BOUCHURES GONFLABLES, COMMENT LES CONCEVOIR, COMMENT LES EXPLOITER

Rubber gates, how to design and to operate them

Julien AUBONNET
BRLingénierie, 1105 Avenue Mendès France Nîmes, France
julien.aubonnet@brl.fr
Michael GEBHARDT
Bundesanstalt für Wasserbau, Allemagne
michael.gebhardt@baw.de

MOTS CLEFS

Bouchure gonflable, barrage gonflable avec ou sans volet métallique, voies navigables, membrane, recommandations techniques, état de l'art AIPCN

KEY WORDS

Inflatable gate, rubber gate, steel-rubber gate, waterways, membrane, technical standards, PIANC guidelines

RÉSUMÉ

En 2018, l'AIPCN a publié son premier rapport spécifiquement axé sur le thème des barrages gonflables. Il s'agit également du premier rapport destiné aux propriétaires et aux exploitants qui se concentre sur la conception, la fabrication, la construction, l'exploitation et la maintenance des bouchures gonflables. L'objectif du rapport de l'AIPCN est de discuter des avantages et des inconvénients, de faire des recommandations, de développer des solutions pratiques, de fournir une méthodologie générale pour les analyses et la conception, de rassembler les expériences et les analyses d'experts sur les problèmes rencontrés et de montrer la gamme d'application des barrages gonflables. Le rapport doit aider les concepteurs et les opérateurs du monde entier et leur fournir des conseils pour développer et exploiter des structures hydrauliques gonflables sûres et économiques.

Cet article présente la démarche suivie pour porter ce travail à la connaissance des experts en vantellerie du CFBR. Au-delà d'un bref rappel des ouvrages installés dans le monde, il présente les technologies existantes, les modes de fabrication des membranes, les référentiels actuels, et des exemples d'application réalisés en France et en Allemagne.

ABSTRACT

In 2018 the PIANC published its first report specifically focused on the topic of inflatable gates. It is also the first report for owners and operators focusing on the design, fabrication, construction, operation and maintenance of inflatable gates. The aim of the PIANC report is to discuss the benefits and disadvantages, make recommendations, develop practical solutions, provide a general methodology for analyses and design, gather expériences and expert analysis on relevant problems and show the application range of inflatable gates. The report should help designers and operators throughout the world and provide guidance to develop and operate safe and economical inflatable hydraulic structures.

This article introduces the approach adopted for this work and brings it to the attention of the CFBR's experts in gate design. In addition to a brief review of inflatable gates installed around the world, it presents existing technologies, membrane manufacturing methods, current standards and application examples located in France and in Germany.

1. CONTEXTE ET OBJECTIFS

Le développement de la vantellerie est étroitement lié aux besoins de l'irrigation, de l'approvisionnement en eau, de la navigation fluviale, de l'hydroélectricité et de la protection contre les inondations. Les premières vannes en acier sont apparues vers 1830 [1]. Suite au brevet déposé en France par M.Mesnager en 1947, il faut attendre 10 ans pour voir l'installation du premier barrage gonflable aux Etats Unis. Le premier barrage gonflable à clapet + actionneur gonflable, également américain, date de 1988 [2].

Les bouchures gonflables s'apparentent aux vannes de type clapet équipées de treuils ou vérins, à la différence qu'elles constituent elles-mêmes un actionneur : leur fluide de remplissage permet de relever ou abaisser la vanne.

Malgré une technologie déjà ancienne, les solutions gonflables restent méconnues dans le domaine de l'ingénierie hydraulique. Sur les barrages de stockage, les bouchures gonflables sont principalement utilisées sur les crêtes des évacuateurs de crue afin d'augmenter le stockage ou la côte de retenue pour l'énergie hydroélectrique.

L'AIPCN, Association mondiale pour les infrastructures de transport maritimes et fluviales, à l'instar du CFBR mais dans un domaine voisin, mobilise des groupes d'experts pour développer la connaissance technique liée aux ouvrages maritimes et fluviaux. Le rapport « inflatable structures in hydraulic engineering » [3] a été produit en 2018 par un comité de treize membres issus de sept pays différents.

