L'analyse de cet évènement a conduit à la conclusion que l'augmentation des efforts de manœuvre aux grandes ouvertures de la vanne était liée aux efforts hydrodynamiques de la lame déversante. Ce phénomène doit, également, être présent sur l'EVC1 mais avec des conséquences potentiellement plus dommageables sur cette vanne manœuvrée par des contrepoids immergés dont la « réserve de couple » est limitée.

Au regard de la Sureté Hydraulique, cette situation n'était pas acceptable et a motivé la réalisation d'une étude hydraulique spécifique avec modélisation numérique de l'ouvrage afin de mieux appréhender le comportement de la vanne et de la lame d'eau dans les deux zones de fonctionnement : de 1,8 m à 2,5 m et de 4,4 m à 5,2 m d'ouverture de la vanne.

L'étude a été sous-traitée à ISL par le Titulaire du marché de remplacement des vannes et une étude similaire a été réalisée en interne au CIH afin de confronter les résultats.

6. ETUDE HYDRAULIQUE ET RESULTATS

6.1 Modélisation

ISL a réalisé les calculs hydrodynamiques par modélisation bidimensionnelle et le logiciel utilisé est le logiciel CFX. Ce logiciel se base sur la résolution numérique des équations de Navier-Stockes par la méthode des volumes finis.

Pour la simulation des écoulements a surface libre, plusieurs méthodes existent. Le modèle VOF (méthode de type Eulérien) a été utilise dans cette étude.

En effet pour ce type de simulation, deux phases existent dans l'écoulement ; une phase liquide (l'eau) et une phase gazeuse (l'air). La formulation VOF (Volume Of Fluid) résout une équation de suivi de la fraction volumique (FV) de chacun des deux fluides dans le domaine. Dans chaque maille du domaine une FV est calculée :
- si FV = 1, la cellule est remplie d'eau,
- si FV = O, la cellule est remplie d'air,
- si 0 < FV < 1, les cellules contiennent une interface (mélange des phases eau/air).

Le modèle k-s a été utilisé dans les simulations pour le traitement de la turbulence.

6.2 Calculs réalisés

Afin de vérifier si l'anomalie concernant l'effort de manœuvre peut être due à une dépression dans la chambre sous la lame déversante, un modèle « non-aéré » a été construit. Le but de ce modèle est d'observer le champ de pression dans la chambre, dans le cas ou cette dernière ne présente aucune connexion avec l'extérieur, et de vérifier si une dépression conduisant à l'aspiration de la vanne vers le bas peut se mettre en place.
Tous les calculs ont été réalisés en stationnaire et sont effectués sur un modèle ou la cavité est maintenue à la pression atmosphérique sauf pour le cas non-aéré.
Un modèle a donc été créé pour chaque géométrie et position de vanne : déversoir Creager pour les nouvelles vannes et déversoir couteau pour les anciennes vannes à différents stade d'ouverture.

Ouverture en mm	Déversoir Creager		Déversoir couteau
	Aéré	Non-aéré	
1500	X	X	X
2200	X	X	X
2750	X	X	X
3750	X	X	X
4400	X	X	X
5250	X	X	X

Tableau 1 : Nomenclature des cas étudiés

6.3 Résultats

Les valeurs de pression données dans ce document sont des valeurs relatives par rapport à la pression atmosphérique (p = 0, correspond à la pression atmosphérique).
L'effort de l'écoulement sur la vanne est la composante verticale de la force créée uniquement sur le dessus de la vanne. Les calculs montrent que la composante verticale des efforts qui apparaissent sur le reste de la vanne peut être négligée.

6.3.1 Déversoir Creager

Ci-dessous quelques extraits de l'étude pour visualiser la restitution des résultats.

