

PRISE EN COMPTE DES CORPS FLOTTANTS POUR LES ETUDES DE DANGERS

Considering floating debris for dam safety risk analysis

Frédéric LAUGIER, Mélissandre GALLITRE, Julien VERMEULEN, Paul VALLEY

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

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

MOTS CLEFS

Corps flottants, blocage, embâcles, évacuateur de crue

KEY WORDS

Floating debris, blocage, spillway

RÉSUMÉ

Cet article présente la méthode avec laquelle le risque lié aux corps flottants est pris en compte dans les analyses de risques des EDD produites par EDF-CIH. La démarche couvre le traitement global de la problématique depuis la production des corps flottants dans le bassin versant (naturels – bois ou glace, artificiels – pontons, PV flottants, pêcheerie 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.

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 et sont intégrés dans l'approche proposée. Ils incluent notamment des développements réalisés 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 systématiques et de modélisations numériques.

ABSTRACT

The aim of this paper is to describe how the debris are considered in dam safety risk analysis carried out by EDF-CIH. The methodology covers 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

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 and are included in the proposed methodology. They especially include developments lead in the USA (USBR) and Switzerland, based on more or less systematic physical models and numerical models.

1. INTRODUCTION ¹- PROBLEMATIQUE

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).

Plus récemment la rupture partielle du barrage de Rapidan aux USA (juin 2024) a été caractérisé par la présence avérée de nombreux corps flottants obturant les évacuateurs avec un exhaussement de la retenue provoquant un contournement en rive droite et une rupture partielle des ouvrages de rive.

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) Pinet (1982), (b) Rapidan dam (2024)

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 systématiques et de modélisations numériques. 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

¹ Le présent article complète l'article [viii] en y intégrant la manière dont la question des corps flottants est intégrée dans les EDD produites par EDF-CIH.

- [6] 2017 CSB (Comité Suisse des barrages) - Bois flottant aux évacuateurs de crue de barrages
- [7] 2019 OFEN (Office Fédérale de l'Energie, 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.).

Pour les barrages d'altitude, les embâcles de glace formés durant l'hiver (Figure 1c) peuvent couramment subsister jusqu'en début d'été. Ces icebergs résiduels peuvent conserver des tailles importantes (10-20 m) associées à 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 pêcherie 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.



Figure 2 : a) Incident des panneaux PV flottants au barrage de Yamura (2019), (b) pêcheur du barrage de Villefort, (c) Villeneuve sur Lot (2021), (d) La Fous,

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 (ou 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 des 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.

En France métropolitaine, pays très boisé, il sera en général difficile d'exclure la production potentielle de corps flottants lors d'une crue pour les bassins versants d'altitude inférieure à 2 000 m lors de crues exceptionnelles. Pour les bassins d'altitude, c'est en complément, la création d'embâcle de glace durables (jusqu'en Juin typiquement) qu'il ne sera pas possible d'exclure. Finalement, la quasi-totalité des barrages de France métropolitaine sont concernés par la production potentielle de corps flottants sur leur bassin versant.

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 [xi]. 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] [xi] 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.

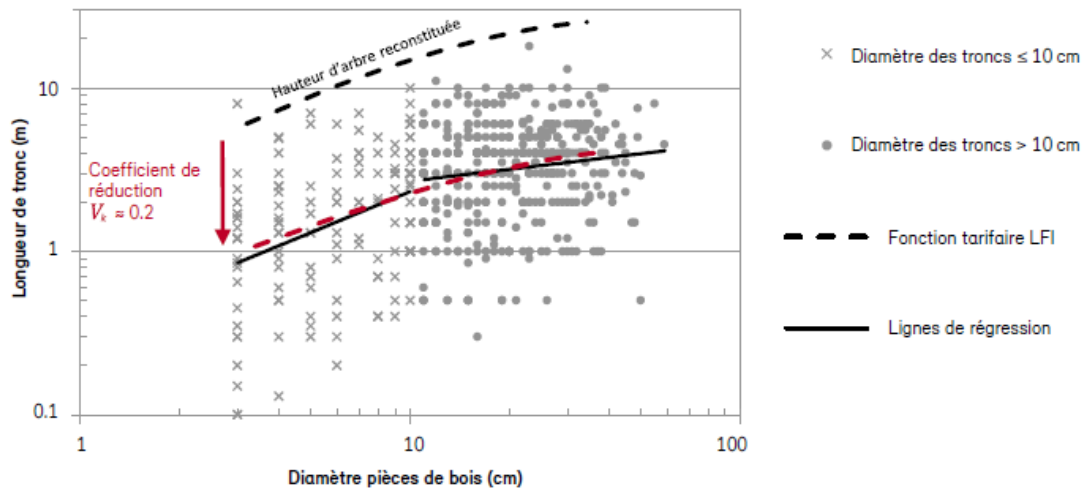


Figure 3 : Rapport entre la longueur des troncs et le diamètre des morceaux de bois flottant déposés lors des crues de 2005 étudié sur 27 sites [6]

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 entraîner 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 appliquées à un tronç flottant, projeté sur l'axe horizontal. L'action du vent sera supérieure à celle de l'eau si $\frac{F_{vent}}{F_{crue}} > 1$. En première approche :

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

Avec : C_x : Coefficient de trainée, 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 $\frac{v_{vent}}{v_{crue}} > 10^{3/2}$, 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 $v_{crue} = 0.04 \text{ m/s}$ 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'événements passés.

