

BLOCAGE DES EVACUATEURS DE CRUE PAR LES CORPS FLOTTANTS

Blocage of spillway gates by floating debris

Frédéric LAUGIER, Julien VERMEULEN, PAUL VALLEY, Mélissandre GALLITRE

EDF-CIH – 4 allée du Lac de Tignes 73 290 La Motte SERVOLEX - FRANCE

frederic.laugier@edf.fr ; julien.vermeulen@edf.fr ; paul.valley@edf.fr ; melissandre.gallitre@edf.fr

MOTS CLEFS

Corps flottants, blocage, embâcles, évacuateur de crue

KEY WORDS

Floating debris, blocage, spillway

RÉSUMÉ

Le risque de blocage des évacuateurs de crue par les corps flottants constitue un sujet aussi ancien que l'hydraulique.

Les incidents émaillant les évacuateurs de crue des barrages, en particulier, les organes vannés sont nombreux (Palagnedra, Pinet, Plan d'Arem etc..). Les enjeux de sûreté sont évidents et prégnants en termes de capacité de manœuvre des évacuateurs de crue, d'obstruction partielle et finalement de perte de débitance. Pour autant, ils ont rarement conduit à des ruptures de barrage.

Cependant, force est de constater que ce sujet pourtant majeur n'a été traité, jusque récemment, que de manière assez peu académique avec des règles de dimensionnement pas réellement formelles ou des propositions de dimensionnement sur une base forfaitaire peu étayée scientifiquement (par exemple les règles issues des recommandations du CFBR de 2013 sur les EVC).

Plusieurs travaux de recherche significatifs ont été réalisés dans un passé très récent, notamment aux USA (USBR), en Suisse sous le patronage du comité suisse des barrages et de l'OFEN, ou en France, sur la base à la fois de modélisations physiques plus ou moins systématique et de modélisation numérique.

L'objectif du présent papier est ainsi de dresser un bilan de l'état de l'art à date du traitement global de la problématique depuis la production des corps flottants dans le bassin versant (naturels – bois ou glace, artificiels – pontons, PV flottants, pêcheur etc..), à leur transit dans les rivières puis dans la retenue en amont du barrage, leur passage à travers les EVC et les organes vannés.

ABSTRACT

Blocage of spillway by floating debris is a classical issue in hydraulic engineering.

Incidents concerning dam spillways and gates in particular are not rare (Palagnedra, Pinet, Plan d'Arem etc..) with crucial dam safety issues. It concerns proper operating of gates, partial jamming of gates associated with impact on discharge capacity. So far, quite a few dam failure are associated with debris and spillway clogging.

However, until recently, this major dam safety topic was not dealt with academical approaches. Few design guidelines were available. In addition, few existing ones had a intermediate scientific approach (such as the rules in the CFBR FrenchCold recommandions on spillway (2013)).

Several significant research works were recently carried out, especially in the USA (USBR) and Switzerland, based on more or less systematic physical models and numerical models.

The aim of this paper is to provide a quick overview of the state of the art to deal with this issue. It starts from the production of debris within the catchment area (natural or artificial debris), the way debris travel through rivers and reservoirs upstream the dam, and finally their passage and impacts through spillway and gates

1. INTRODUCTION - PROBLEMATIQUE

Le risque de blocage des évacuateurs de crue par les corps flottants constitue un sujet aussi ancien que l'hydraulique et les barrages.

Les incidents émaillant les évacuateurs de crue des barrages, en particulier, les organes vannés sont nombreux en France, Pinet (1982), Grangent (1980, 2008), Plan d'Arem (2013) ou à l'international avec les exemples abondamment cités de Palagnedra (Suisse, 1976) ou Kerckhoff (USA, 1997).

Ces incidents ont rarement conduit à des ruptures de barrage. Pour autant, les enjeux sûreté apparaissent évidents et prégnants en termes de capacité de manœuvre des évacuateurs de crue, d'obstruction et finalement de perte de débitance et d'autres dommages.



Figure 1 : Exemples d'obstruction : a) Barrage de Pinet (1982), (b) Villeneuve sur Lot (2021), (c) Kerckhoff (USA, 1997), (d) La Fous

Cependant, force est de constater, que ce sujet pourtant majeur, n'a été traité, jusque récemment, que de manière assez peu académique avec des règles de dimensionnement pas réellement formelles ou des propositions de dimensionnement sur une base forfaitaire peu étayée scientifiquement (par exemple les règles issues des recommandations du CFBR de 2013 sur les EVC).

Plusieurs travaux de recherche significatifs ont été réalisés dans un passé très récent, notamment aux USA (USBR), en Suisse sous le patronage du comité suisse des barrages e de l'OFEN, ou en France, sur la base à la fois de modélisations physiques plus ou moins systématique et de modélisation numérique. L'agrégation de ces différents travaux permet aujourd'hui de définir une approche méthodologique autorisant une meilleure appréciation du risque lié aux corps flottants.

Pour autant, l'appréciation du risque lié aux corps flottants, conserve une certaine part d'empirisme, d'appréciation qualitative des situations (le bon sens !) et de jugement d'expert.

2. REPERES BIBLIOGRAPHIQUES

La liste ci-après fournit quelques-uns des principaux repères bibliographiques ayant abordé la question du passage des corps flottants sur les barrages. Elle n'est certainement pas exhaustive, mais fournit une vue générale de publications importantes constituant ou rassemblant les connaissances sur le sujet. Des références complémentaires sont fournies en fin de papier.

- [1] 1994 Gotland et al. - Clogging of spillways by trash - CIGB Q68 R36 DURBAN
- [2] 1997 Petits Barrages - Recommandations pour la conception, la réalisation et le suivi
- [3] 1998 Bulletin du CFGB - Recommandations pratiques pour améliorer la sécurité des barrages en crue
- [4] 2005 CEATI Debris in reservoirs and drivers – Dam safety aspects - Report No T042700-0209
- [5] 2013 CFBR - Recommandations pour le dimensionnement des évacuateurs de crues de barrages
- [6] 2017 CSB (Comité Suisse des barrages) - Bois flottant aux évacuateurs de crue de barrages
- [7] 2019 OFEN (Office Fédérale de l'Énergie, Suisse) - Effet des bois flottants bloquant un évacuateur de crue sous des conditions extrêmes
- [8] 2020 CIGB Bulletin 176 Blockage of reservoir outlet structures by floating debris
- [9] 2020 USBR Spillway debris physical model study - Hydraulic Laboratory Report HL-2020-09
- [10] 2022 ISL-INRAE Embâcles : concilier gestion des risques et qualité des milieux. Guide de diagnostic et de recommandations

La plupart de ces références se basent ou rappellent des règles empiriques ou de bonnes pratiques ([2], [3], [5]) ou bien se réfèrent à un cas particulier testé sur modèle physique et qui aura fait l'objet d'une tentative de généralisation avec les limites attenantes à cet exercice ([1], [9]).

Assez rares sont les approches réellement scientifiques et systématiques permettant d'approcher de manière scientifique et paramétriques les phénomènes en jeu, et notamment le risque de blocage des évacuateurs de crue avec la perte de débitance associée. Il convient de citer l'énorme effort réalisé par la communauté scientifique suisse qui s'est notamment saisie du sujet à la fin des années 2010. Les publications du CSB [6] et de l'OFEN [7], en partie basées sur les travaux de thèse de L. Benet (et de manière moins marquante sur la thèse de P. Furlan), fournissent de précieuses informations pour l'ingénieur impliqué dans les analyses de sûreté des barrages.