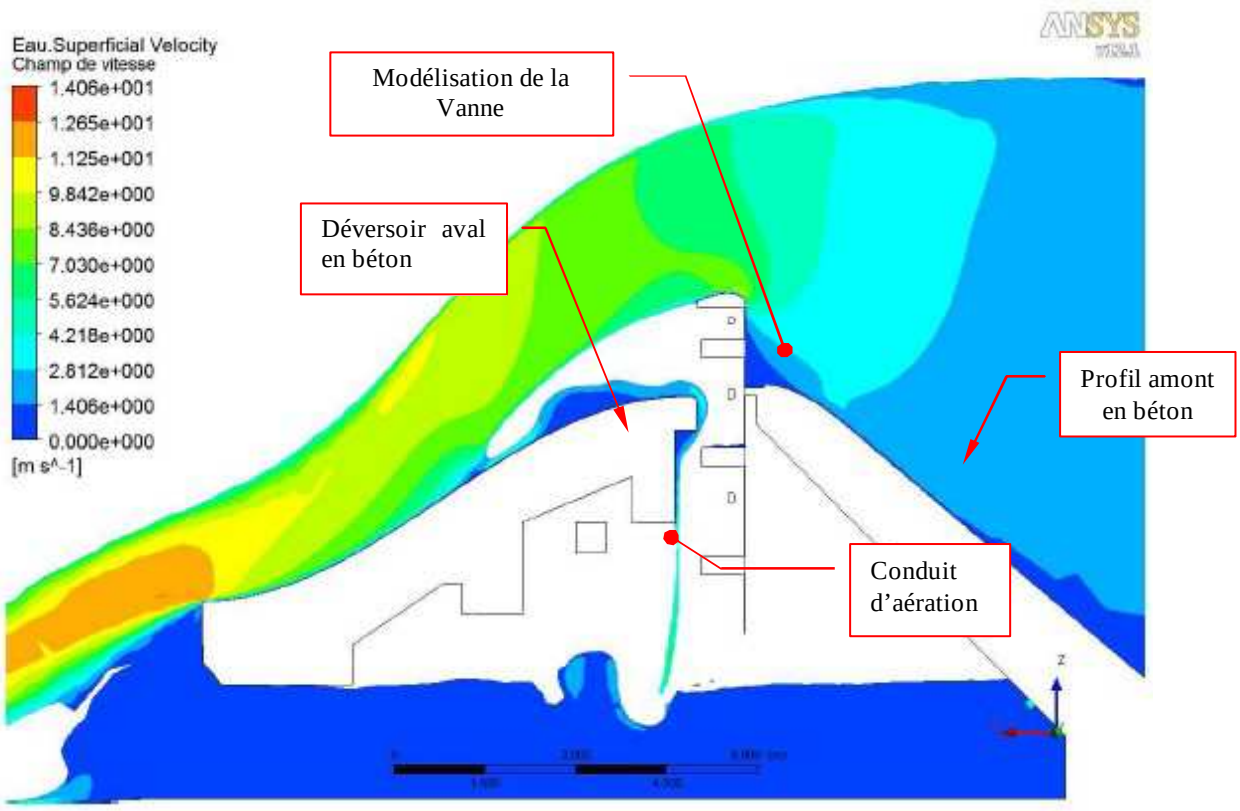


Figure 4 : Champ des vitesses pour une modélisation du déversoir Creager aéré et une ouverture de 3,750 m.

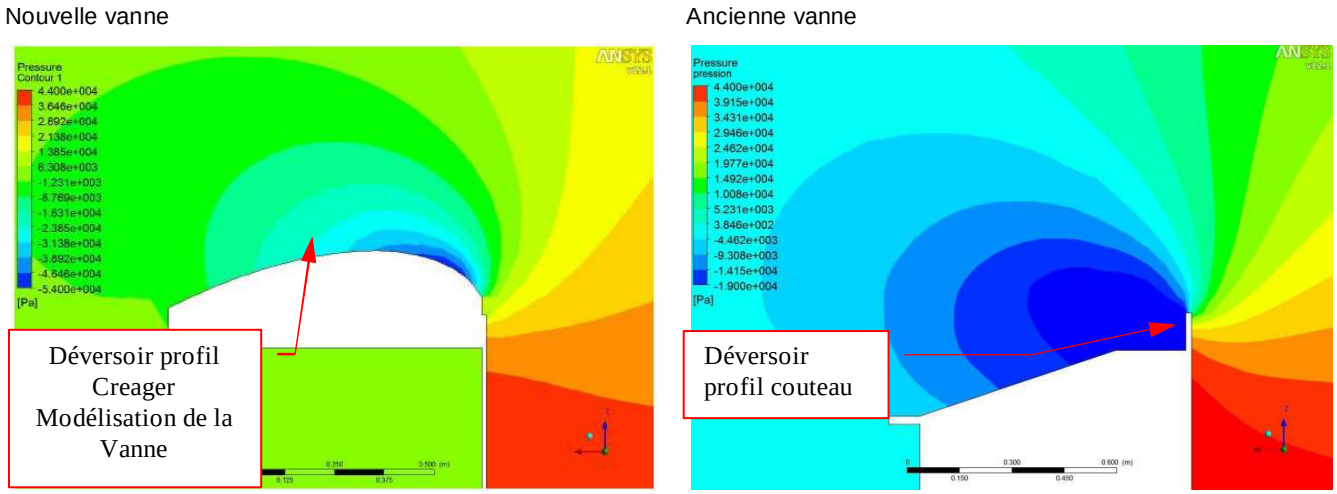


Figure 5 : Champ des pressions pour une modélisation du déversoir Creager aéré et couteau et une ouverture de 4,400 m.

Lorsque la vanne est effacée dans le seuil (pour une ouverture de 5.25m), la projection verticale de l'effort qui s'exerce sur le Creager de vanne s'oriente vers le bas et vaut 64kN. L'écoulement ne "voit" alors plus un seuil Creager mais un seuil non profilé (Cf. figure 5).