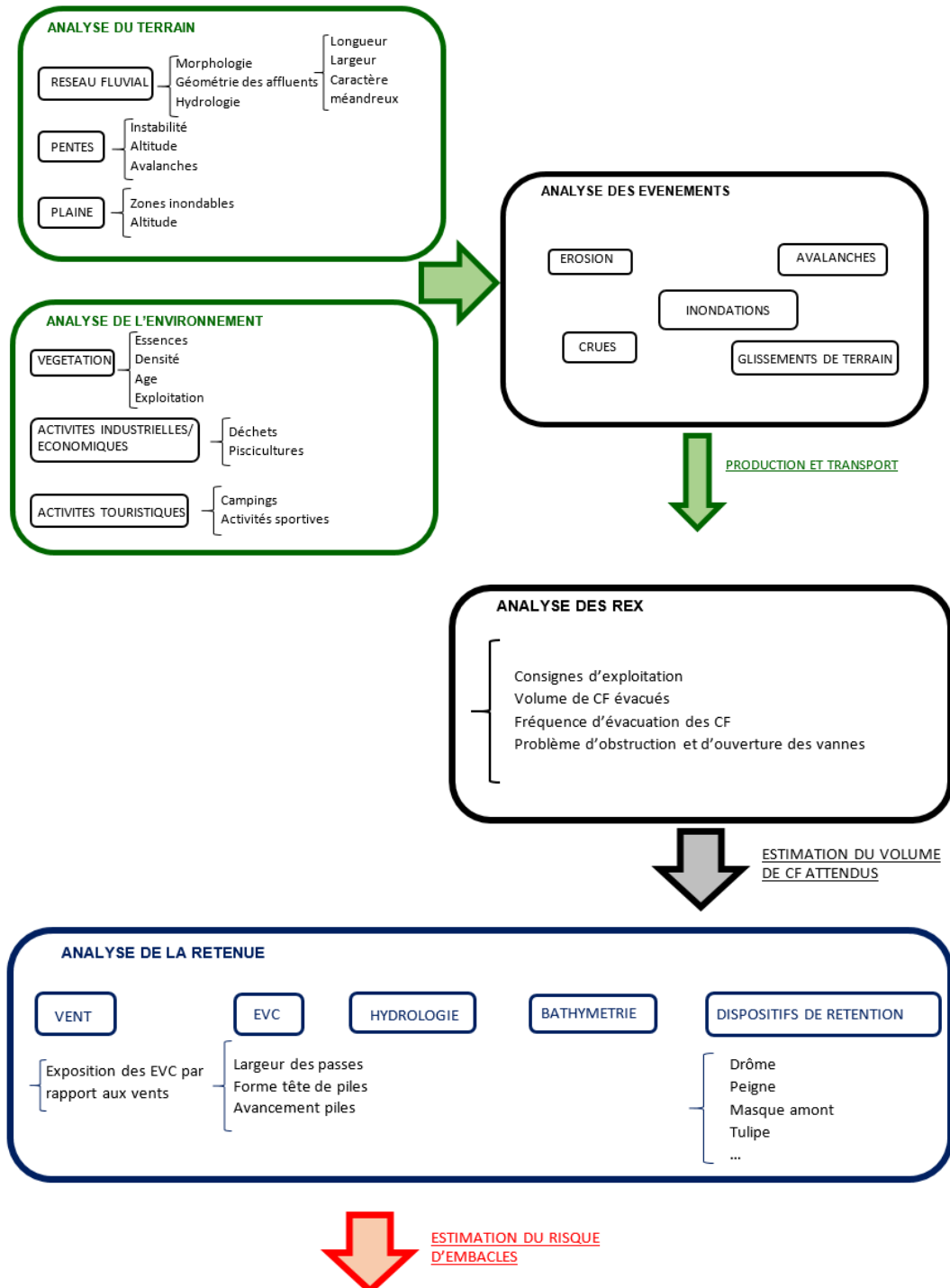


Figure 5 : Logigramme (1/2) d'analyse du risque de production, transport et blocage des corps flottants

4. ENDOMMAGEMENT, BLOCAGE 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 limitée à l'époque des faits, de l'ordre de 5-6 m pour autant de haut.

D'autres cas de blocages ou dysfonctionnements partiels dus 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, caractéristiques de la rivière et des écoulements etc.). Pour des barrages mobiles en rivières ou des ouvrages pour lesquels 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 étudiée 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 suggestions 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, selon 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].

- **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 6).

Ce résultat est remarquable et très intéressant dans la mesure où il est applicable pour un grand nombre de barrages qui respectent ce critère.

Il montre que dans certaines conditions, les piles jouent le même rôle qu'un râtelier / masque amont anti-embâcles, à savoir maintenir les bois en amont des passes et préserver une section hydraulique de passage. Il pourra alors être plus simple de prolonger les nez de pile que d'installer un masque amont qui peut être complexe et coûteux à concevoir et installer.

Notons que l'article [xii] 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 troncs individuels 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).

