

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.

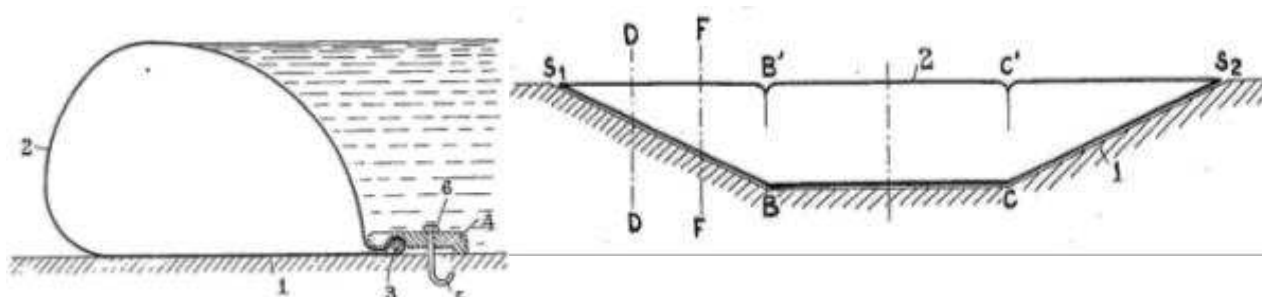


Figure 1 : extrait de brevet figurant le principe de barrage gonflable dans les années soixante [source INPI]

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 élanement (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		7.62 mm 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 boudruches équipant des barrages gonflables [7]

Les échantillons de boudruche auscultés au stéréo-microscope pour définir l'impact du tir sur la boudruche 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 boudruche 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 boudruche 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 équivaldrait, pour vidanger une boudruche 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 boudruche. 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).

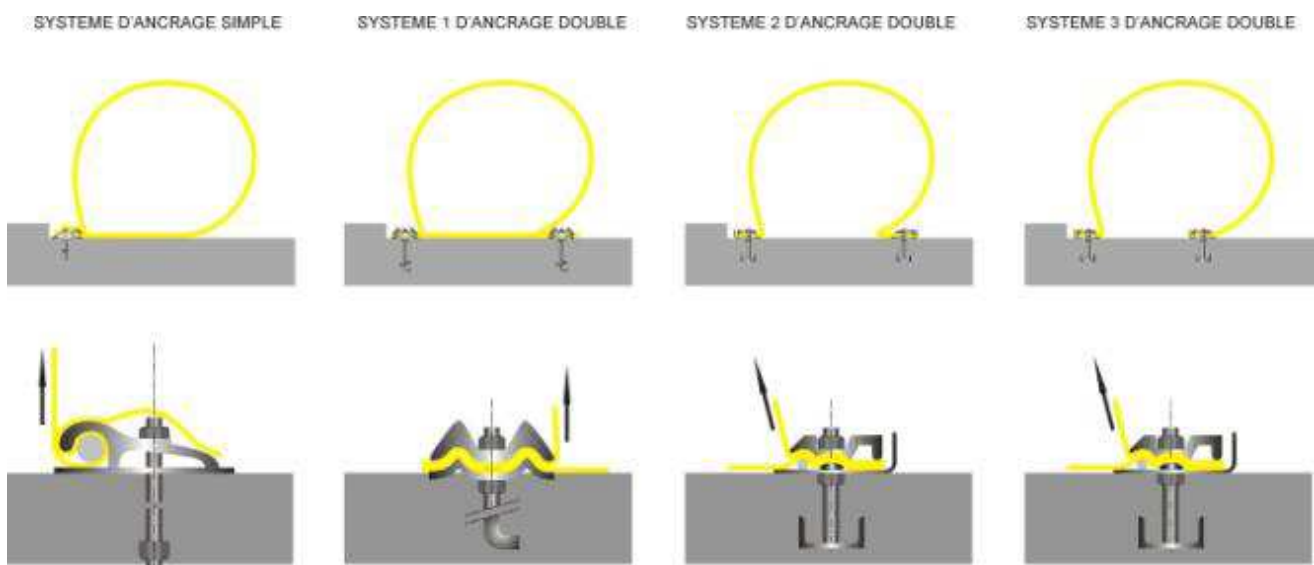


Figure 7 : exemples d'ancrages recensés dans la littérature [crédit image ©BRLingénierie]

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.

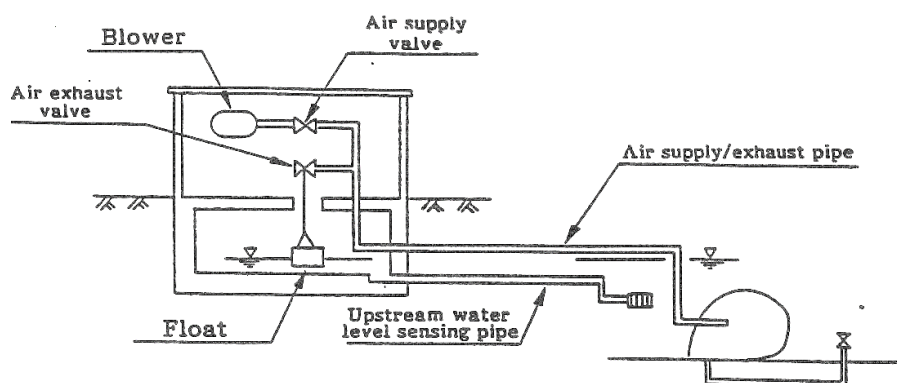


Figure 8 : schéma des différents organes constituant le système de manœuvre [8]

Outre le matériel habituel de secours de puissance (groupe électrogène, ensemble chargeur batteries) et de contrôle commande (armoires automatiques, 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 boudruches 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 CBRT / 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 m ³ /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 (m ³ /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 boudruche,
 - 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 ferrailage 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 boudruches 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.