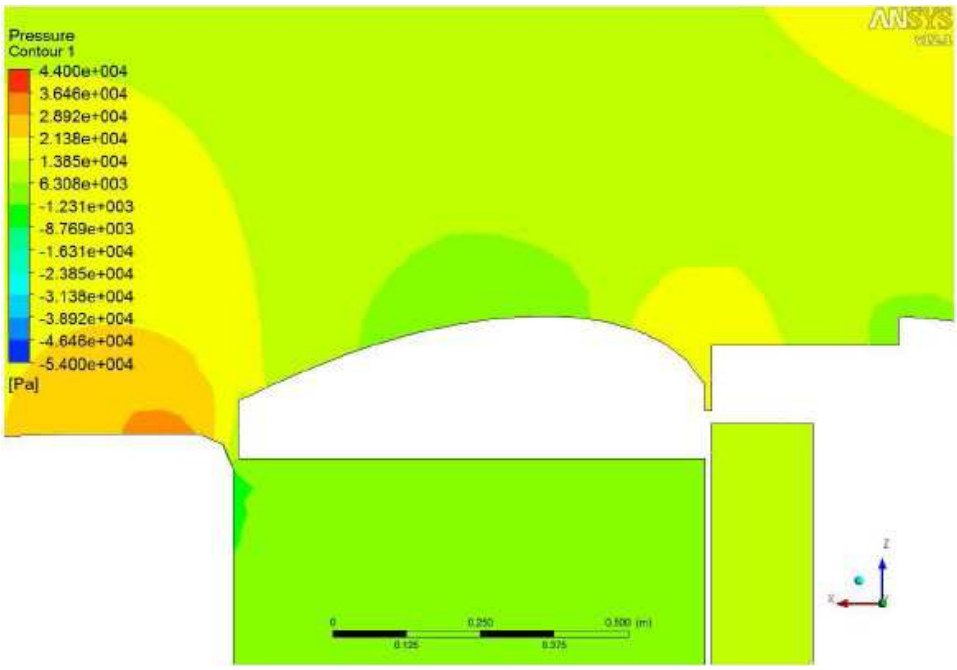
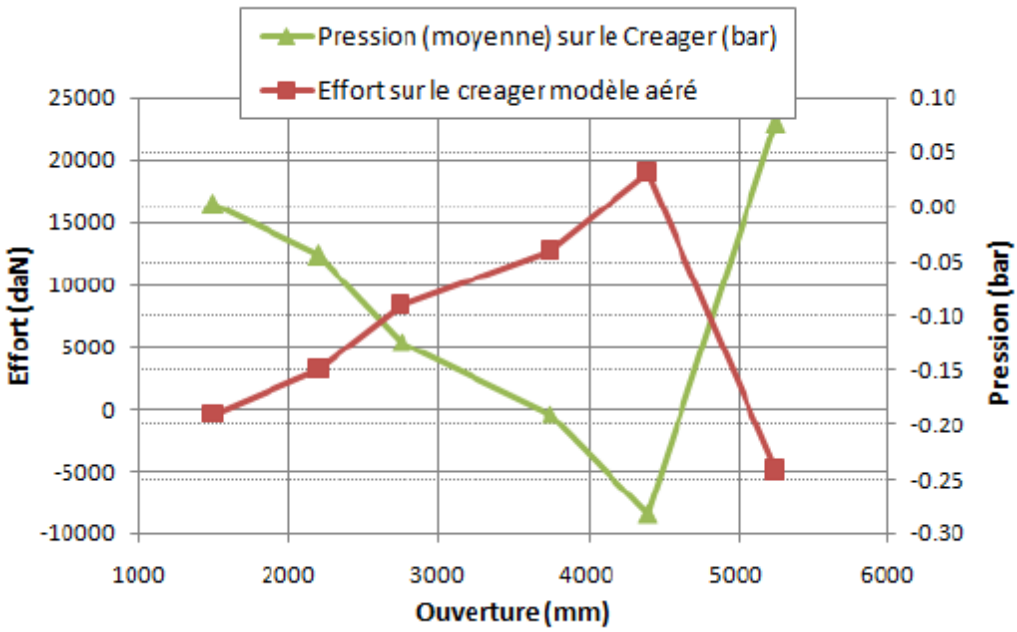


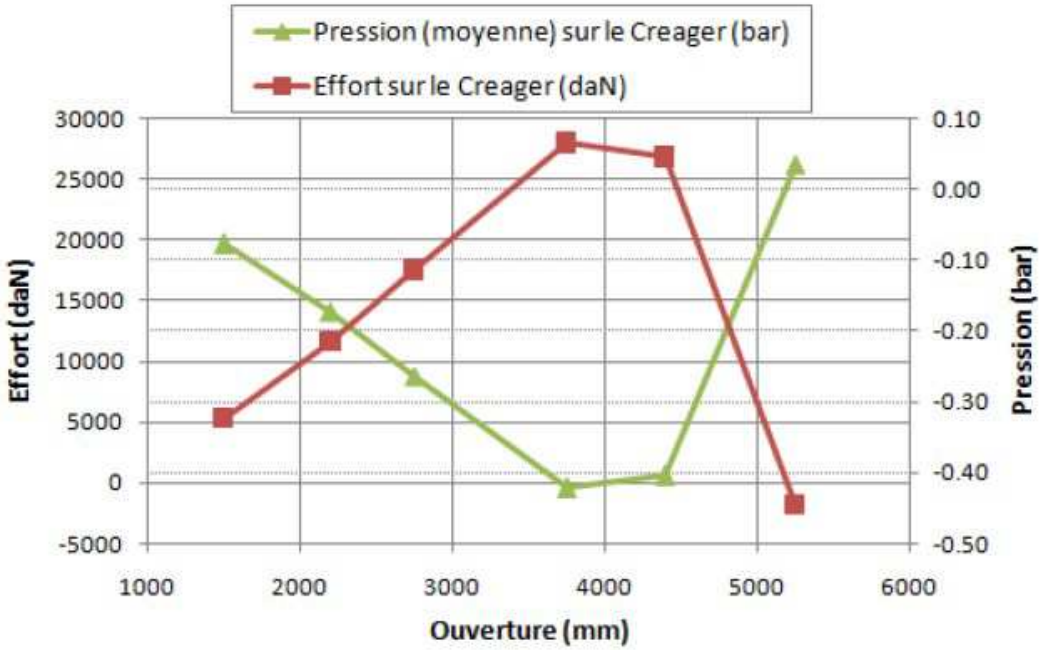
Figure 6 : Champ des pressions pour une modélisation du déversoir Creager aéré et une ouverture de 5,250m