3. CARACTERISATION DE L'ALEA DE L'AMONT VERS L'AVAL

3.1 Nature des corps flottants

Les corps flottants qui s'accumulent dans les retenues de barrages sont de nature très diverse : bois flottants (arbres, arbustes, branches, feuilles), tourbe, barrages de castors, bateaux, pontons, barges, véhicules (voitures, caravanes), déchets anthropiques (plastiques, tentes), bungalows, carcasses d'animaux, etc..



Figure 2 : a) Incident des panneaux PV flottants au barrage de Yamura (2019), (b) pêcheurie du barrage de Villefort

Pour les barrages d'altitude, les embâcles de glace formés durant l'hiver (Figure 1d) peuvent couramment subsister jusqu'en début d'été. Ces icebergs résiduels peuvent conserver des tailles importantes (10-20 m) associées des épaisseurs substantielles. Ces embâcles naturels constituent alors une menace potentielle pour les évacuateurs de crue au printemps et en début d'été lorsque le risque de crue augmente sensiblement. Alors que ce risque était jusqu'à récemment considérée comme très faible en hiver, notamment en haute montagne, les effets du changement climatique tendent à montrer, ces dernières années, la répétition de phénomènes pluvieux à très haute altitude (2500-3000 m) en plein hiver qui, cumulés à une fonte accélérée du manteau neigeux, créent des crues en plein hiver.

En outre, l'aménagement récent des réservoirs avec des structures de type maisons flottantes, panneaux photovoltaïques flottants ou pêcheries, certes normalement ancrées, crée de facto de nouvelles catégories d'embâcles pour les barrages. Les dimensions de la pêcheurie installée sur la retenue du barrage de Villefort (Figure 2b), proches de celles d'un terrain de football, illustrent bien le risque potentiel eu égard aux dimensions du barrage et de ses évacuateurs de crue.

Concernant les bois flottants qui constituent la majorité des corps flottants, il convient de distinguer les essences, la nature du bois et leur capacité à flotter ou à couler en fond de retenue. Les densités de bois dites « bois vert » varient de 0.75-0.85 (épicéa, pin, peuplier) à 1-1.05 (chêne, châtaignier). Ces densités augmentent avec le temps d'immersion. Certaines espèces ne coulent jamais (épicéa) alors que le sapin coulera après quelques semaines.

3.2 Potentiel de production d'un bassin versant

L'aléa corps flottant est caractérisé par sa nature, son origine, le mécanisme susceptible de le mobiliser et le volume susceptible d'être apporté au cours d'eau du bassin versant ou directement dans la retenue.

Parmi les mécanismes producteurs de corps flottants dans une retenue, sont recensés : les crues, les glissements de terrains, l'érosion des berges (pouvant être aggravées pendant une crue), les

avalanches, le vent (tempêtes), les apports par des affluents abrupts, les feux de forêt, les activités de la faune sauvage, ainsi que les activités forestières (exemples : présence d'une scierie en zone inondable) ou même les actes malveillants intentionnels (exemple : désamarrage d'embarcations).

⇒ Les facteurs jouant un rôle prépondérant à ce sujet sont les crues, les glissements de terrain (avalanches en haute montagne) et l'érosion des berges.

La vitesse des écoulements en crue associée à une augmentation des niveaux d'eau avec une potentielle érosion des berges sera susceptible d'entraîner des arbres plantés, des débris d'arbres au sol (tempête, exploitation forestière) ou des structures anthropiques (pontons, bateaux, maisons flottantes etc..). Un important marnage de la retenue entre RN et PHE est un facteur aggravant.

La littérature [6][8] propose des formules analytiques (Ishikawan Rickermann) pour estimer le potentiel de production des bois flottants en fonction des caractéristiques d'un bassin versant et des essences. Néanmoins l'application de ces formules ne se révèle pas très utile pour l'estimation par l'ingénieur du risque corps flottants sur un barrage donné. En effet, à partir du moment où un bassin versant est raisonnablement boisé, et c'est le cas courant en France, la production potentielle de bois flottants sera généralement avérée.

⇒ C'est davantage l'analyse qualitative des caractéristiques du bassin versant, de son boisement, et du mode de production des corps flottants, associé au retour d'expérience des événements historiques (crues, tempêtes.) qui constituera un élément d'appréciation au jugement d'ingénieur.

⇒ Une des questions importantes pour l'analyse corps flottant est notamment de déterminer si les bois sont susceptibles d'arriver au barrage sous la forme d'un tapis massif et étendu de corps flottants agglomérés, ou plutôt d'arriver sous la forme de corps plus ou moins isolés.

Ce point conditionne en partie la capacité de transit à travers certains évacuateurs de crue, notamment lorsque les passes sont assez étroites.

Un corps flottant isolé pourra s'aligner dans le sens de l'écoulement et raisonnablement transiter à travers l'évacuateur de crue. Cela ne pourra pas être le cas d'un tapis flottant.

3.3 Transfert du bassin versant jusqu'au barrage et aux évacuateurs de crue

La production des corps flottants en amont ne signifie pas nécessairement que ces derniers arrivent aux évacuateurs de crue du barrage. L'étude du transport des corps flottants sera distinguée selon qu'il se fait le long d'un cours d'eau en amont du barrage ou dans la retenue, les données d'entrée n'étant pas les mêmes dans les deux cas.

Avant d'arriver au barrage, les corps flottants pourront être bloqués notamment par des obstacles tels que les ponts. La diversité des configurations, la méconnaissance des données hydrauliques (tirant d'eau ...), topographiques, etc., ne permet en général pas de conclure sur une possible rétention durable des corps flottants à travers les ponts. Ils constituent cependant un facteur d'appréciation possiblement positive à condition qu'un relargage brutal des corps flottants ne crée pas un tapis flottant. Des configurations naturelles telles que des îles ou des anses présentent également des capacités de rétention des corps flottants.

Notons qu'il existe des méthodes analytiques simples qui permettent d'estimer qualitativement le potentiel de transport d'un chenal. Des ratios adimensionnels servant à décrire le transport du bois ont été définis par des travaux suisses [x]. Plusieurs variables adimensionnelles caractérisant les troncs et le chenal permettent d'estimer le potentiel de transport des bois.

Réduction de la taille des corps flottants lors de leur transport le long du cours d'eau

Les études [6] [x] montrent que l'apport et le transport de bois flottant dans en rivière peuvent fortement réduire la longueur initiale des morceaux (Figure 3). Le bois flottant perd en moyenne **80%** de la hauteur initiale de l'arbre.

