



Haute école d'ingénierie et d'architecture Fribourg
Hochschule für Technik und Architektur Freiburg

Hes·so

Haute Ecole Spécialisée
de Suisse occidentale
Fachhochschule Westschweiz

Programme interdisciplinaire du domaine I&A, HES-SO

Des cours d'eau écologiques et des barrages sûrs : le cas des bois flottants (Projet Eco-barrages)

Le râtelier partiel sur un évacuateur de crue équipé d'un déversoir standard et de piliers

Fribourg, le 31 aout 2021

Haute école d'ingénierie et d'architecture de Fribourg HEIA-FR

Institut des Technologies de l'Environnement Construit iTEC & Filière Génie Civil

Bd de Pérolles 80, CH-1705 Fribourg

Prof. Dr. Michael Pfister, michael.pfister@hefr.ch

Loïc Bénet, loic.benet@hefr.ch

RÉSUMÉ

Les cours d'eau sont des éléments vitaux de notre paysage, jouant un rôle clé dans la connectivité des divers écosystèmes. La conservation d'un environnement intact est souvent en conflit avec les besoins de l'Homme. Ce projet se concentre sur un tel conflit, dans le cadre des bois flottant dans les rivières :

- Les bois flottants sont essentiels à la diversité des habitats aquatiques. Ils contribuent à la survie et au développement des biotopes aquatiques dans leurs ensembles. Ils offrent des zones de protection et de repos et fournissent de la nourriture aux invertébrés. Un cours d'eau sans bois flottants est monotone et la biodiversité est appauvrie. L'apport naturel de bois flottants est majoritairement perturbé par la présence d'ouvrages de protection contre les crues ou d'aménagement hydrauliques dans les cours d'eau.
- Les évacuateurs de crue des barrages doivent garantir une capacité de débit en cas de crue extrême. Les bois flottants peuvent induire des obstructions dangereuses aux évacuateurs pendant des crues et limiter leurs fonctionnalités et leurs capacités de décharge. Les blocages peuvent augmenter le niveau de la retenue et ainsi l'ampleur d'une submersion.

Sur la base de l'expérience acquise lors d'une première phase (Pfister et al. 2019 et Bénet et al. 2021), ce présent projet étudie un râtelier partiel (une barre devant chaque deuxième pilier) décalé vers l'amont de l'évacuateur de crue permettant d'atteindre les deux objectifs, à savoir, assurer le fonctionnement de l'évacuateur de crue tout en maintenant le passage partiel des bois flottants. Plus de 570 essais sur modèle physique ont été réalisés pour valider les performances du nouveau râtelier. Les interactions des corps flottants avec une structure mènent à des observations complexes, un phénomène typique. Des observations générales ont été établies :

- Pour une *faible apparition de bois flottants* (troncs individuels et très petit groupe), le râtelier partiel donne des résultats prometteurs pour les deux aspects étudiés. Il aide les troncs à s'orienter et à franchir le déversoir (facteur 1.5 à 2, selon configuration), comparé à une situation sans râtelier. La capacité hydraulique de l'évacuateur de crue est maintenue typiquement supérieure à environ 90% (moyenne aux alentours de 94%), comparé à 88% sans râtelier partiel. La valeur écologique des bois flottants est appréciée car ils sont conservés majoritairement dans le cours d'eau.
- Pour une *moyenne apparition de bois flottants* (« grand tas » de 30 troncs), le râtelier étudié répond de manière moindre aux besoins. La capacité hydraulique résiduelle est en typiquement supérieure à 87% (moyenne aux alentours de 90%), comparé à 79% sans râtelier. Les bois flottants franchissent difficilement l'évacuateur de crue. Ils restent majoritairement (74 à 82%) appuyés contre le râtelier.
- Pour une *extrême apparition de bois flottants*, le râtelier remplit le critère du maintien de la capacité hydraulique, qui suit typiquement aux alentours de 95%, comparé à 84% sans râtelier. Les bois flottants sont en trop grand nombre instantanément au râtelier pour pouvoir s'orienter librement. Les troncs restent donc bloqués au râtelier. L'évacuateur de crue est donc libre de troncs et l'écoulement n'est pas perturbé.
- Des largeurs de passes « grandes » (p.ex. $b/L_M > 0.8$) favorisent, de manière générale, le passage des troncs, en opposition aux passes « étroites » de $0.40 < b/L_M < 0.77$ testées ici.
- Des grands débits (débit de dimensionnement compris) favorisent le mouvement des troncs (individuels ou par petits groupes) comparé à des plus faibles débits. La gamme de débits testés est comprise de $0.33 < \chi < 1$.