Le graphique suivant (graphique 1) montre que la vanne est aspirée vers le haut lorsque l'ouverture est comprise entre 1,5 m et 4,4 m. L'effort d'aspiration augmente de 0 a 20 000 daN qui correspond au pic atteint à 4,4 m. L'effort d'aspiration diminue ensuite et, à 5,25 m d'ouverture, l'effort hydrodynamique calculé est une poussée vers le bas de 5 000 daN.
Le profil Creager a été conçu pour une charge de 1,5 m. A cette charge, la pression sur le Creager est égale à zéro, ce qui a été vérifié par le calcul. Au dessus de cette valeur, la pression relative devient négative (vanne « aspirée » dans l'écoulement comme dans le calcul). Jusqu'à l'ouverture 4,4 m, l'évolution de la pression est en accord avec cette théorie.
A partir de 4,4 m d'ouverture, le dessus de la vanne devient proche du parement amont du barrage. L'écoulement sur le Creager est de plus en plus influencé par la forme du barrage. L'aspiration de la vanne diminue jusqu'à s'inverser à partir d'une ouverture de 5,0 m environ.



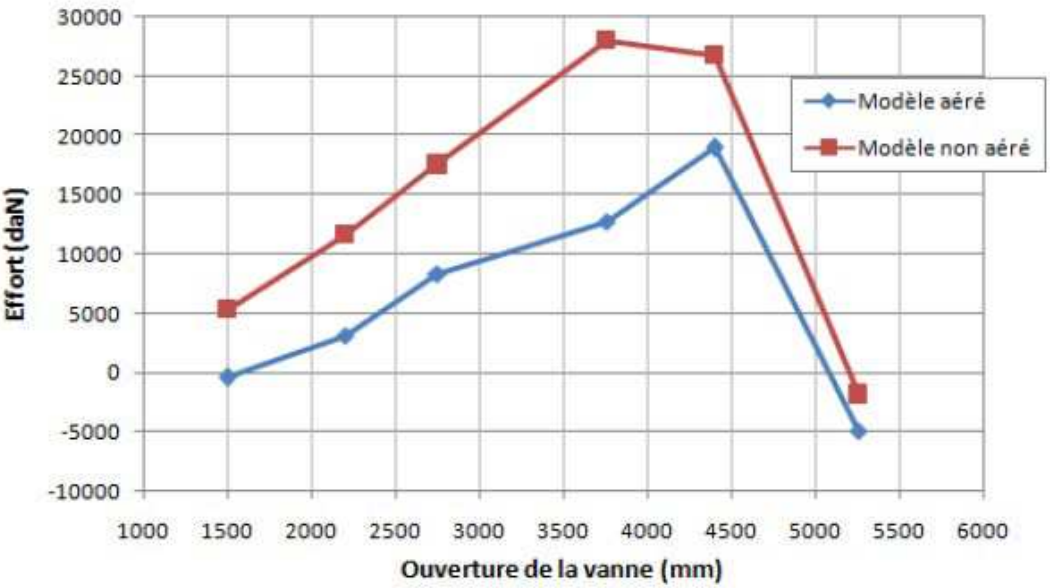
Graphique 1 : Creager modèle aéré - Evolution de l'effort et de la pression sur le dessus de la vanne en fonction de l'ouverture.

La projection verticale de l'effort qui s'exerce sur la vanne augmente régulièrement de 18 kN (pour une ouverture de 1.5 m) à 183 kN (pour une ouverture de 4.4 m). Cet effort dirigé vers le haut s'explique par la dépression crée par le profil Creager (Cf. graphique 1). Au-delà de 4,40 m, la tendance s'inverse et l'effort devient négatif (poussée qui appuie sur la vanne) aux environs de 5,00 m d'ouverture. On retrouve bien ici l'explication du phénomène constaté lors des essais de l'EVC3.



Graphique 2 : Creager modèle non-aéré - Evolution de l'effort et de la pression sur le dessus de la vanne en fonction de l'ouverture.

La tendance des courbes d'effort et de pression est identique à celle obtenue par le modèle aéré. En effet, on a une augmentation de l'effort d'aspiration jusqu'à 3,75 m d'ouverture de vanne (au lieu de 4,40 m dans le cas aéré) et une diminution ensuite jusqu'à un effort qui pousse la vanne vers le bas à 5,25 m.