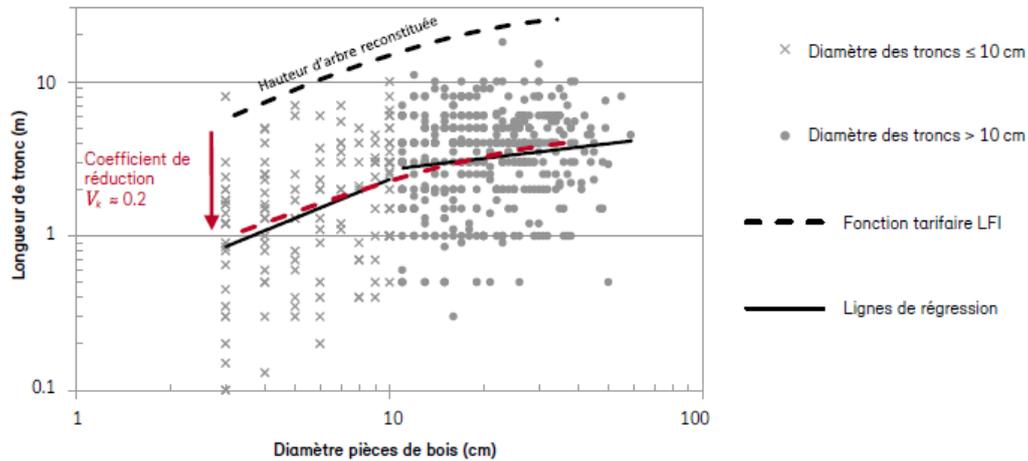


Figure 3 : Rapport entre la longueur des troncs et le diamètre des morceaux de bois flottant déposés lors des crues de 2005 étudié sur 27 sites [6]

Les forces physiques (glissement, passage dans les gorges, ...) ou le processus de mobilisation (glissements de terrain, coulées de débris, ...) jouent un rôle plus important dans la réduction de la taille du tronc que la distance de transport.

Les bois flottants peuvent conserver des dimensions assez importantes, notamment lorsque des glissements de terrain se produisent directement dans un réservoir ou en amont proche. La longueur des troncs n'est alors que très peu réduite.

Transport des corps flottants dans la retenue du barrage

Le retour d'expérience (notamment à EDF) montre que dans de nombreuses configurations, malgré la production potentielle importante de corps flottants en amont, ces derniers n'arrivent pas jusqu'au barrage durant la crue.

Plusieurs facteurs expliquent ce phénomène :

- La faible vitesse du courant de surface en crue
- L'existence de courants de recirculation
- L'orientation de l'écoulement par rapports aux vents dominants
- La sinuosité de la retenue et l'existence de zones d'échouages

Exemple 1 – Grande retenue – Temps de transit

Pour des retenues de grande dimension, la vitesse moyenne d'écoulement des corps flottants pourra être extrêmement faible. Le temps de transit important des corps flottants sera typiquement supérieur au temps de base de la crue.

⇒ Application à un barrage dans les Pyrénées : $S = 20 \text{ ha} - H = 20 \text{ m} - Q_{3000} = 15 \text{ m}^3/\text{s}$

La section moyenne hydraulique amène à une vitesse moyenne inférieure à 0.01 m/s pour la Q_{3000} . En 5 h, les corps flottants avancent d'environ 150 m. Considérant la longueur de la retenue (750 m) et le temps de base de crue, la probabilité d'atteinte du barrage, par les corps flottants entrant en amont de retenue, est jugée très improbable.



Figure 4 : Exemple de zone d'échouage potentielle sur une retenue sinueuse

Exemple 2 – Grande retenue – Echouages par effet du vent ou des recirculations

Pour des retenues de grande dimension, la vitesse moyenne d'écoulement des corps flottants pourra être relativement faible au regard d'autres phénomènes. Dans certaines conditions, les corps flottants n'arriveront qu'avec une faible probabilité jusqu'au barrage et pourront s'échouer sur les rives. Les conditions favorables à cela sont :

- La sinuosité de la retenue. Elle crée des courants extrados qui vont entrainer les corps flottants sur les rives.
- La présence d'îles et d'anses naturelles seront autant de pièges naturels.
- Des courants de recirculation pourront également piéger ou amener à l'échouage des corps flottants (Figure 4).
- Plus prosaïquement, le vent sera un autre facteur pouvant empêcher physiquement la progression des corps flottants vers le barrage. Le rôle du vent est d'autant plus important que la retenue est grande (vitesses en surface plus faibles).

Il est possible de déterminer une vitesse de vent limite qui favoriserait le dépôt de corps flottants vers une zone d'échouage plutôt que vers les EVC en faisant un bilan simplificateur des forces appliqué à un tronç flottant, projeté sur l'axe horizontal. L'action du vent sera supérieure à celle de l'eau si $\frac{F_{vent}}{F_{crué}} > 1$. En première approche :

$$F_{vent} = C_{x_{air}} * S_{air} * \rho_{air} * v_{vent}^2 \text{ et } F_{crué} = C_{x_{eau}} * S_{eau} * \rho_{eau} * v_{crué}^2$$

Avec : C_x : Coefficient de traînée, v : vitesse, ρ : masse volumique

En supposant $\frac{S_{air}}{S_{eau}} = \frac{1}{10}$ compte tenu de la submersion du corps flottant et $\frac{C_{x_{air}}}{C_{x_{eau}}} = 1$ compte tenu de la géométrie du corps flottants, cela revient à vérifier la condition $\frac{v_{vent}}{v_{crué}} > 10^{3/2}$, à partir du moment où le vent n'est pas orienté en direction (à quelques degrés) du barrage.

⇒ Application à un grand barrage du massif central : $S = 170 \text{ ha} - H = 65 \text{ m} - Q_{1000} = 350 \text{ m}^3/\text{s}$

Avec $v_{crué} = 0.04 \text{ m/s}$ dans la retenue, la condition précédente est vérifiée pour $v_{vent} > 1.3 \text{ m/s}$

Ces approches simplifiées permettent de fournir des éléments d'appréciation quantitatifs en termes d'ordre de grandeur. Ils sont à compléter par l'analyse du retour d'expérience des exploitants au cas par cas. De manière générale, il apparaît que l'arrivée de corps flottants sur les grandes retenues capacitatives ou méandreuses est effectivement assez rare. La réduction importante de taille des corps flottants est aussi constatée pour une majorité d'évènements passés.

4. ENDOMMAGEMENT, BLOPAGE ET/OU PERTE DE DEBITANCE D'UN EVACUATEUR DE CRUE

Les principes présentés précédemment permettent d'apprécier la probabilité d'arrivée de corps flottants jusqu'au droit du barrage et des évacuateurs de crue.

En cas de risque d'arrivée de corps flottants, la prochaine étape consiste à évaluer :

- D'une part, les conditions de transit des corps flottants à travers les évacuateurs de crue.
- D'autre part, en cas de risque possible d'obstruction des passes, la débitance résiduelle des évacuateurs de crue.

4.1 Blocage des évacuateurs de crue – Transit des corps flottants à travers les évacuateurs

Le retour d'expérience disponible d'obstruction massive et généralisée d'évacuateurs de crue mentionne en majorité les cas connus et documentés de Palagnedra (1976 – seuil libre [i]), Pinet (1982 – vanne segment [iv]) ou Kerckhoff (1997 – vanne segment [vii]). Pour ces trois barrages, la largeur des passes était assez à l'époque des faits limitée, de l'ordre de 5-6 m pour autant de haut.

D'autres cas de blocage ou dysfonctionnement partiels dû aux corps flottants existent. Ils ne sont souvent que partiellement documentés et ne s'avèrent pas nombreux dans la littérature. Le rapport suédois [vii] de 2020 mentionne une douzaine d'incidents marquants, probablement assez inférieur à la réalité.