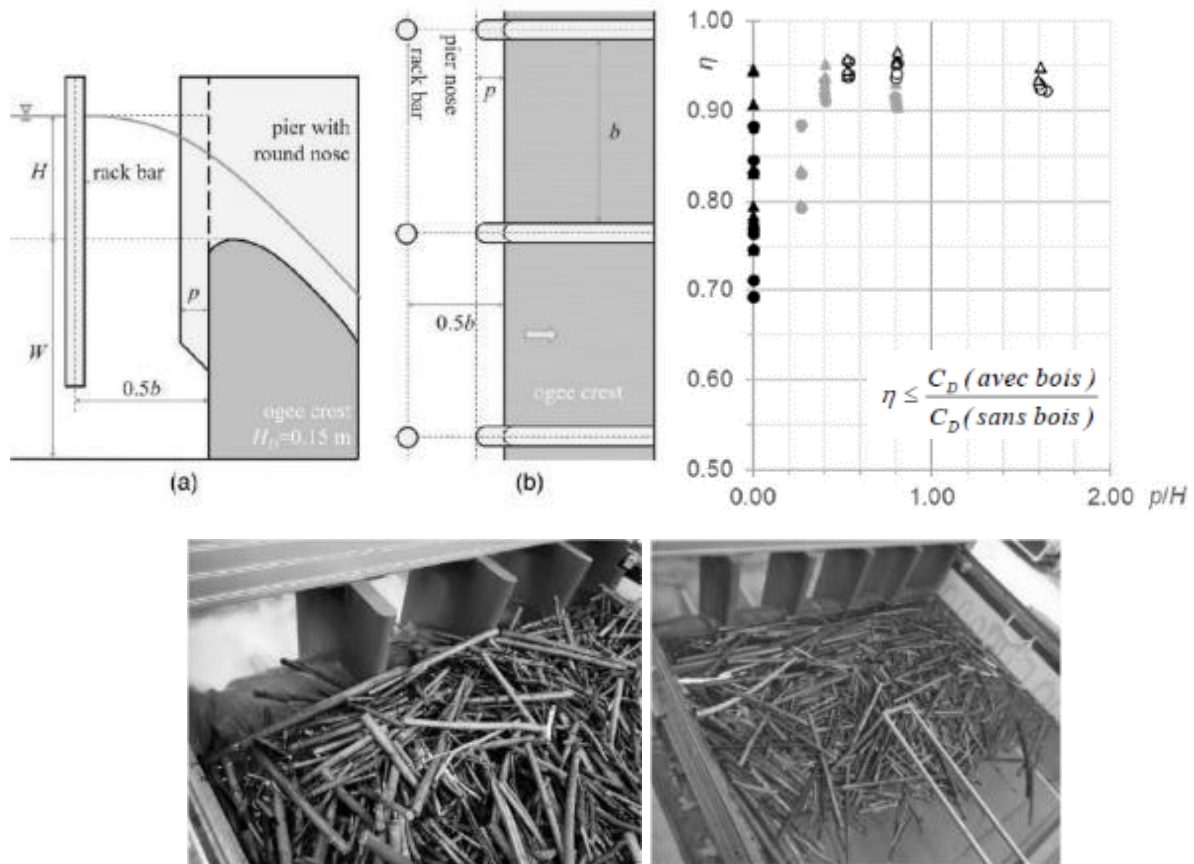


Figure 6 : Influence de l'avancée de piles, extrait de [7]

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.

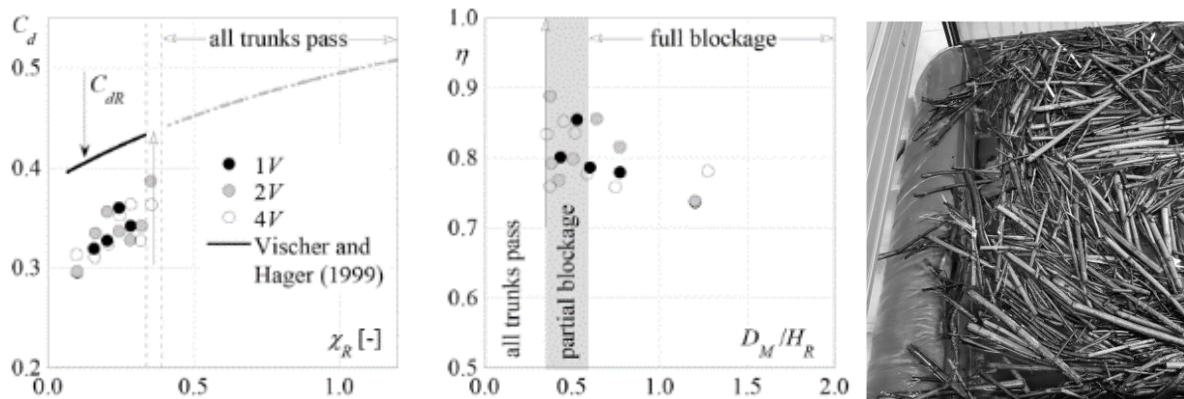


Figure 7 : Influence des corps flottants sur un seuil libre, extrait de [iii]