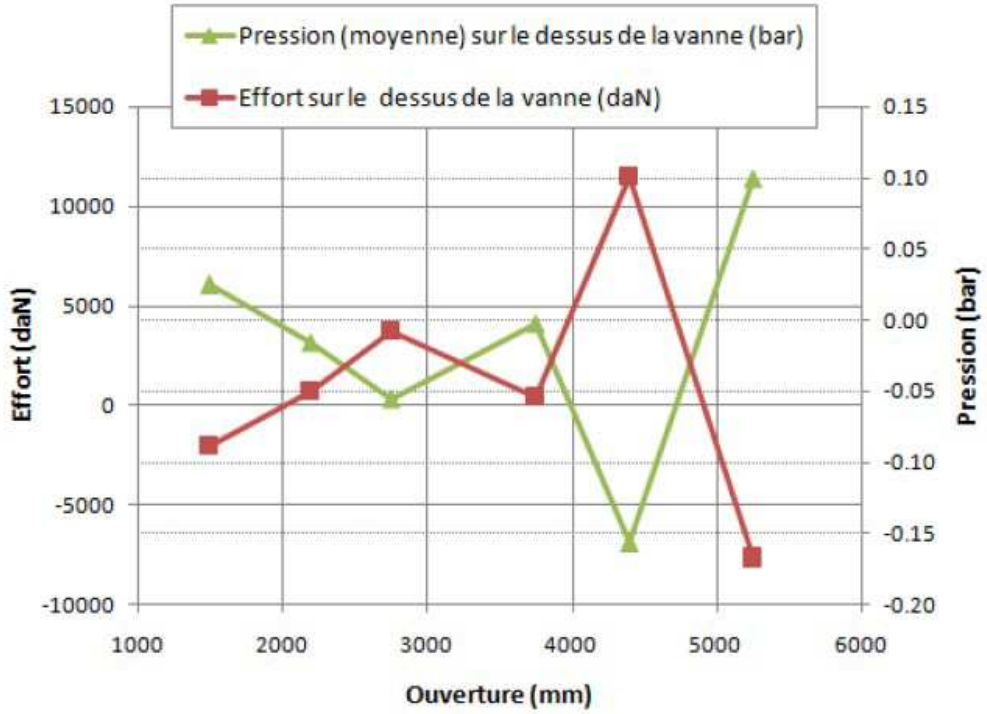


Graphique 3 : Comparaison des efforts obtenus par les modèles aéré et non-aéré – vanne Creager.

L'inversion de l'effort qui s'exerce sur la vanne est visible dans les résultats des deux modèles. Ce comportement n'est pas lié au champ de pression dans la cavité. Que la cavité soit aérée ou non, l'aspiration de la vanne par l'écoulement au dessus du Creager se transforme en poussée à 5 250 mm d'ouverture.

Cette inversion est imputable au rapprochement du dessus de la vanne du seuil du barrage. L'écoulement est alors de plus en plus contrôlé par la forme du seuil, ce qui inverse le sens de l'effort sur le haut de la vanne.

6.3.2 Déversoir couteau + pente



Graphique 4 : Couteau + pente - Evolution de l'effort et de la pression sur le dessus de la vanne en fonction de l'ouverture.

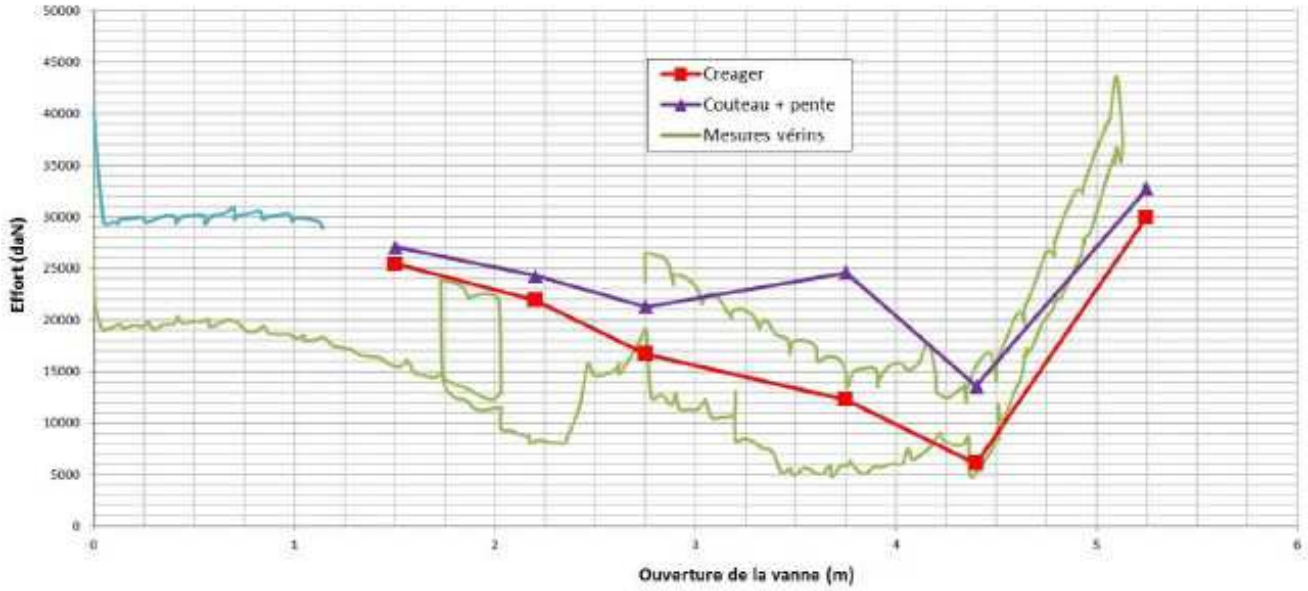
Les figures des champs de pression et de vitesse montrent trois phases dans l'évolution de l'écoulement :
- Une première phase ou l'écoulement colle le dessus de la vanne. Pour les trois premières positions calculées (1,50, 2,20 et 2,75 m), la charge n'est pas suffisante pour que l'eau puisse décoller et passer par-dessus la vanne sans l'effleurer. La dépression sur le dessus de la vanne est donc liée à la vitesse de l'eau dans cette zone.
- Une deuxième phase ou l'écoulement décolle du haut de la vanne. A 3,75 m, la charge est suffisante pour que l'eau effectue ce saut. La pression qui règne sur le dessus de la vanne est donc nulle (pression de l'air). Ce saut n'a pas été observé dans les calculs avec vanne Creager.
- Une troisième phase ou l'écoulement revient au contact du dessus de la vanne. Ce retour est lié au rapprochement de la tête de vanne du seuil du barrage. La pression qui s'applique sur le haut de la vanne est d'abord une dépression lorsque l'écoulement n'est pas perturbé à l'aval par le seuil, puis une pression lorsque le couteau s'efface.