Les bonnes pratiques françaises [3][5] mentionnent, pour une conception neuve :

- Des largeurs de passe d'au moins 10 à 15 m
- Le maintien d'un tirant d'air de l'ordre de 1,5 m à 2 m

La pratique Suisse [6] préconise, à partir de l'article de Gotland et al. [1] :

- Une largeur de passe $L_p > 0,8.H_t$ (longueur probable de tronc)
- Tirant d'air + Tirant d'eau $H_b > 0,15-0,2.H_t$ selon le ratio $L_p/H_t < 1,1$

Ces pratiques sont à pondérer et à adapter en fonction de la configuration et de la situation du barrage (altitude, bassin versant, caractéristique de la rivière et des écoulements etc..). Pour des barrages mobiles en rivières ou des ouvrages pour lesquelles l'arrivée de corps flottant au droit du barrage est certaine et régulière, les largeurs de passe pourront être augmentées, d'autant plus si l'arrivée de tapis denses de corps flottants est possible.

Ces éléments sont à relativiser en fonction de l'impact de l'arrivée de ces corps flottants sur la débitance du barrage et le fonctionnement des évacuateurs de crue. Comme nous le verrons plus loin, il existe plusieurs configurations pour lesquelles cet impact est très limité pour des ouvrages existants.

La question du transit sans blocage des corps flottants a été étudié scientifiquement par Furlan [i] avec une approche systématique, paramétrique et répétitive. Dans le cas de bois, la probabilité de blocage est ainsi influencée par la densité des troncs, le diamètre des troncs par rapport à la charge hydraulique sur le déversoir, le nombre de passes ouvertes et le rapport entre la longueur des troncs et la largeur des passes influencent la probabilité de blocage des troncs individuels. Il a été constaté que l'augmentation de la taille d'un groupe de troncs, par rapport à un tronc individuel, modifie la probabilité de blocage uniquement lorsque la longueur relative du tronc est supérieure à la largeur de la passe. Le blocage d'un évacuateur est donc un phénomène très complexe, avec une composante aléatoire et non linéaire.

- Non linéaire dans le sens où une difficulté de passage d'un seul corps flottant peut rapidement empêcher les autres corps de transiter et mener à une accumulation rapide des corps en amont du barrage.
- Aléatoire, car la répétition d'une même manipulation peut amener à des résultats différents (blocage / pas blocage), d'où la nécessité expérimentale lourde d'un grand nombre de répétitions des essais pour aboutir à des probabilités fiables.

L'arrivée, selon qu'elle soit en masse (tapis) ou isolée de corps flottant, aura un impact certain. Le retour d'expérience semble montrer que des corps isolés ont tendance à s'aligner avec l'écoulement à l'approche des évacuateurs et peuvent transiter à travers des passes de largeur réduite (entre 6 et 10 m) dans la mesure où le tirant d'eau est suffisant et capable de « tirer » le corps flottant. L'arrivée en tapis massif ne le permettra pas pour des passes de ces dimensions.

- ⇒ Finalement, d'un point de vue sûreté du barrage, le transit intégral de tous les corps flottants n'est pas nécessairement requis si l'impact sur la débitance des évacuateurs est faible et l'exhaussement du plan d'eau limité. Cependant, il subsistera dans pareil cas de réelles sujétions d'exploitation sur le traitement des corps flottants résiduels dans la retenue post crue.

4.2 Débitance résiduelle des évacuateurs de crue

Dans un passé récent, une perte de débitance forfaitaire de 30% était fréquemment associée à un évacuateur de crue obstrué par des corps flottants, ainsi les recommandations du CFBR de 2013 [5]. La source et la justification de ce ratio est difficile à trouver et à étayer. Des publications passées ont pu évoquer, dans le cas de la crue de 1982 au barrage de Pinet, une perte de débitance de 30 à 35%, sans pouvoir pour autant étayer ce chiffre.

L'appréciation de l'impact de l'obstruction d'un évacuateur sur sa débitance a fait l'objet de recherches récentes, présentées ci-après, qui ont sensiblement amélioré la connaissance de la perte de débitance associée à un blocage. Les outils numériques de modélisation 3D, permettent également à l'ingénieur de réaliser relativement facilement des modélisations et des études de sensibilité sur ce sujet.

Travaux de Bénét / Pfister / DeCesare : Influence des piles / Passage sur un seuil libre sans pile

Les travaux de thèse de L. Bénét [i] à l'université de Fribourg (Suisse) ont alimenté le rapport de l'OFEN (2019, Suisse) [7].

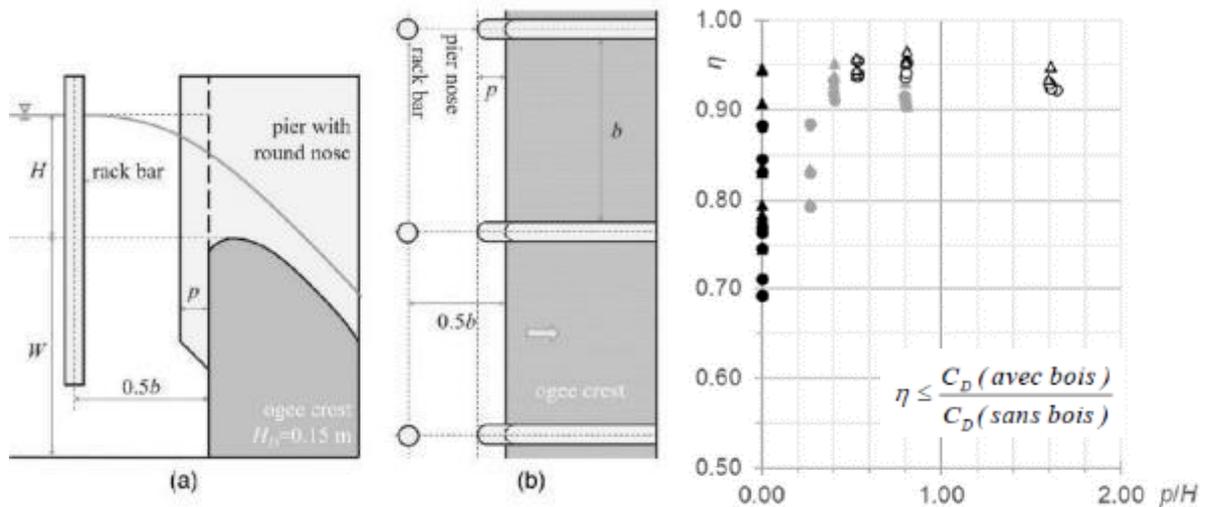


Figure 5 : Influence de l'avancée de piles, extrait de [7]

- **L'influence de l'avancement des piles** a été étudié selon le ratio $p(\text{avancement})/H$ (charge). Les essais ont montré que les corps flottants ont très peu d'impact sur le coefficient de débit dès que ce ratio $p/H > 0.35$ (Figure 5). Ce résultat est remarquable et très intéressant dans la mesure où il est applicable pour un grand nombre de barrage qui respectent ce critère. Il montre que dans certaines conditions, les piles jouent le même rôle qu'un râtelier / masque amont anti-embâcles qui peut être complexe et coûteux à concevoir et installer. Il pourra alors être plus simple de prolonger les nez de pile que d'installer un masque amont. Notons que l'article [xi] apporte quelques compléments pour la caractérisation de p dans le cas d'un parement amont de seuil non vertical sur la base d'un modèle physique d'un projet de barrage.
- **L'analyse du passage des corps flottants sur un seuil libre** à faible charge a été étudié en fonction du diamètre maximum des troncs D_M et de la charge hydraulique H_R . Trois régimes ont été observés selon le rapport D_M / H_R :
 - Un blocage complet pour $D_M / H_R > 0,60$,
 - Un passage de tronc individuel pour $0,35 \leq D_M / H_R \leq 0,60$,
 - Un déversoir libre sans blocage pour $D_M / H_R < 0,35$.