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

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

Deux types d'expériences 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

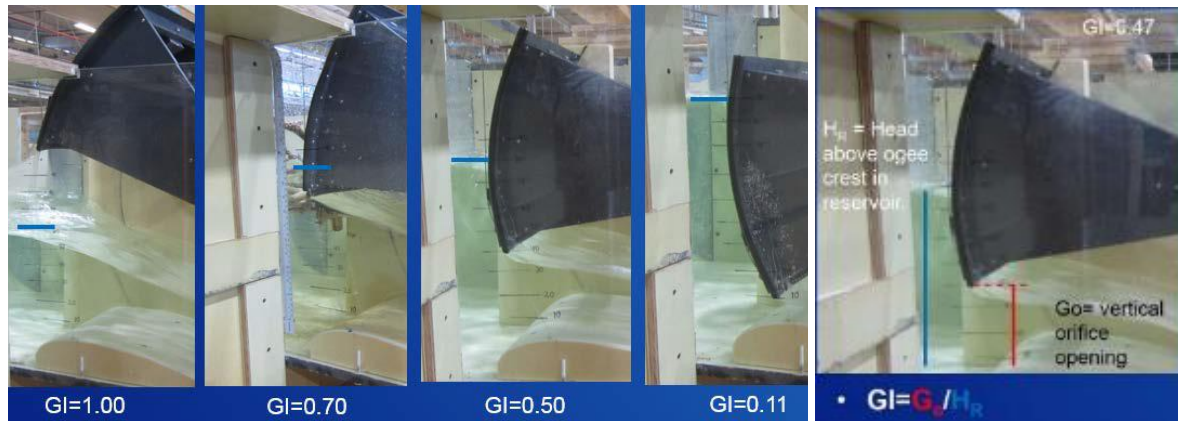


Figure 8 : Illustration du gate Index, extrait de [iii]

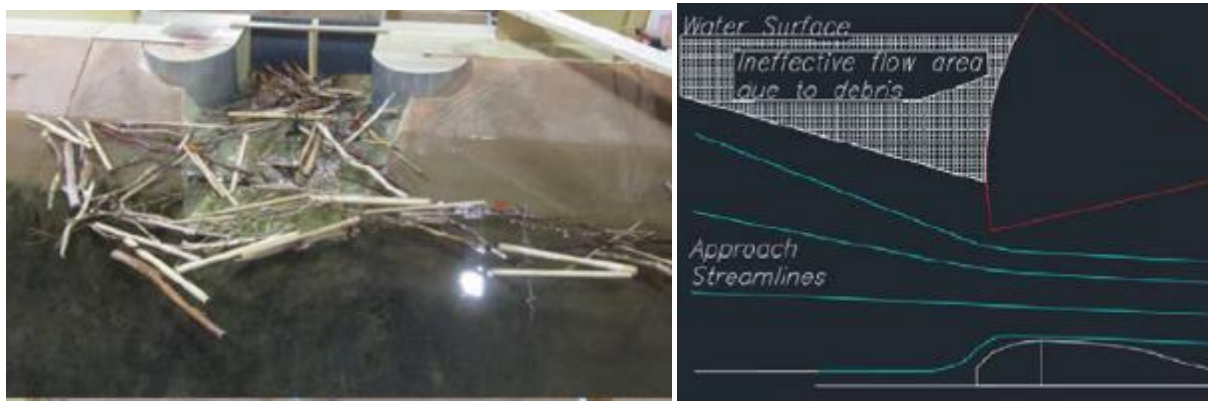


Figure 9 : a) Modèle physique, b) Réduction de contraction due à la présence du tapis flottant [iii]

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 [xiii]). 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 9).

La Figure 10 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, voire positifs. Il s'agit de configurations avec de faibles Gate Index et des écoulements qui se rapprochent d'organes de demi-fond. La Figure 9b 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.