L'objectif de cet article est de porter à la connaissance des membres du CFBR ce rapport qui contient des recommandations sur les meilleures pratiques à observer pour la mise en œuvre d'une solution gonflable sur un ouvrage hydraulique, notamment pour la navigation, et reste le seul référentiel actuel pour aider les concepteurs et les opérateurs à concevoir et exploiter des structures hydrauliques gonflables sûres et économiques.

2. HISTORIQUE

Depuis que Norman Imbertson introduit cette technologie aux États-Unis [4], plus de 5000 barrages gonflables sont installés dans le monde entier.

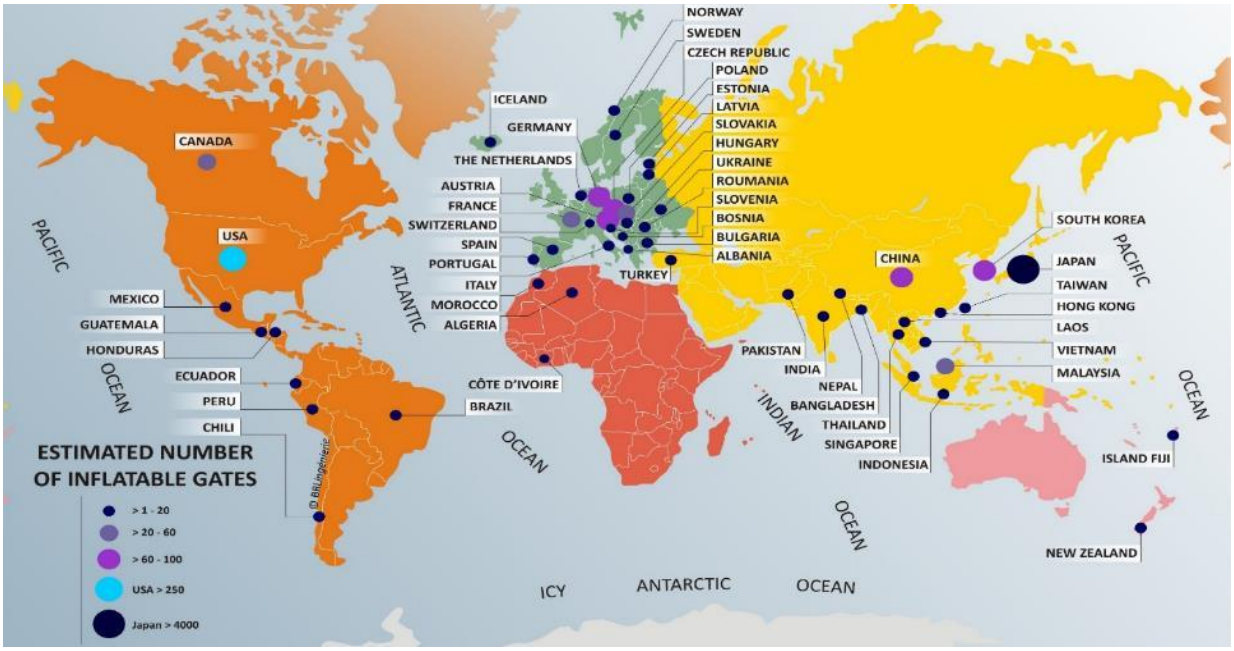

Figure 1 : Recensement des barrages gonflables dans le monde © BRLingénierie

S'il existe des fournisseurs de membranes actifs dans plusieurs pays d'Asie, le Japon est le leader technologique et la référence en matière, avec un premier ouvrage livré en 1964. Le Japon compte environ 4000 sites équipés. Les Etats Unis en comptent plus de 250.

En Europe, l'Allemagne, l'Autriche, la République Tchèque, la Slovaquie et la France sont ceux qui regroupent le plus grand nombre de références. D'autres pays bénéficient de quelques sites équipés (fig.1).