Le coefficient de débitance, même entièrement obstrué, reste supérieur à 0.3 (abattement de 40% environ).

Ces résultats ont été exploités notamment pour les barrages de haute montagne vis-à-vis des embâcles de glace, bien que la forme de ces derniers ne s'apparente pas à des troncs d'arbres. Ces travaux restent probablement pertinents pour définir la charge minimale permettant d'évacuer les embâcles par-dessus le seuil libre.

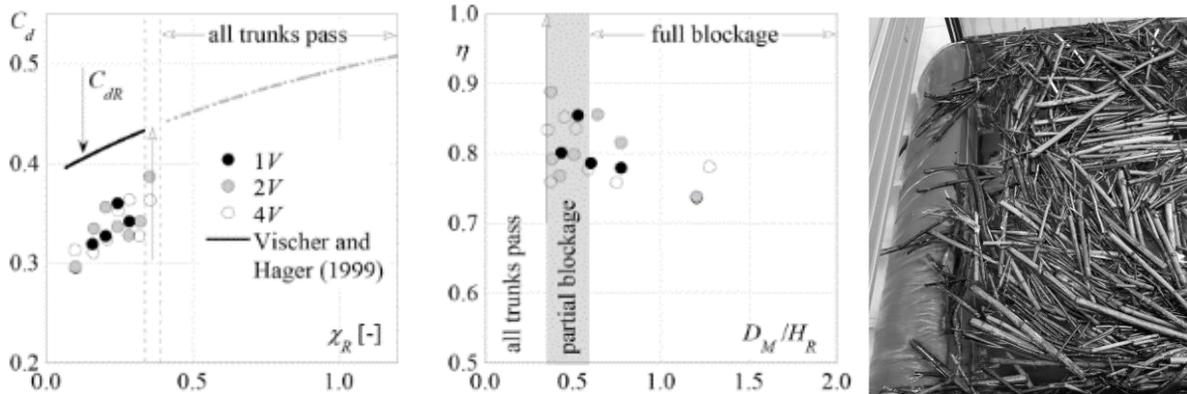


Figure 6 : Influence des corps flottants sur un seuil libre, extrait de [iii]

Travaux de l'USBR (Walker) - Vannes segments sur seuil profilés

Les travaux de l'USBR (Walker, [9]) ont estimé la perte de débitance créée par l'accumulation de corps flottants devant des pertuis vannés (vannes segments).

Deux types d'expérience ont été menées : soit avec des débris qui s'accumulent naturellement en amont, soit avec des débris placés artificiellement manuellement contre le tablier de la vanne.

Les résultats sont formulés en termes de perte débitance selon un ratio adimensionnel appelé « Gate Index » $GI = G_o/H_R$ avec G_o : Ouverture vertical de la vanne et H_R = Charge sur le seuil

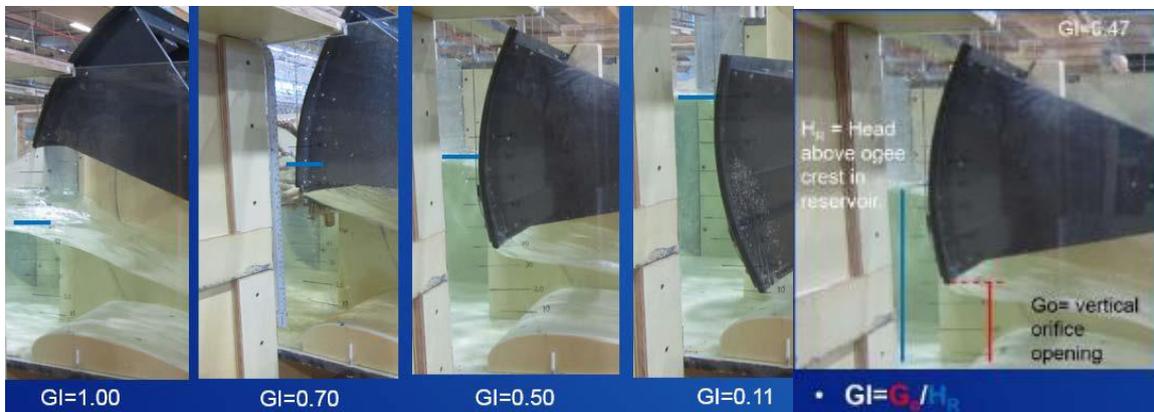


Figure 7 : Illustration du gate Index, extrait de [iii]

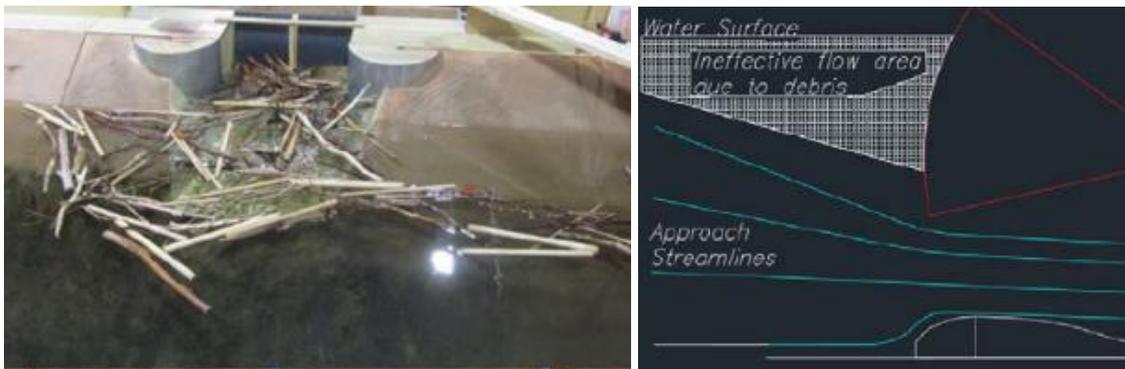


Figure 8 : a) Modèle physique, b) Réduction de contraction due à la présence du tapis flottant [iii]

L'approche de l'USBR est instructive mais elle reste cependant largement incomplète car ces essais ont été réalisés par opportunisme d'un modèle physique d'un « vrai » barrage (c'est d'ailleurs le cas de nombreuses publications comme celles Gotland [1] ou plus récemment Stocker [xii]). Les essais n'ont pas l'approche systématique scientifique qui consisterait à faire varier un certain nombre de paramètres afin d'obtenir de réels courbes adimensionnalisées permettant de généraliser les résultats.

Par ailleurs, un facteur aussi important que la forme et l'avancée des piles en amont n'est pas un facteur paramétré dans le modèle utilisé. Le modèle possède une configuration géométrique spécifique aux évacuateurs de crue du barrage étudié. Il ne possède que 2 évacuateurs et la géométrie du barrage impacte fortement l'alimentation de ces derniers (Figure 8).

La Figure 9 indique une perte de débitance comprise entre et 15 et 20% en extrapolant la courbe « natural jam » au-delà de 0,8.