L'effort qui s'exerce sur le dessus de la vanne évolue comme la pression en trois phases (graphique 4 ci-dessus). Le passage d'une phase à la suivante est fortement dépendant des conditions d'aération juste à l'amont du couteau. Ces conditions proviennent de détails tridimensionnels et ne sont que sommairement modélisés en 2D par des ouvertures latérales.

6.3.3 Comparaison Creager / Couteau + pente

Dans le graphique 5 ci-après, pour comparer les résultats obtenus avec les mesures réalisés lors des essais, le poids propre de la vanne (25000 daN) a été soustrait à l'effort hydrodynamique calculé précédemment.

Attention, le sens positif est vers le bas contrairement aux graphiques précédents.



Graphique 5 : Comparaison des efforts de manœuvre calculés (incluant la masse de la vanne, les efforts de frottement et l'effort hydrodynamique) superposés aux mesures réalisées lors des essais avec profil Creager.

Nota : la courbe bleue correspond aux efforts calculés avec un profil couteau (anciennes vannes) et la courbe rouge correspond aux efforts calculés avec un profil Creager.

Les mesures vérins représentent l'effort de manœuvre d'une vanne Creager. Cet effort inclut les frottements qui surviennent lors de l'ouverture et la fermeture de la vanne. La moyenne entre la courbe d'ouverture et la courbe de fermeture donne la courbe qui prend en compte uniquement l'effort de l'écoulement sur la vanne et le poids de cette dernière. L'effort de manœuvre calculé est assez proche des mesures et l'évolution en fonction de l'ouverture est tout à fait similaire avec ce qui est constaté sur les mesures.

Le graphique 4 précédent montre que l'effort de manœuvre d'une vanne équipée d'un couteau est plus important que celui d'une vanne Creager. L'écoulement dans le cas de cette vanne ne crée pas autant d'effort d'aspiration que dans le cas de la vanne Creager. Cette aspiration favorable a l'effort de manœuvre est quasi inexistante, jusqu'à 3,75 m d'ouverture, avec un profil couteau. Au-delà, tant que le couteau n'est pas effacé, cette singularité permet de créer une zone de recirculation au dessus de la vanne (figure 6 ci-dessous). La pression relative est ainsi négative dans cette zone.

Dés que le couteau est effacé, la pression sur le dessus de la vanne augmente significativement (dernier point de la courbe du graphique 4 qui correspond à une ouverture de 5,25 m).

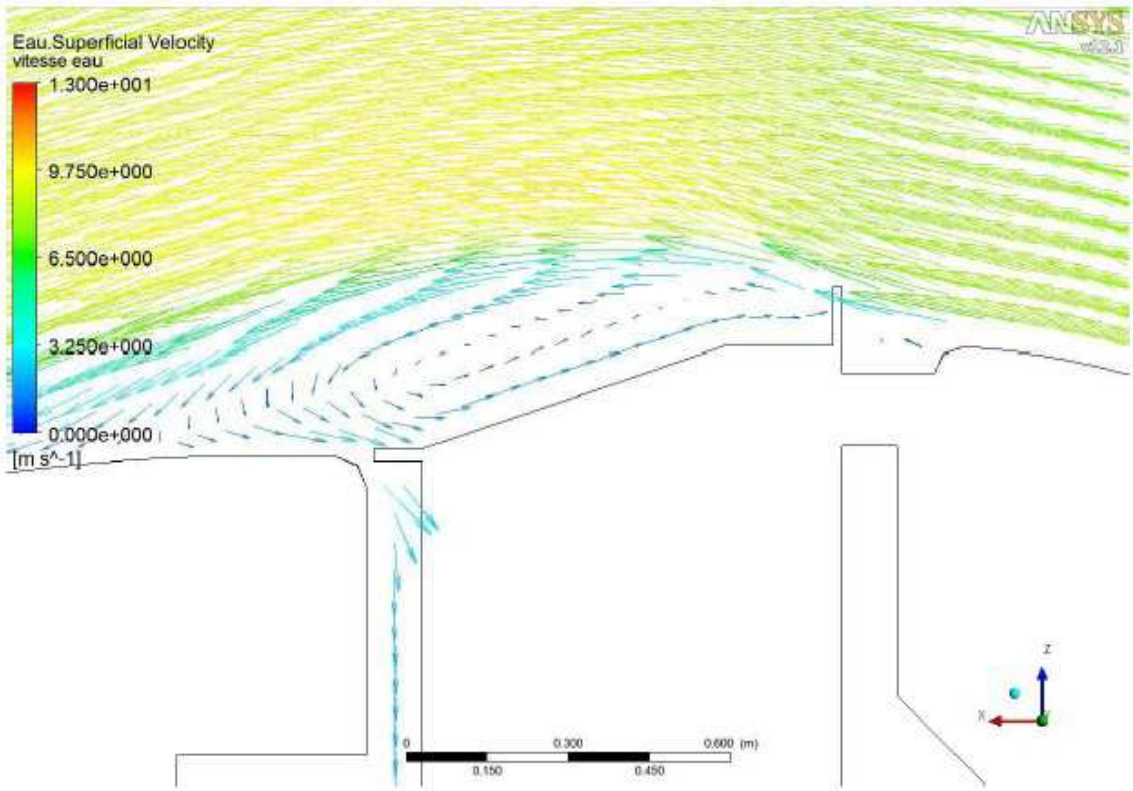
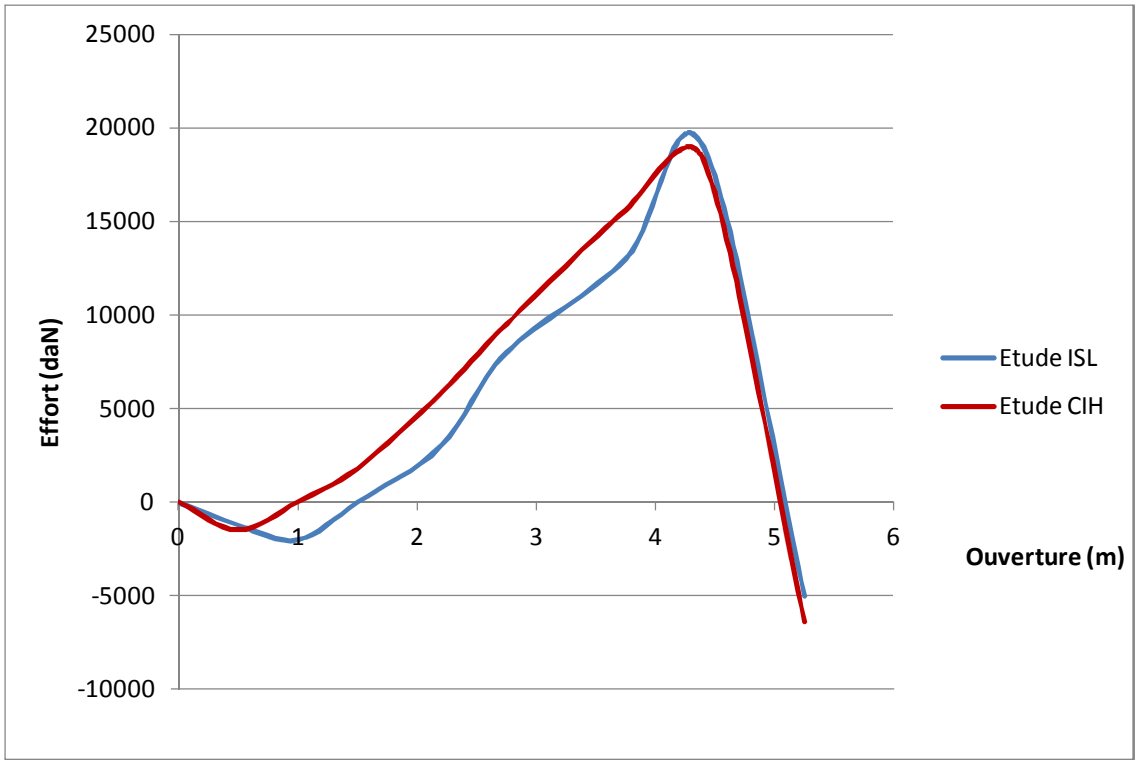