Les avantages principaux qui ont motivé l'installation de ce type de bouchure sont principalement leur simplicité d'installation (coûts et délais réduits) et leur coût de fonctionnement (peu d'énergie, équipements basiques). Leur faculté à s'adapter sur une structure existante est également mentionnée.

3. DEFINITION D'UN BARRAGE GONFLABLE

Un barrage gonflable (inflatable gate) est un terme générique qui peut être utilisé pour désigner une bouchure qui se soulève par effet d'une pression d'eau ou d'air sur une membrane en élastomère. Deux types principaux sont définis : la bouchure gonflable (ou rubber gate) et la bouchure gonflable à volets métalliques (steel-ruber gate).

3.1.Bouchure gonflable

Elle est constituée d'une membrane multicouche composée de polymères et d'élastomères. Elle est remplie d'air, d'eau ou des deux, et fixée au déversoir qu'elle équipe par une ou deux lignes de fixation (fig.2). Le fluide et la membrane jouent le rôle de l'actionneur, qui relève ou abaisse la membrane qui joue elle-même le rôle de bouchure.

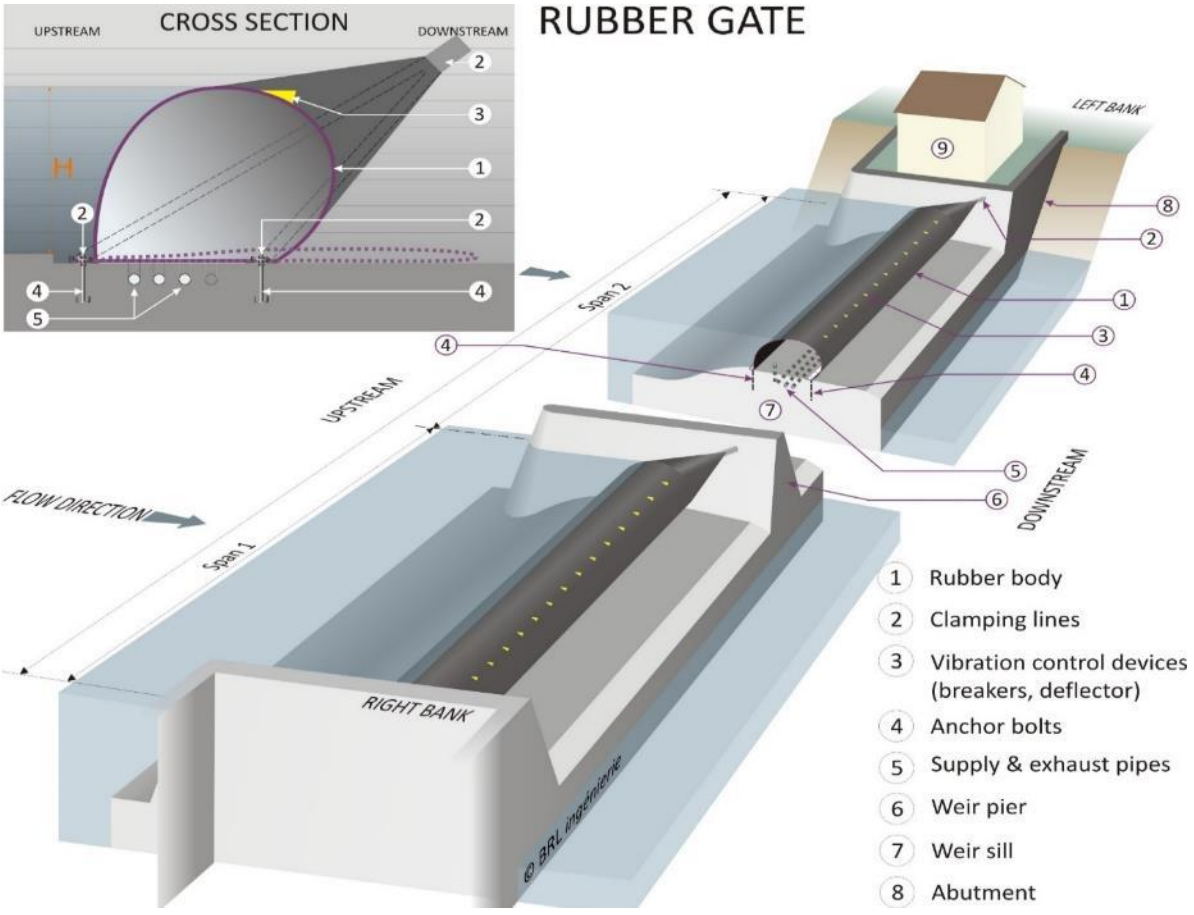

Figure 2 : vue axonométrique et coupe d'une bouchure gonflable © BRLingénierie

3.2.Bouchure gonflable à volet métallique

Elle est constituée d'une membrane multicouche composée de polymères et d'élastomères. La membrane est très généralement remplie d'air et fixée au déversoir qu'elle équipe communément avec un clapet qui pivote selon un axe situé en partie inférieure, l'ensemble étant ancré au seuil par une ligne de fixation (fig.3). Le fluide joue le rôle de l'actionneur, qui relève ou abaisse la membrane, et soutient le volet métallique qui joue le rôle de bouchure.