Il est intéressant de constater que certains points sont proches de 0% de perte, voir positifs. La Figure 8b explicite ce fait apparemment paradoxal par l'allongement des courbes de courant et la probable diminution des effets de contraction et de perte de charge lorsque le tapis flottant est suffisamment étendu.

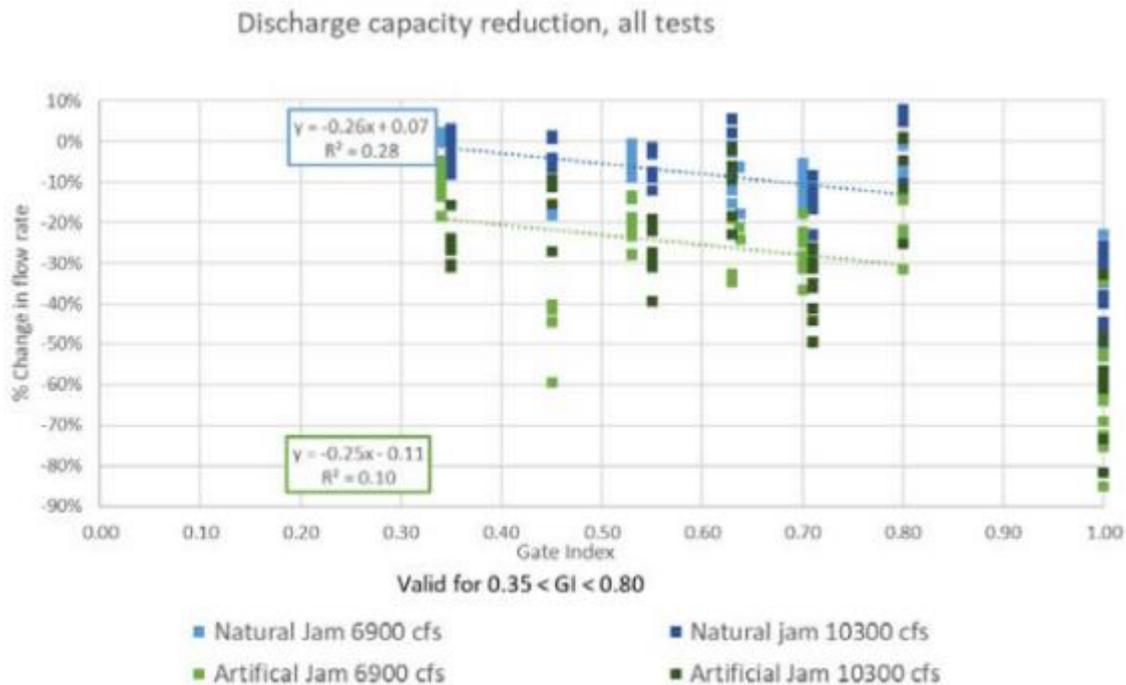


Figure 9 : Perte de débitance en fonction de G_o , extrait de Walker et al. (2018) [iii]

Apport de la modélisation 3D – Débitance résiduelle de grandes vannes plates sur fond plat

En complément de la bibliographie disponible, la modélisation numérique 3D constitue depuis quelques années un outil puissant et accessible pour compléter les analyses. La présente partie illustre son usage sur quelques cas pratiques.

Des modélisations numériques ont été conduites afin d'estimer la perte de débitance en cas d'obstruction des grandes vannes plates sur seuil plat d'un petit barrage par des corps flottants.

Les vannes plates du barrage étudiées mesurent 7 m de large x 11,5 m haut. Elles sont a priori sensibles à une arrivée massive de corps flottants. Au regard du tirant d'eau et de la mise en vitesse au droit des vannes, un corps flottant isolé est réputé transiter à travers la vanne avec un tirant d'air minimum. Pour la crue de référence, les vannes sont en charge et l'accumulation de corps flottants en amont est possible, bien que l'arrivée au barrage de corps flottants de grande taille soit jugée peu probable.

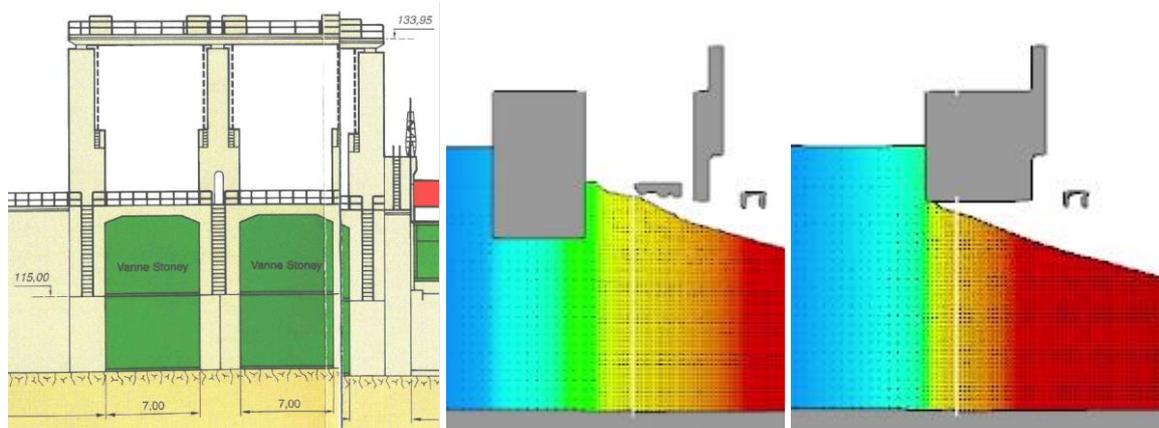


Figure 10 : Modélisation numérique 3d de grandes vannes plates sur fond plat a) élévation, b) embâcles de 5 mh x 5 ml contre les piles, c) embâcles de 3 mh x 5 ml contre la vanne

Un tapis flottant totalement étanche (sans porosité) est modélisé sous la forme d'un parallélépipède (Figure 10). Des études de sensibilité ont été menées sur la profondeur (de 3 à 8 m) et l'extension amont du tapis (de 5 à 10 m).

- ⇒ Les résultats des modélisations n'indiquent AUCUNE perte de débitance significative jusqu'à des profondeurs de tapis supérieures à 5 m. Le modèle indique même ici aussi un léger gain pouvant aller jusqu'à 5% selon les configurations. Il faut avoir des épaisseurs de tapis très importantes (8 m contre les piles ou 5 m contre les vannes) pour commencer à percevoir une influence de quelques pourcents.

L'explication est probablement à rechercher dans les moindres contractions des écoulements en amont des vannes que pour les écoulements libres directement contre les vannes, ces dernières étant en charge pour la crue étudiée. Ceci rejoint les observations de l'USBR / Walker décrites précédemment.

Apport de la modélisation 3D – Débitance résiduelle de vannes plates sur seuil en crête de grand barrage

Des modélisations numériques ont été conduites par EDF CIH, afin d'estimer la perte de débitance en cas d'obstruction des vannes segment sur seuil profilé, de dimension intermédiaire en crête d'un grand barrage voûte.

Un tapis flottant totalement étanche (sans porosité) est modélisé sous la forme d'un parallélépipède. Des études de sensibilité ont été menées par EDF CIH, sur la profondeur (de 1 à 5 m) et l'extension amont du tapis (de 2 à 20 m).