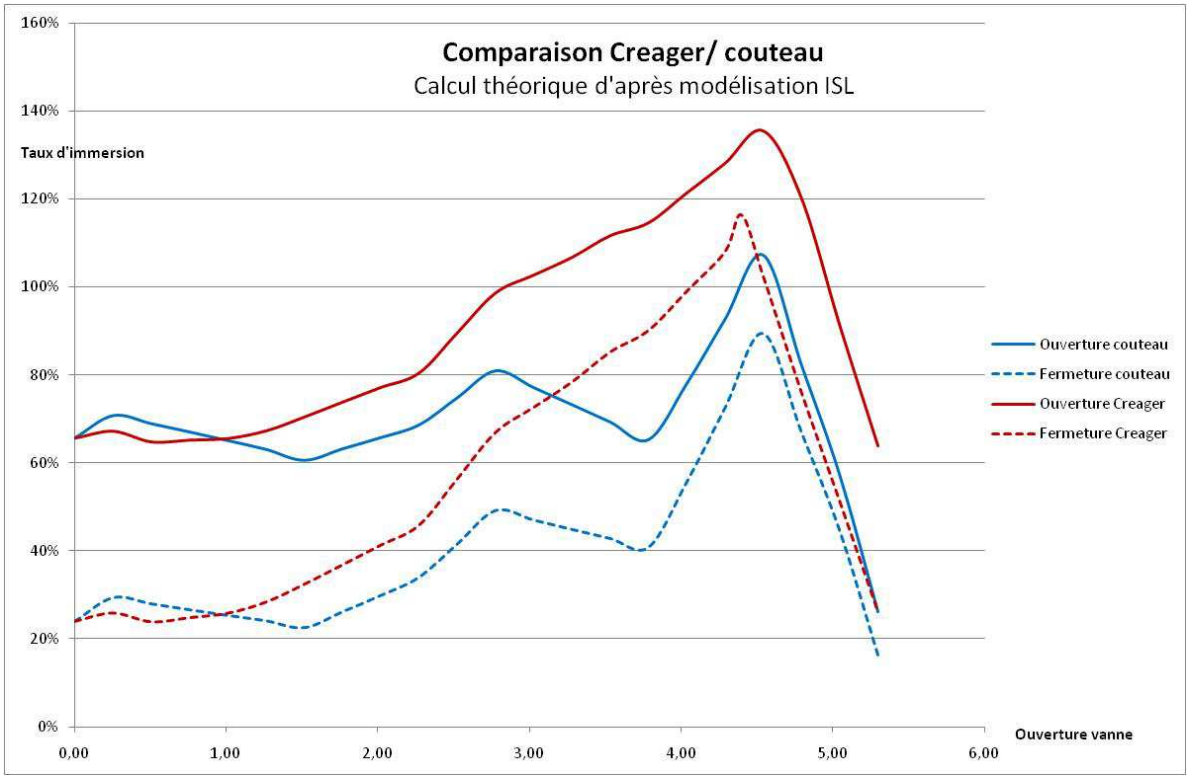
Figure 7 : Zone de recirculation au dessus de la vanne couteau à 5,142 m d'ouverture.