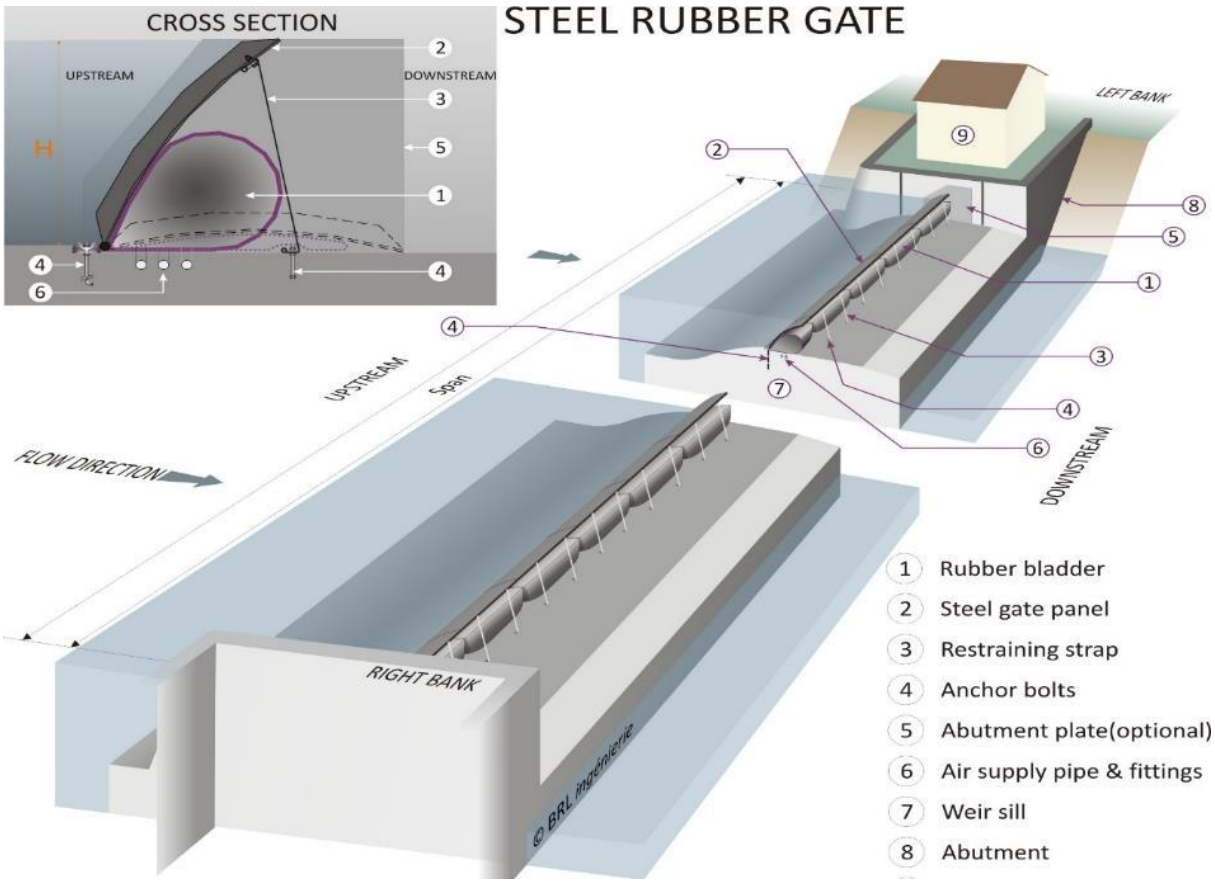

Figure 3 : vue axonométrique et coupe d'une bouchure gonflable à volet métallique © BRLingénierie

4. CONCEPTION ET FABRICATION DES MEMBRANES

Le composant principal de ce type de barrage est la membrane : matériau composite constitué de couches d'élastomères (revêtements intérieurs et extérieurs) et de polymères (tissu reprenant les efforts de traction). Lorsqu'une membrane nécessite une forte résistance à la traction, plusieurs couches de polymères sont nécessaires, une couche centrale d'élastomère vient alors les lier entre elles. Pour constituer une bouchure gonflable, la membrane est fabriquée en assemblant des bandes ou lés par passage sous presse ou vulcanisation à chaud. La largeur de la bande dépend du fabricant, mais elle est généralement comprise entre 1,2 m et 2,0 m. Une membrane de 20,0 m de long sera ainsi composée de 10 à 16 lés. La membrane utilisée pour soutenir un volet métallique est de longueur réduite, prenant la forme d'un coussin. Elle est assemblée par vulcanisation.

Les membranes sont souvent fabriquées selon les normes techniques japonaises [5]. À l'heure actuelle, il n'existe pas de normes internationales de ce type. En Europe, le laboratoire BAW a produit des recommandations sur les essais permettant de qualifier les membranes en 2016 [6]. Lors de la conception, les cas de charge doivent être définis : principalement niveaux d'eau en amont et en aval, charges liées à la glace ou la sédimentation par exemple.