Les vannes plates du barrage étudiées font 8,5 m de large x 8,5 m haut. Elles seraient a priori sensibles à une arrivée massive de corps flottants. Au regard du tirant d'eau et de la mise en vitesse au droit des vannes, un corps flottant isolé est réputé transiter à travers la vanne avec un tirant d'air supérieur à 1 m. Les modélisations numériques menées par EDF CIH montrent que :

- Pour des tapis de faible épaisseur, la débitance serait très légèrement améliorée.
- Pour une épaisseur jusqu'à 3 m, la perte de débitance est de l'ordre de 5%

La Figure 12 ci-après indique la sensibilité de la perte de débitance selon les caractéristiques géométriques adimensionalisées (par rapport à la hauteur de la vanne) du tapis :

- La longueur du tapis aurait un impact positif, limité cependant à quelques pourcents et relativement indépendant de sa longueur.
- La profondeur du tapis a un impact négligeable (<5%) jusqu'à des profondeurs relatives P^* de 0,35. Au-delà, la perte de débitance augmente rapidement, ce qui est logique considérant une obstruction relative importante de la passe avec une forte réduction de section.

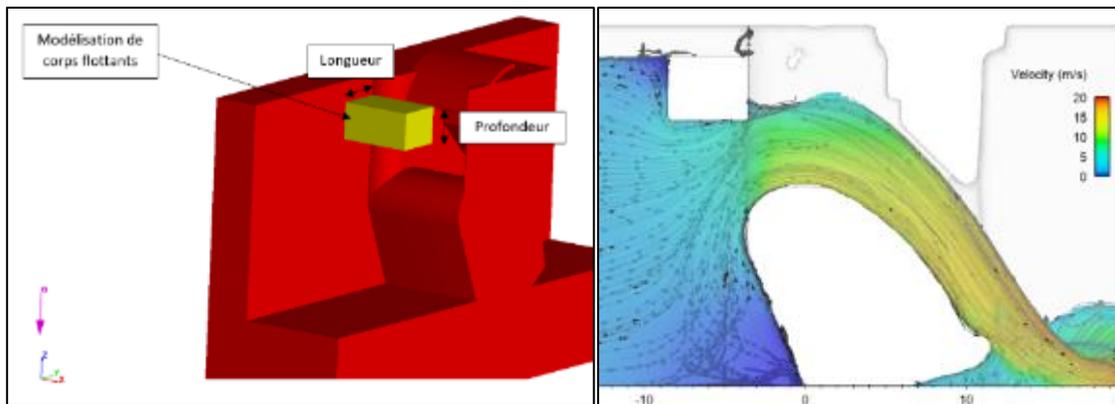


Figure 11 : Modélisation numérique 3d de vanne segment 8,5ml x 8,5 mh sur seuil profilé a) modèle, b) tapis de 3 mh x 5ml

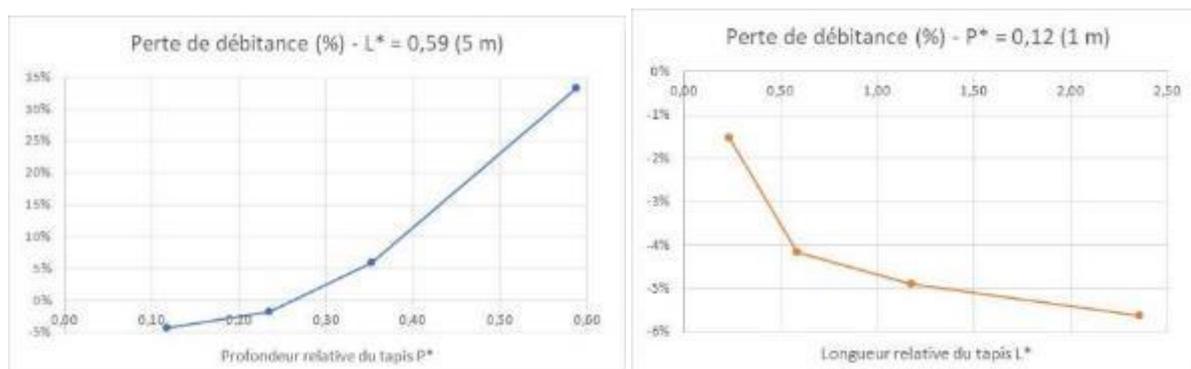


Figure 12 : Sensibilité de la perte de débitance selon la profondeur P^* ou la longueur relative L^* du tapis de corps flottants

4.3 Autres aspects : Endommagement, blocage mécanique

Outre l'obstruction et la perte de débitance, les corps flottants peuvent affecter le fonctionnement mécanique, notamment la chaîne cinématique de la vanne.

Dans certains cas, un choc d'arbre localisé sur un bras de vanne sensible à l'instabilité pourrait même conduire à la rupture de la vanne. C'est l'explication qui est donnée pour la rupture d'une vanne segment (4.3 ml x 8.2 mh) au barrage Black River aux USA en 2016 (Missipi, Figure 13a) quelques années seulement après sa rénovation complète (2012). On notera que dans la conception, les axes et les tourillons des vannes sont noyés en crue et les bras sont donc exposés aux chocs par des corps flottants. Il est toutefois difficile de dire en l'état si cette conception a été un élément favorisant l'accident.

Lors de la crue importante de Juin 2013 dans les Pyrénées, une des passes d'un barrage a été en partie obstruée par des corps flottants (Figure 13b). Ces derniers ont déformé un des arbres de synchronisation de la manœuvre de la vanne impactant fortement les manœuvres et la débitance. Le même barrage est équipé d'un clapet automatique à flotteur. L'arrivée des embâcles a colmaté la prise d'eau des puits servant à la manœuvre du flotteur avec pour conséquence un abaissement du niveau d'eau dans les puits et une refermeture du clapet.



Figure 13 : a) Rupture d'une vanne segment au barrage de Black River (USA, 2016), Déformation d'un arbre de synchronisation lors d'une crue (France, 2013)

Le vent et les vagues peuvent aussi être à l'origine de blocages ou de dysfonctionnements mécaniques. Lors d'une crue fin 2019 (Figure 14), un vent très fort crée des vagues significatives sur la retenue d'un barrage qui entraînent un certain nombre de bois par-dessus les bajoyers et pour certains, entre le bajoyer et le bras de la vanne en aval, limitant alors ses capacités de manœuvre. Selon la sensibilité de la vanne et sa motorisation, les conséquences peuvent être assez variables, notamment dans le cas de vannes automatiques à flotteur où l'on pourrait craindre soit une non-ouverture, soit une ouverture retardée et brutale de la vanne entraînant un surdébit aval.



Figure 14 : Exemple d'accumulation de corps flottants par les effets des vagues et du vent

5. SOLUTIONS DE MITIGATION

Les solutions de protection contre les embâcles sont multiples et l'on ne rentrera pas dans le détail dans le présent article :

- En prévention, on ne pourra que conseiller à l'exploitant de procéder à des nettoyages réguliers des berges de la retenue et à procéder à des inspections spécifiques notamment après des vents violents ou des crues importantes pour identifier des gisements potentiels de corps flottants qui pourraient être remobilisés.
- Des mesures de stabilisation des berges permettant de limiter le risque d'érosion ou de glissement de terrain peuvent être parfois préconisées.