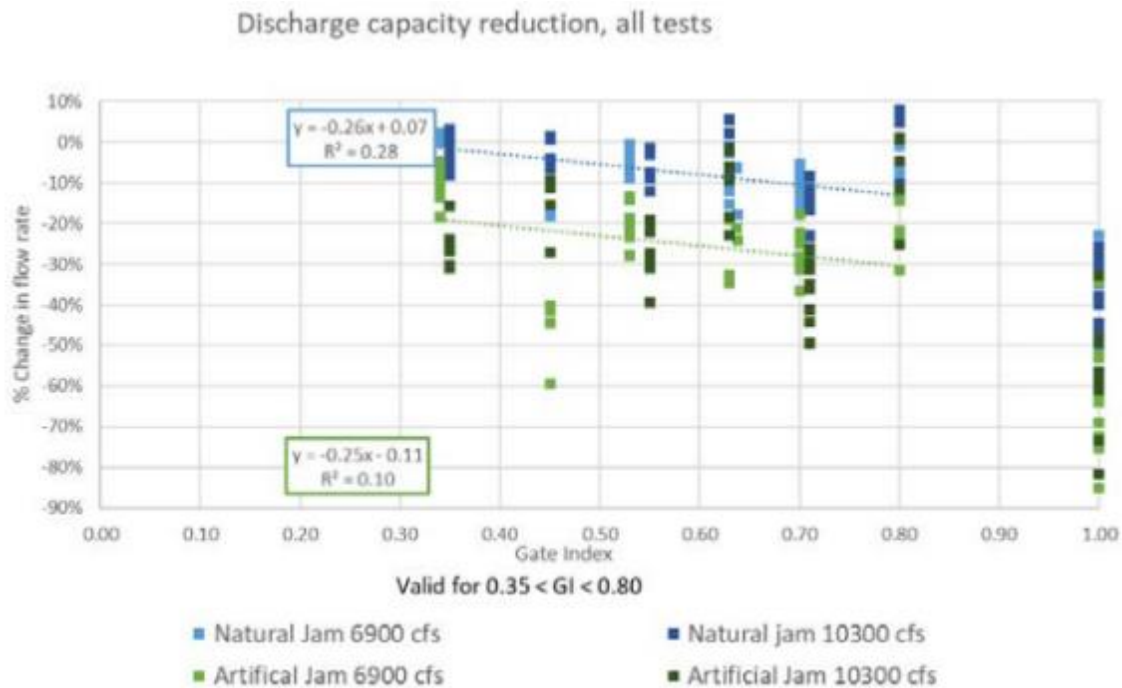


Figure 10 : Perte de débitance en fonction de Go, extrait de Walker et al. (2018) [iii]

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 (avec toute la prudence et les réserves inhérentes à l'usage des modèles numériques). 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 étudié mesurent 7 m de large x 11,5 m de 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.

Un tapis flottant totalement étanche (approche conservative avec une porosité nulle – Aucun débit ne passe à travers le tapis modélisé) est modélisé sous la forme d'un parallélépipède (Figure 11). Des études de sensibilité ont été menées pour analyser l'influence des caractéristiques géométriques du tapis : la profondeur (de 3 à 8 m correspondant à l'empilement des corps flottants en amont de l'évacuateur) 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.

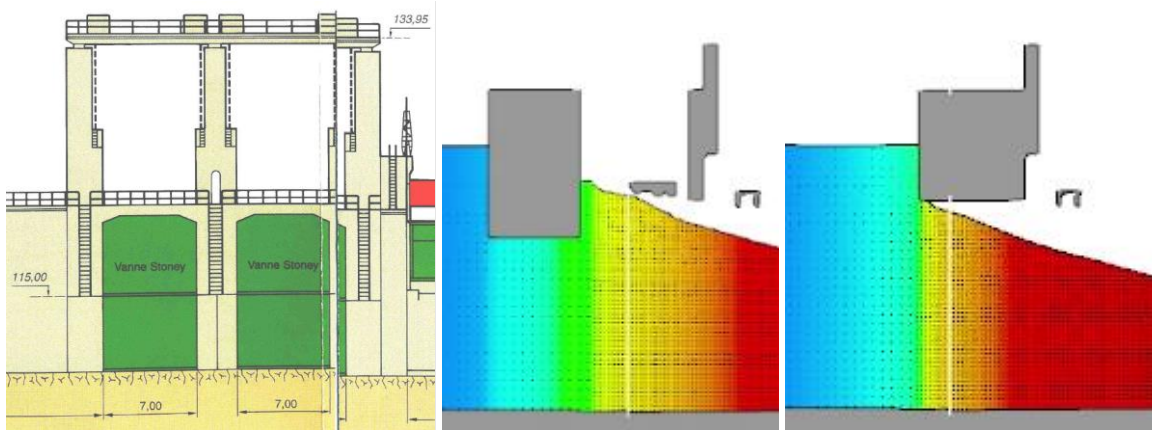


Figure 11 : Modélisation numérique 3d de grandes vannes plates sur fond plat a) élévation, b) embâcles de 5 mh x 5 ml contre les piles, c) embâcles de 3 mh x 5 ml contre la vanne

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 de 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 13 ci-après indique la sensibilité de la perte de débitance selon les caractéristiques géométriques adimensionnalisées (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.

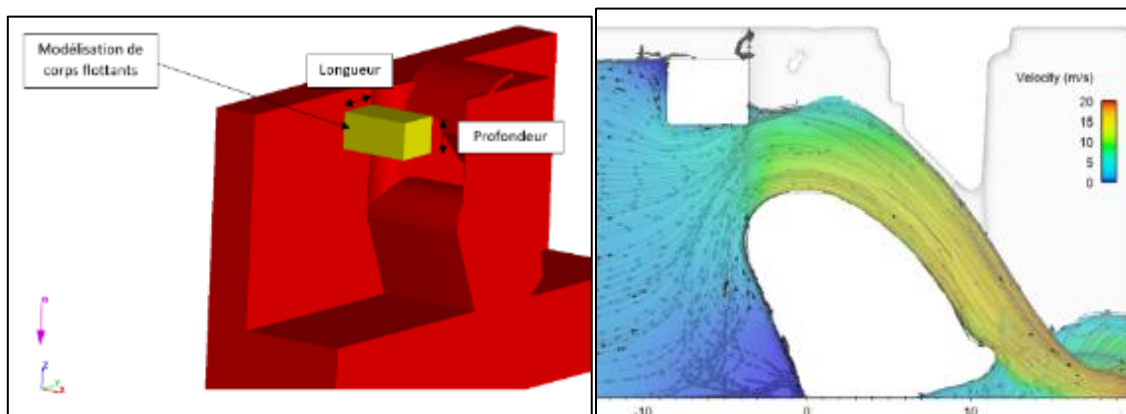


Figure 12 : Modélisation numérique 3D de vanne segment 8,5ml x 8,5 mh sur seuil profilé a) modèle, b) tapis de 3 mh x 5ml