5. CONSIDERATIONS HYDRAULIQUES

La hauteur de surverse est un facteur crucial à prendre en compte : elle peut générer des vibrations préjudiciables à la structure. Il est généralement admis que la surverse ne doit pas excéder 20% de la hauteur d'une bouchure gonflée à l'air, contre 50% pour une bouchure gonflée à l'eau [7].

5.1. Effet V-Notch

Une particularité des membranes remplies à l'air est l'apparition d'un V-Notch, qui se produit en raison des différences de densité entre l'air et l'eau. Comme les membranes sont fines à l'échelle des charges hydrauliques qu'elles supportent, le système devient instable lorsque la surverse devient importante. La bouchure déverse d'un seul côté et le lit en aval peut être soumis à des écoulements localement plus importants. Les membranes remplies d'eau ne sont pas sujettes à ce phénomène. La figure 4 ci-dessous montre une comparaison de l'impact des écoulements entre un remplissage à l'eau et à l'air dans les mêmes conditions aux limites.

Figure 4 : effets de l'écoulement sur une membrane remplie d'eau (à gauche) ou remplie d'air (à droite) pour des conditions aux limites identiques, Gebhardt 2006

5.2.Brise lame ou déflecteurs

Les normes japonaises mentionnent la nécessaire adjonction de déflecteurs ou brise lame aux bouchures lorsque des phénomènes de vibration sont à craindre (fig.5).