7. CONFRONTATION DES ETUDES CIH / ISL



Graphique 6 : Comparaison des études hydrodynamiques réalisées par CIH et ISL.

A partir des efforts hydrodynamiques déterminés par la modélisation, CIH a déterminé les courbes théoriques de taux d'immersion des flotteurs en cours de manœuvre (ouverture et fermeture) pour les deux profils de déversoir de vanne (graphique 7).



Graphique 7 : Graphique de la modélisation du taux d'immersion pour les deux profils de déversoir.

8. CONCLUSION

Les résultats issus des deux études (CIH et ISL) sont cohérents (Cf. graphique 6) et montrent que les efforts de manœuvre ont une variation trop importante sur l'ensemble de la course de la vanne pour être compatibles avec une manœuvre par flotteurs. En effet dans le cas d'une manœuvre par flotteur, la variation de l'effort sur toute la course ne doit pas dépasser 40% de la poussée d'Archimède totale qui s'applique sur les flotteurs (plage de taux d'immersion entre 40% et 80%)

Par conséquent, avec la cote amont à RN, les flotteurs permettent d'ouvrir la vanne jusqu'à environ 3,00 m pour un profil Creager et 4,00 m pour un profil à couteau (Cf. graphique 7). Nous n'avons pas pu retrouver de traces écrites de manœuvres complètes des anciennes vannes, mais nous supposons que cette manœuvre s'accompagnait d'une baisse du niveau de la retenue.

La solution d'origine qui consiste à manœuvrer les vannes au moyen de contrepoids immergés (cf. figure 10) doit être abandonnée au profit d'un système de manœuvre par des vérins installés dans les fosses des flotteurs (cf. figure 11). Les flotteurs de l'EVC1 ont été remplacés par des vérins à l'hiver 2012/2013 ; les mêmes modifications ont été réalisées sur l'EVC2 à l'hiver 2013/2014 durant la campagne de travaux de rénovation complète de cet EVC.

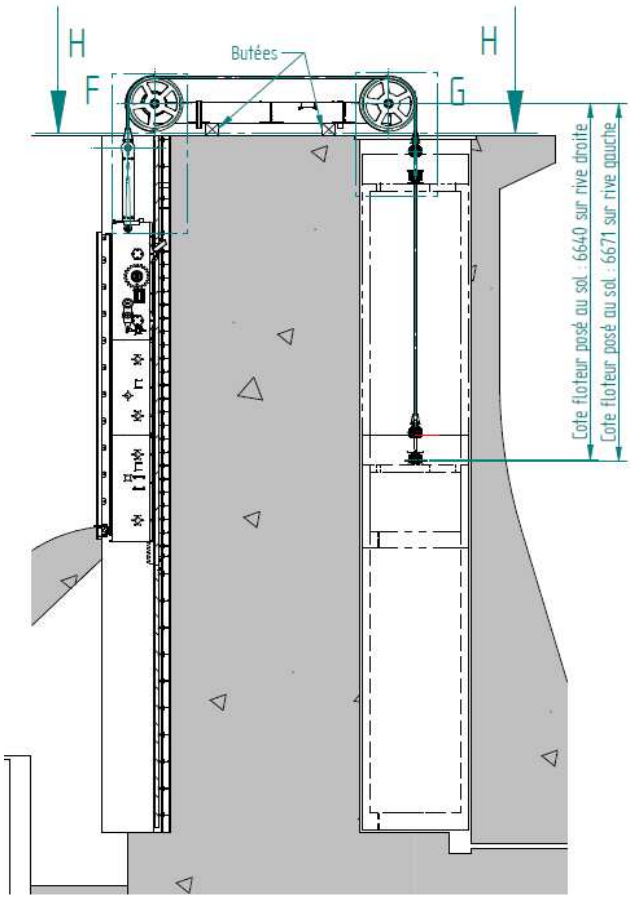


Figure 10 : Vue de la vanne avec contrepoids immergé

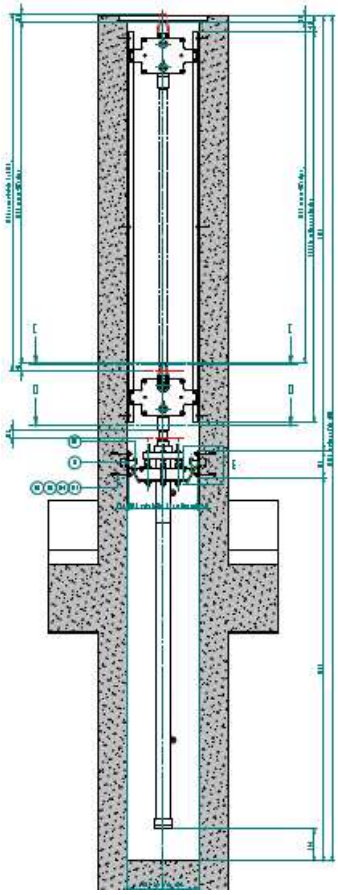


Figure 11 : Vue de l'implantation des vérins dans les puits des contrepoids

Le REX de cette affaire met en évidence la nécessité de réaliser en préalable à une rénovation un bilan complet des efforts de manœuvre, en particulier sur des vannes abaissantes ou des clapets équipés de systèmes de commande avec contrepoids et/ou flotteurs.