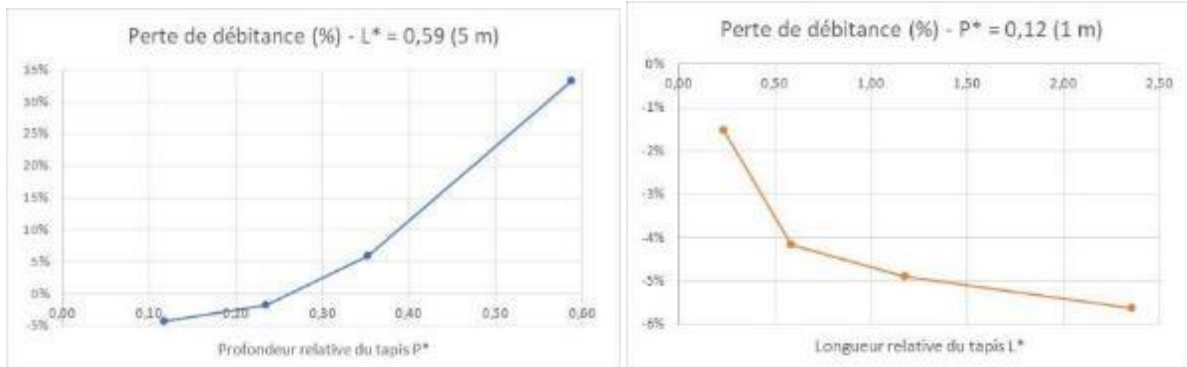


Figure 13 : Sensibilité de la perte de débitance selon la profondeur P^* ou la longueur relative L^* du tapis de corps flottants

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 14a) 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 14b). 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 14 : 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 15), 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 15 : Exemple d'accumulation de corps flottants par les effets des vagues et du vent

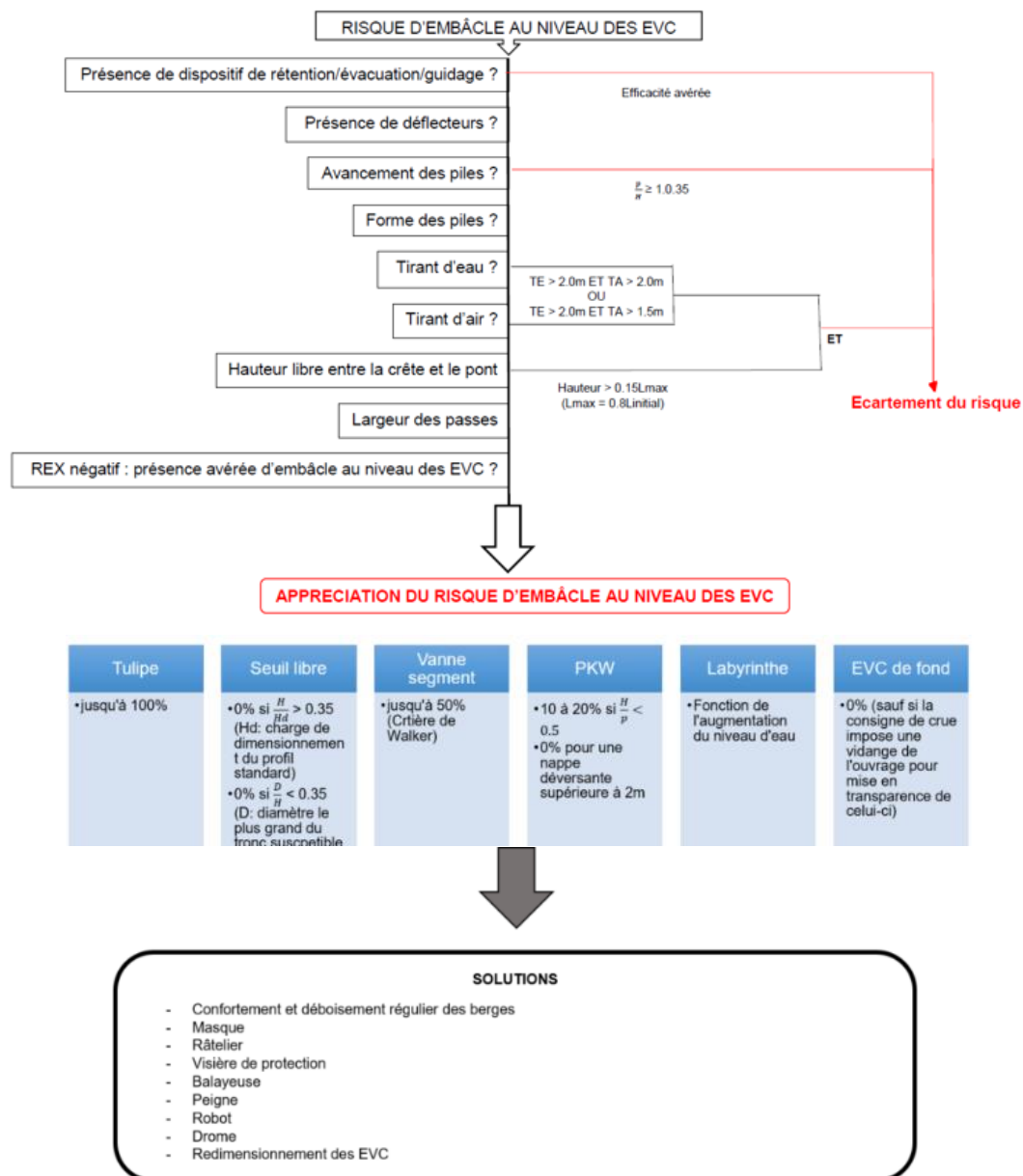


Figure 16 : Logigramme (2/2) d'analyse du risque corps flottant au niveau des évacuateurs de crue et solutions de mitigation