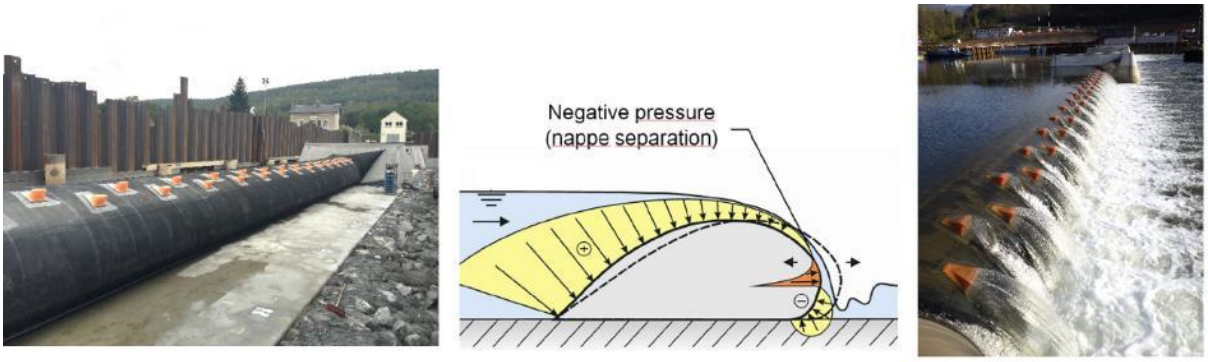

Figure 5 : exemple de brise lame sur les barrages de navigation de la Meuse, Aubonnet 2017 et schéma décrivant le phénomène de vibration d'une membrane, Gebhardt 2006

Ils ont pour fonction d'aérer la nappe d'écoulement. La mise en œuvre d'un déflecteur continu est moins performante que celle de brise- lame répartis sur la partie aval de la bouchure [8].

6. SYSTEME D'ANCRAGES

Le système d'ancrage est constitué d'un rail inférieur et d'un rail supérieur dans laquelle est pincée la membrane, par le serrage de boulons d'ancrage à intervalles réguliers. Ces ancrages sont disposés au niveau du radier et des bajoyers. Les éléments sont généralement en acier doux galvanisé à chaud ou en acier inoxydable (fig.6).

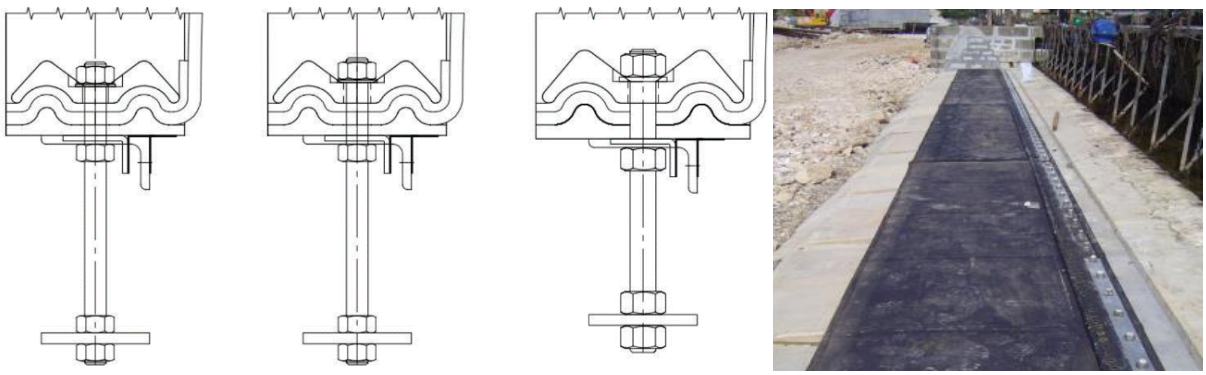

Figure 6 : exemple d'ancrages (à gauche) ; ligne d'ancrage d'un barrage à volets métalliques © BRLingenierie (à droite)

L'ancrage a plusieurs fonctions, dont les principales sont le serrage et le maintien de la membrane (et de l'articulation du volet pour les bouchures à volets metalliques) et l'étanchéité au contact du génie civil.

Dans tous les cas, les rails, boulons et autres éléments constitutifs de l'ancrage, dont la conception est portée par le fournisseur doivent être justifiés ou éprouvés pour démontrer leur résistance aux cas de charges attendus.

Compte tenu de la présence d'élastomère dans l'assemblage, une procédure de serrage et de vérification et resserrage du système d'ancrage est impérative avant toute mise en service.