- Des systèmes de rétention peuvent être installés :
 - o Un peigne à embâcles peut être installé en amont d'une retenue. Celui-ci a pour objectif de retenir les corps flottants pour limiter leur entrée sur le plan d'eau. Bien que l'utilisation de structures en bois soit également possible, le peigne est classiquement réalisé à partir de poutrelles IPN « I à Profil Normalisé », solidement implantées et ancrées dans le sol.
 - o Les dromes peuvent permettre de contenir les corps flottants en amont du barrage ou des évacuateurs. Leur dimensionnement en crue reste cependant délicat. La littérature témoigne d'un certain nombre d'incident et le récent bulletin CIGB sur les corps flottants [8] invite à la prudence quant à leur usage.
 - Le râtelier ou masque (ou « visor » en anglais) est un dispositif dont le principe est de bloquer les corps flottants quelques mètres en amont des évacuateurs pour limiter voire annuler la perte de débitance liée à l'embâcle. L'installation de ce dispositif de protection constitue une solution alternative intéressante : il permet de laisser passer une partie des petits corps flottants et de ne bloquer que ceux dont les dimensions sont supérieures aux évacuateurs, qui risqueraient de les obstruer. Il s'agit d'une structure fixe, constituées de poutres en acier dont l'espacement est légèrement inférieur à la largeur des passes. La Figure 15b) montre un tel dispositif installé au barrage de Thurnberg [4][8].
 - Dans la même logique et selon les résultats de Benet, un allongement des piles vers l'amont aura un double effet positif :
 - o La débitance des évacuateurs sera améliorée par diminution des effets de contraction latérale.
 - o En cas de blocage des corps flottants, la perte de débitance pourra être très limitée selon ratio d'avancement des piles.
- Un reprofilage des piles avec des formes hydrauliques plus appropriées peut également favoriser le passage des corps flottants.
- On pourra améliorer les conditions de passage des corps flottants à travers les vannes par la réalisation d'une sur-ouverture des vannes lorsque cela est possible. Cela a été fait par exemple dans le cas du barrage de la Ravière lors des travaux de modernisation du barrage vis-à-vis du passage des crues [v].
 - Le cas échéant, des solutions structurelles plus onéreuses peuvent être envisagées comme l'élargissement de la largeur des passes et/ou la surélévation des passerelles / ponts. Ces solutions ont été implémentés au barrage de Palagnedra [i] (seuil libre élargi) ou au barrage EDF de Pinet [iv] (installation de clapets de 40 m de large).



Figure 15 : Exemple de système de rétention a) peigne, b) masque amont (râtelier ou « visor »)

6. RETOUR D'EXPERIENCE METHODOLOGIQUE ET CONCLUSION

L'évaluation du risque embâcle pour un barrage et des évacuateurs de crue est un problème complexe, faisant appel à de multiples compétences très variées. Il s'agit d'un domaine relativement « neuf » pour lesquels les références scientifiques et techniques recevables sont encore très récentes et incomplètes. Un certain nombre d'aspects de cette méthodologie contiennent des aspects qualitatifs et une part importante de jugement d'ingénieur et d'empirisme. Il ne s'agit pas d'une science exacte !

Par ailleurs, selon les configurations, les enjeux sûreté, les outils et le grain des études sur lesquelles s'appuyer peuvent largement varier. Dans certains cas, des modélisations numériques 3D pourront être requises.

- ⇒ Afin d'éviter les biais cognitifs et la subjectivité des jugements, il est recommandé d'analyser cette problématique pour un barrage donné, en format « groupe de travail » incluant des spécialistes, ainsi que l'exploitant.

Apports des connaissances récentes : L'application de la méthodologie du guide CFBR 2013 [5] sur une trentaine de barrages EDF amène à retenir le risque corps flottant pour 70% des barrages, et un abattement de débitance forfaitaire de 30%.

- Or pour ces barrages, dans 2/3 des cas, la méthodologie présentée dans le présent article permet d'estimer que le risque de perte de débitance est très improbable.
- Dans les autres cas, les pertes de débitance estimées en s'appuyant sur les références bibliographiques récentes ou de simulations numériques permettent de s'orienter vers des abattements de débitance sensiblement inférieurs en moyenne à la valeur forfaitaire du CFBR.

En conclusion, il convient de retenir que le risque d'arrivée de corps flottants est limité dans de nombreuses configurations de grand réservoir ou lorsque les vitesses de progression des corps flottants sur le réservoir sont faibles (au regard de la durée de la crue notamment). Lorsqu'un tapis de bois flottants est néanmoins bloqué en amont sans toucher la crête du déversoir et à une certaine distance de cette dernière, la capacité d'évacuation de l'eau de l'ouvrage n'est généralement que peu affectée si les corps flottants sont contenus suffisamment en amont, par exemple par le biais de l'avancée des piles.

AUTRES RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [i] ATKINS J. 2018. "1978 Palagnedra Dam Incident in Switzerland". ASDSO
- [ii] BÉNET L. 2019. "Etude de l'effet des bois flottants bloquant un évacuateur de crue." [In French.] B.Sc. thesis, Dept. of Civil Engineering, Haute Ecole d'Ingénierie et d'Architecture de Fribourg.
- [iii] BÉNET L., DE CESARE G., PFISTER M. (2021). Reservoir level rise under extreme driftwood blockage at ogee crest. *Journal of Hydraulic Engineering* 147(1),. Doi:10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001818.
- [iv] BISTER D. 1992. "Sécurité de fonctionnement des évacuateurs de surface vannés ». *La Houille Blanche* No 2/3 1992
- [v] CUBAYNES M., VEDRENNE C. 2016. « Sûreté du barrage de la Raviège lors des travaux de réalisation d'un nouvel évacuateur de crue ». Colloque CFBR : « Sûreté des barrages et enjeux », 23 – 24 novembre 2016.
- [vi] FURLAN P., PFISTER M.; MATOS J., AMADO C., SCHLEISS A.J. (2018). Experimental repetitions and blockage of large stems at ogee crested spillways with piers. *Journal of Hydraulic Research*, 57(2):250-262. ISSN: 0022-1686, doi: 10.1080/00221686.2018.1478897.
- [vii] HASSAN A. 2020. « Handling river floating debris for dam safety – the state of the practice”. Master Thesis. Royal Institute of Tehcnology, Stockholm, Sweden.
- [viii] PFISTER M., SCHLEISS A.J. (2015). Discharge capacity of PK-weirs considering floating wooden debris. ICOLD Congress. Stavanger. Q97-R21
- [ix] PFISTER M., BÉNET L., DE CESARE G., (2020). Effet des bois flottants obstruant un évacuateur de crue dans des conditions extrêmes. *Wasser Energie Luft* 112(2), 77-83.
- [x] STEEB N., LOSEY S., « Bois flottant dans les cours d'eau », OFEV, 2019.
- [xi] STOCKER B., SCHALKO I., LAIS A., BOES R. (2021). Discussion of "Reservoir Level Rise under Extreme Driftwood Blockage at Ogee Crest" by Loïc Bénet, Giovanni De Cesare, and Michael Pfister. *Hydraul. Eng.*, 2021, 147(12): 07021012
- [xii] STOCKER B., LAIS A., BOES R. (2022) Schwemmholz am Mauerüberfall von Talsperren. (Bois flotant sur déversoir de barrage). Laboratoire hydraulique ETH Zurich.
- [xiii] WALKER K., HASENBAL J., MONAHAN S., SPRAGUE N. (2018). Physical model of spillway and reservoir debris interaction. USSD