5. COMPARAISON AVEC LE LOGIGRAMME CFBR 2013

Le guide CFBR 2013 [5] sur les évacuateurs de crue propose un logigramme pour estimer l'impact des corps flottants sur les évacuateurs de crue d'un barrage. Comme déjà indiqué, l'estimation du risque est faite de manière conservatrice et très simplifiée sur la base de quelques ratios élémentaires et sans véritable analyse naturaliste. Par ailleurs, en cas de risque avéré, l'abattement de débitance retenue est forfaitaire, identique dans toutes les situations et vaut 30 %.

L'application de la méthodologie du guide CFBR 2013 [5] sur une centaine de barrages EDF depuis 2019 amènerait à retenir le risque corps flottant pour environ 60 % des barrages, et un abattement de débitance forfaitaire de 30 %.

- Pour ces barrages, pour un peu plus de 50 % 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, généralement comprise entre 10 et 20 %.

A contrario :

- Pour environ 10 % des barrages, le guide CFBR n'amènerait pas à retenir d'abattement alors que la méthodologie EDF-CIH aura proposé de retenir un abattement de débitance.
- Dans certains cas particuliers, (évacuateur de crue en tulipe par exemple), l'abattement de débitance retenu par EDF-CIH a été supérieur à l'abattement forfaitaire de 30 %.

6. INTEGRATION DU RISQUE « CORPS FLOTTANT » DANS LES EDD

6.1. Analyse par un groupe de travail

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 lesquels s'appuyer peuvent largement varier. Dans certains cas, des modélisations numériques 3D pourront être requises avec un coût d'ingénierie non négligeable.

L'impact des corps flottants sur la débitance peut être important sur la débitance des évacuateurs de crue. Les recommandations CFBR [5] indiquent une valeur forfaitaire de 30 %. Pour un barrage donné, cet impact est très important et correspond approximativement à une décade de temps de retour en hydrologie. La sensibilité de cette analyse impacte donc directement, et de manière sensible, les résultats de l'analyse de risque de l'EDD et le jugement du niveau de sûreté du barrage.

Afin de limiter autant que possible les biais cognitifs et la subjectivité des jugements individuels, EDF-CIH procède à l'évaluation du risque corps flottants par un travail collectif en groupe de travail afin de converger sur une analyse collégiale. Trois membres permanents assurent la continuité et la cohérence des analyses. Ce groupe de travail inclut plusieurs contributeurs du groupe de travail de l'EDD dont les contributeurs hydrauliques et génie civil ainsi que l'exploitant du barrage.

La séance du GT « Woodstock » est préparée plusieurs semaines / mois en amont par le spécialiste hydraulique du GT EDD en suivant les logiques présentées précédemment : Inspection du site et du bassin versant, échanges avec l'exploitant pour la collecte du REX et des sujétions liés aux corps flottants. Une première ébauche de rapport est produite avec quelques calculs analytiques simplifiés issus de la bibliographie présentée précédemment. Ces rapports suivent une trame relativement standardisée afin d'assurer la cohérence de traitement des barrages. Sur cette base, le GT « Woodstock » se réunit une première fois. Il arrive parfois que le

GT ne soit pas conclusif : des analyses complémentaires peuvent être décidées à l'issu desquelles le GT se réunit une seconde fois. En général, deux itérations suffisent.

Le résultat de ces GT « Woodstock » se trouve sur le chemin critique de la réalisation des EDD, leur conclusion étant nécessaire à la détermination des cotes atteintes en crue (cf § suivant). Ils sont réalisés le plus en amont possible de l'EDD (si possible au moins 18 mois avant la remise de l'EDD).

6.2. Prise en compte dans l'EDD

- **Cas général : Abattement de débitance permanent pour le calcul des cotes atteintes**

Une manière d'intégrer le risque corps flottant dans les analyses de risque serait de probabiliser le risque de blocage.

Cette option n'a pas été retenue. En effet, à partir du moment où un seul corps flottant se bloque devant un évacuateur, les corps qui suivent viennent rapidement s'accumuler derrière et créer un tapis enchevêtré qui n'a que peu de chance de se débloquer. Ce type de constat a bien été mis en évidence par les travaux de thèse de Furlan [vi].

Dans ces conditions, le risque corps flottant, évalué par le groupe de travail dédié, propose un abattement qui sera, de manière conservative appliqué dans toutes les situations de crue, quel que soit le temps de retour de la crue.