7. EXPLOITATION, INSPECTION ET MAINTENANCE

L'exploitation d'un barrage gonflable diffère sensiblement de celle d'une vanne traditionnelle. En général, un manuel d'utilisation et d'entretien est livré par le fournisseur.

7.1.Exploitation

Les actions de montée-descente de la bouchure sont généralement automatisées, avec des consignes provenant de sondes de niveau. L'exploitant entretient un ensemble de pompes de capacité réduite, de vannes, de compresseurs le cas échéant, de dispositifs de prise ou rejet d'eau et de conduites, ainsi qu'un système électrique et de contrôle commande classique pour de tels ouvrages. Les membranes sont généralement équipées de systèmes de purge d'air dans le cas d'un remplissage à l'eau.

En cas de défaillance des appareils de mesure ou des fonctions automatiques, le système de commande (API) doit être vérifié, réparé ou changé. Les bouchures peuvent être manœuvrées en mode manuel. Une panne d'alimentation électrique ne doit généralement pas entraîner l'abaissement automatique et inversement ne doit pas l'interdire en cas de crue. Il s'agit là de données d'entrée pour leur conception.

Les rivières contenant de grandes quantités de débris ou d'embâcles peuvent affecter l'intégrité des membranes. Ceux-ci peuvent généralement être enlevés en abaissant brièvement la hauteur de la bouchure lors d'une opération manuelle. La plupart des exploitants s'accordent à dire que le passage de débris présentant des bords tranchants, tels que de vieilles pierres, éléments en acier pointus (éléments métalliques, planches avec pointes saillantes) constituent pour la membrane une plus grande menace que la glace et les arbres [9].

7.2.Inspection et maintenance

L'inspection et la maintenance ont pour but l'examen structurel et l'évaluation de l'ensemble du système, en particulier la membrane, le système de fixation et l'ensemble des fonctionnalités installées.

Figure 7 : mise à sec d'une passe pour inspection de la membrane, barrage de Bannetze, Allemagne, © BAW

Comme les autres types de bouchures, les barrages gonflables doivent bénéficier d'inspections régulières (fig.7). Par rapport à une vantellerie classique, les exploitants peuvent ressentir une incertitude par méconnaissance de cette technologie. Certains points d'attention spécifiques sont relevés :

Les membranes sont naturellement plus vulnérables au vandalisme et - comme mentionné ci-avant - au passage de débris ou objets tranchants.

En cas de perforation, la fuite peut être détectée par une sortie d'eau ou d'air évidente ou par la mise en marche des pompes ou des compresseurs le cas échéant. Il n'y a pas de risque de déchirure et si la fuite peut être compensée, l'aptitude au service est toujours assurée. Les travaux de réparation peuvent être effectués lors d'un entretien régulier.

Un constat d'abrasion anormale nécessite une attention particulière. L'aspect de la membrane peut permettre d'identifier un désordre : fissuration de surface, présence de cloque liée à un défaut d'adhésion entre les couches constituant la bouchure.

Le fonctionnement continu des pompes de remplissage doit alerter, il permet notamment de détecter une fuite, voire un désordre sur les ancrages.

Les dommages subis par les membranes peuvent être classés en quatre catégories :

(1) Petits dommages localisés du revêtement extérieur (fissures), textile non endommagé, pas de fuite.

(2) Petites perforations localisées avec petites fuites (objets pointus, balles)

(3) Cloques sous le revêtement en caoutchouc (fuites, décollement)

(4) Abrasion de grande surface avec des textiles visibles (vibrations, sédiments)

Les perforations inférieures à 6 mm peuvent généralement être réparées par mise en place d'un obturateur. Les dommages de taille intermédiaire peuvent donner lieu à la mise en œuvre d'un patch de réparation (fig.8).

Figure 8 : exemples de réparations de petits dommages par mise en place de patchs sur site © PIANC

Si la membrane est endommagée, il convient de suivre une procédure de réparation appropriée et d'utiliser les matériaux adéquats afin d'assurer une réparation de bonne qualité. Le fournisseur doit être consulté dans la mesure du possible.