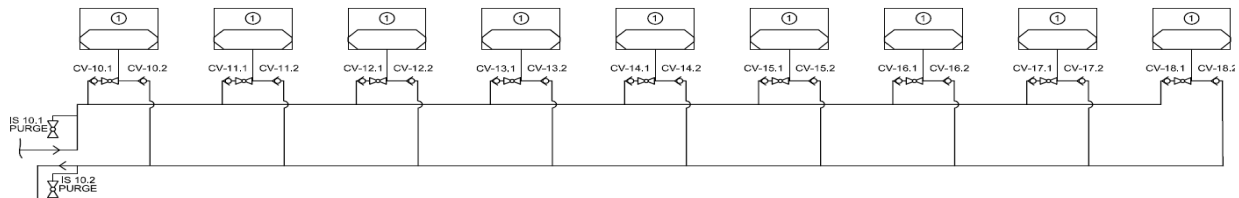


Figure 12 : schéma des conduites d'amenée et départ d'air pour chaque passe [source DYRHOFF/Obermeyer]

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 boudruches 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 boudruche, 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 boîtes 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 secours : 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 boîtier 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.

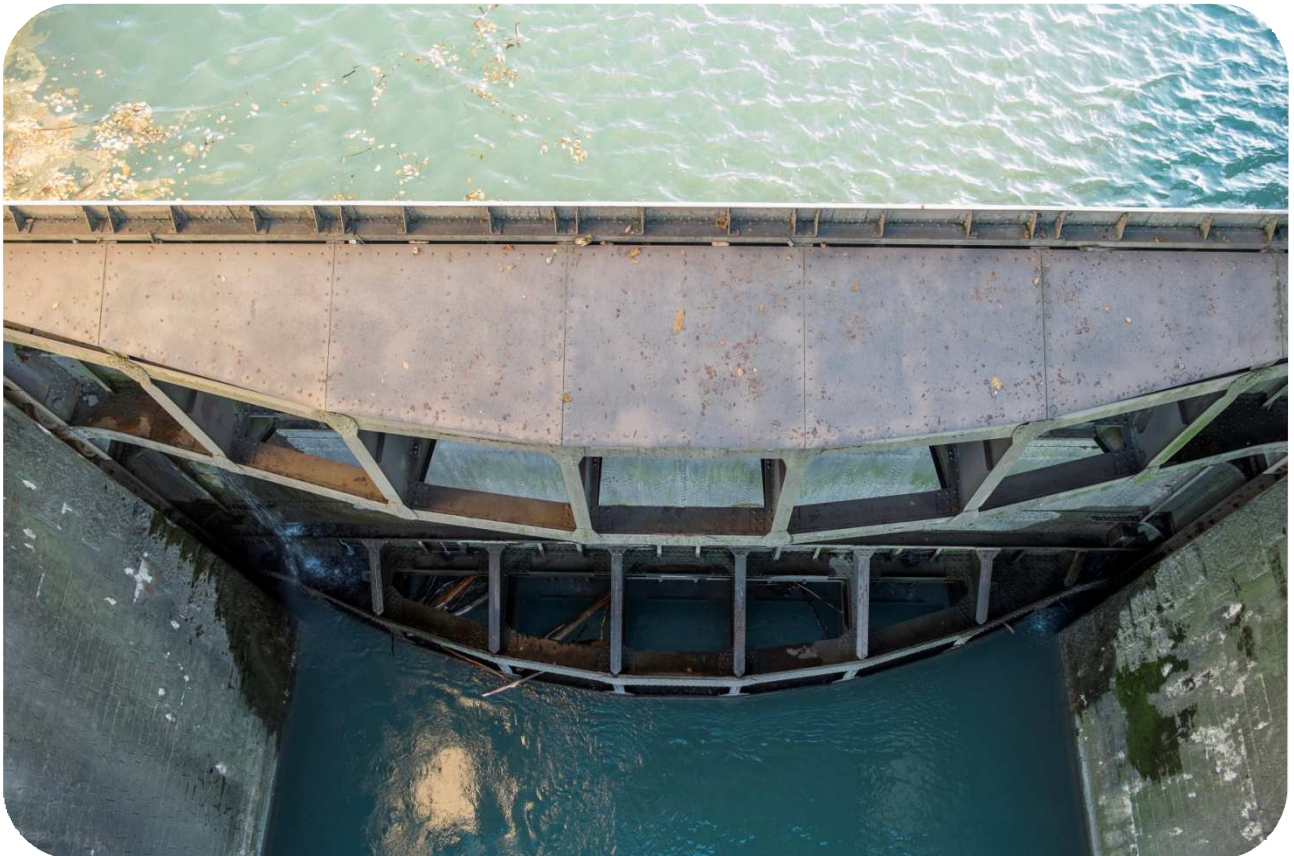
Voies Navigables de France concrétise cet intérêt en engageant en 2015 la construction de 29 ouvrages de ce type sur les voies d'eau de l'Aisne et de la Meuse. Ce projet, pour lequel BRLingénierie est mandataire du groupement conception, est réalisé dans le cadre d'un contrat de partenariat public privé 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) Werkstoffe 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*