Dans certains cas, cet abattement pourra cependant dépendre de la cote de la retenue :

- Par exemple, pour un seuil libre, l'abattement pourra être fixé autour de 20 % pour les faibles charges hydrauliques pour descendre à 0 % dès qu'une charge suffisante (cf §4.2 - $D_M / H_R < 0,35$ selon Pfister et Benet) permet d'évacuer naturellement les corps flottants par-dessus le seuil (cf. travaux de Pfister et Benet [x]). L'impact sur les côtes atteintes dépend alors des capacités de laminage du barrage. Un barrage ne laminant pas sera très peu affecté en termes de cote maximale atteinte (la cote maximale atteinte est indépendante de ce qui se passe "avant" le pic. Il n'y a pas d'amortissement du pic de crue par la retenue).
- L'abattement pourra également être pondéré pour les cotes très hautes lorsqu'il y a risque de mise en charge de l'écoulement sous un pont ou un couteau de vanne, par exemple en valorisant les travaux de Walker [xiv] ou à travers des modélisations 3D.

- **Cas particulier : Probabilisation du risque corps flottant**

Dans certains cas particuliers, le risque lié aux corps flottants a été probabilisé par l'introduction d'un événement initiateur spécifique. Cela a été le cas pour des configurations où les corps flottants sont des agresseurs « physiques » d'organes mécaniques (vannes) et pourraient les endommager voire mener à leur rupture, ou bloquer des mécanismes ou chaînes cinématiques.

- Choc d'un tronc d'arbre contre un bras de vanne.
- Coincement de corps flottant dans des mécanismes fragiles.
- Choc de barges ou péniches contre des portes d'écluses.
- Evacuateurs spécifiques type siphon.

Ces cas restent cependant limités dans les EDD produites par EDF-CIH depuis 2019.

7. MESURES DE REDUCTION DE RISQUE

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 :
 - 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.
 - 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'incidents 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 17b) 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 :
 - La débitance des évacuateurs « en eau claire » sera améliorée par diminution des effets de contraction latérale.
 - En cas de blocage des corps flottants, la perte de débitance pourra être très limitée selon le ratio d'avancement des piles comme indiqué au §4.2.

Un reprofilage des piles avec des formes hydrauliques plus appropriées peut également favoriser le passage des corps flottants.



Figure 17 : Exemple de système de rétention a) peigne, b) masque amont (râtelier ou « visor »)

- 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 implantées au barrage de Palagnedra [i] (seuil libre élargi) ou au barrage EDF de Pinet [iv] (installation de clapets de 40 m de large).

8. CONCLUSION

L'analyse du risque lié aux corps flottants pour les barrages est un sujet complexe, multi-métiers, empreint d'incertitudes, et pour lequel l'état de l'art n'est pas encore établi. Plusieurs thèmes sont encore dans le domaine de la R&D et les méthodologies établies d'ingénierie n'existent pas réellement. Le présent article propose une méthodologie pour l'évaluation des risques associés aux corps flottants dans le cadre des EDD de barrage.

Il convient de retenir que le risque production de corps flottant dans les bassins versant de France métropolitaine est probable pour la plupart des barrages quelle que soit leur altitude (bois, glace etc...). En revanche, la probabilité d'arrivée de corps flottants au droit du barrage, est limitée 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). Le retour d'expérience montre que les évacuateurs de crue avec des dimensions suffisamment importantes (une dizaine de mètres) avec un tirant d'eau et d'air confortables permettent généralement d'évacuer les corps flottants arrivant de manière isolée au barrage.

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. En cas de risque avéré, des solutions de mitigation sont possibles parmi lesquelles on retiendra l'allongement des piles des évacuateurs, la mise en place de peigne en amont des ouvrages, ou de structures de rétention (type masque amont ou « visor » fixés sur les piles des évacuateurs). Ces options seront en général plus économiques que celle consistant à modifier la géométrie des évacuateurs (largeur, tirant d'eau etc..).

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 Ravière 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 Technology, Stockholm, Sweden.
- [viii] LAUGIER, VERMEULEN, VALLEY, GALLITRE. (2024). BLOCAGE DES EVACUATEURS DE CRUE PAR LES CORPS FLOTTANTS.debris. CFBR. Colloque « Barrages, digues et canaux : enjeux, pratiques récentes et innovations pour les organes de vannerie, contrôle-commande, télécom et alimentations électriques »
- [ix] PFISTER M., SCHLEISS A.J. (2015). Discharge capacity of PK-weirs considering floating wooden debris. ICOLD Congress. Stavanger. Q97-R21
- [x] 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.
- [xi] STEEB N., LOSEY S., « Bois flottant dans les cours d'eau », OFEV, 2019.

- [xii] STOCKER B., SCHALKO I., LAIS A., BOES R. (2021). Discussion of “Reservoir Level Rise under Extreme Driftwood Blockage at Ogee Crest” by Loïc Bénét, Giovanni De Cesare, and Michael Pfister]. Hydraul. Eng., 2021, 147(12): 07021012
- [xiii] STOCKER B., LAIS A., BOES R. (2022) Schwemmholz am Mauerüberfall von Talsperren. (Bois flottant sur déversoir de barrage). Laboratoire hydraulique ETH Zurich.
- [xiv] WALKER K., HASENBAL J., MONAHAN S., SPRAGUE N. (2018). Physical model of spillway and reservoir debris interaction. USSD