8. EXEMPLE FRANÇAIS SUR LA SAONE

Le barrage d'Auxonne, exploité par Voies Navigables de France, est un ancien barrage manuel utile à la navigation sur la Saône, jouxtant une centrale hydroélectrique au fil de l'eau. Il a été remplacé par un barrage automatisé en 2011 de type « steel-rubber gate » ou gonflable à volets métalliques. Cette solution l'emporte car elle permet à la fois de se dispenser d'une passerelle d'exploitation qui aurait été rendue nécessaire dans le cas d'une solution de type clapets avec actionneurs sur piles et de réutiliser le génie civil existant [10].

Il est constitué de 4 passes, avec une partie mobile de 220 mètres régulant le niveau d'eau amont, dont 3 mesurent plus de 50 mètres. La hauteur utile de la bouchure est de 1,40m, ce qui donne à la vantellerie de cet ouvrage un élancement important et justifie le choix d'une technologie gonflable.

Figure 9 : adaptation du génie civil en aval du radier existant - barrage d'Auxonne © BRLingénierie

La bouchure est produite par le fournisseur Obermeyer Hydro Inc. Elle comprend 2 couches de renforcement pour une tension maximum calculée de 20 kN/m. Elle est fixée au radier par une ligne d'ancrage amont (fig.9). La précision de régulation est de +/- 5cm.

9. EXEMPLE ALLEMAND SUR L'ALLER

Le long de la rivière Aller, dans le nord de l'Allemagne, deux barrages Marklendorf (fig.10) et Bannetze ont été remplacés par des barrages gonflables à l'eau ou « rubber gates ». Il s'agit des premières installations de ce type pour les voies navigables fédérales allemandes. Leur mise en service date respectivement de 2006 et 2009.

Chaque barrage compte deux passes, de 22 mètres de largeur environ pour une hauteur de 2,2m de bouchure. Des déflecteurs ont été installés pour la première fois sur les bouchures de ces barrages de navigation afin d'éviter les vibrations induites par le courant. A ce jour, cela s'est avéré efficace.

Ce retour d'expérience positif a pu être confirmé par une campagne de mesure du BAW réalisée plus de 10 ans après la mise en service, en 2020, au cours de laquelle aucune oscillation n'a été observée. Les inspections de l'ouvrage effectuées jusqu'à présent (tous les 6 ans) permettent d'espérer une durée de vie de ces bouchures supérieure à 30 ans.

Figure 10 : le barrage Bannetze sur la rivière Aller © BAW

RÉFÉRENCES ET CITATIONS

[1] Erbisti, P.C.F. (2014) Design of hydraulic gates. 2nd ed. Leiden, The Netherlands, CRC press/Balkema.

[2] Aubonnet, J (2012), Guide des barrages gonflables avec ou sans volets métalliques VNF DIEE / Cetmef

[3] Working Group 166 (2018), PIANC report Inflatable structures in hydraulic engineering

[4] Imbertson, N.M. (1960) Collapsible dam. Civil Engineering

[5] MLIT (2015b) On Rubber Bodies of Rubber Gates and of Actuators at Steel-Rubber Gates : Technical Standard. Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism

[6] Maisner, M. Werkstoffe für Schlauchmembrane, Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau 91

[7] JICE (2000b) Technical Standard for Rubber Gates. 3rd edn. Japan Institute of Countryology and Engineering (JICE)

[8] Gebhardt, M. (2010) On the causes of vibrations and the effects of countermeasures water-filled inflatable dams. 1st European IAHR Congress Edinburgh.

[9] Tuthill, A.M. (2001) Ice Engineering: Performance Survey of Inflatable Dams in IceAffected Waters. U.S. Army Corps of Engineers - Cold Regions Research & Engineering Laboratory.

[10] Aubonnet, J. Seguin, J.P. (2015) Guide des barrages gonflables : un outil pour la rénovation des barrages de navigation – colloque vantellerie CFBR.