- Le positionnement du râtelier partiel en amont de l'évacuateur de crue joue un rôle important pour remplir les deux objectifs cités dans l'introduction. Les valeurs recommandées sont les suivantes : Position 1 ou 2 (équation 1 et 2), en respectant $0.35 < a/H_R < 4$.

La mise en place d'un râtelier partiel en amont couplé avec un prolongement de la tête de piliers dans le réservoir est recommandée pour les situations suivantes :

- Si la capacité hydraulique est cruciale et doit absolument être maintenue. La capacité hydraulique de la combinaison du râtelier et du surplomb est quasiment non-perturbée (aux alentours de $\eta \approx 0.97$ pour des débits très élevés).
- L'installation d'un râtelier partiel (avec une distance de $0.35 < a/H_R < 4$ au déversoir) permet de faire passer majoritairement les bois flottants qui arrivent individuellement ou en très petit groupe (apparition faible, « uncongested » ou « semi-congested »).

Si les conditions permettent une certaine réduction de la capacité hydraulique (p.ex. à $\eta \approx 0.85$), le passage supplémentaire des bois peut être envisagé à l'aide d'un râtelier partiel (sans surplomb des piliers). La capacité résiduelle avec des bois est (en moyenne par géométrie et gamme de débits) aux alentours de $\eta = 0.87$ à 0.98 . La probabilité de blocage baisse significativement pour des faibles apparitions des bois. Pour d'autres apparitions, elle ne change pas significativement.

Chaque cas d'évacuateur de crue est différent (arrivée des bois flottants, gestion de la retenue et arrangement). Si l'apparition de bois flottants représente un risque potentiel, la situation doit être analysée de manière approfondie et individuelle. Les résultats de ce rapport décrivent le fonctionnement du râtelier partiel sur la base de connaissance générales.

TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION	7
2	ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	8
2.1	LES BOIS MORTS DANS LES COURS D'EAU	8
2.1.1	<i>Caractérisation des bois</i>	8
2.1.2	<i>Valeur écologique</i>	9
2.1.3	<i>Potentiel de danger</i>	10
2.1.4	<i>Arrivée</i>	11
2.2	RÉTENTION DES BOIS AUX BARRAGES	12
2.2.1	<i>Blocage de bois flottants</i>	12
2.2.2	<i>Probabilité de blocage</i>	13
2.2.3	<i>Conséquence des blocages</i>	14
2.2.4	<i>Mesures d'atténuation</i>	16
2.3	PASSAGE DES BOIS AUX BARRAGES	16
2.3.1	<i>Section de passage</i>	16
2.3.2	<i>Pilier individuel</i>	17
2.3.3	<i>Pilier avec ailettes</i>	18
2.4	QUESTIONS DE RECHERCHE	19
3	MÉTHODE.....	21
3.1	MODÈLE RÉDUIT	21
3.1.1	<i>Installations</i>	21
3.1.2	<i>Validation</i>	25
3.1.3	<i>Effets de modèle</i>	26
3.1.4	<i>Effets d'échelle</i>	27
3.2	BOIS FLOTTANTS.....	28
3.3	MÉTHODOLOGIE.....	31
3.3.1	<i>Variation des paramètres</i>	31
3.3.2	<i>Programme de tests</i>	35
4	RÉSULTATS	41
4.1	FAIBLE APPARITION DE BOIS FLOTTANT.....	41
4.1.1	<i>Râtelier partiel distant (Position 1)</i>	44
4.1.2	<i>Râtelier partiel intermédiaire et proche (Positions 2 et 3)</i>	46
4.1.3	<i>Sans râtelier (Position 4)</i>	47
4.2	MOYENNE APPARITION DE BOIS FLOTTANT	49
4.2.1	<i>Râtelier partiel distant (Position 1)</i>	50
4.2.2	<i>Râtelier partiel intermédiaire (Position 2)</i>	52
4.2.3	<i>Râtelier partiel proche (Position 3)</i>	54
4.2.4	<i>Sans râtelier (Position 4)</i>	56
4.3	EXTRÊME APPARITION DE BOIS FLOTTANT.....	58
4.3.1	<i>Râtelier partiel distant (Position 1)</i>	59
4.3.2	<i>Râtelier partiel proche (Position 3)</i>	60
4.3.3	<i>Sans râtelier (Position 4)</i>	60
4.4	PERFORMANCE TRANSVERSALE DU RÂTELIER PARTIEL	61
4.4.1	<i>Faible apparition de bois flottants</i>	61
4.4.2	<i>Moyenne apparition de bois flottants</i>	63
4.4.3	<i>Extrême apparition de bois flottants</i>	65
4.4.4	<i>Discussion</i>	67

4.5	RÂTELIER PARTIEL COMBINÉ AVEC SURPLOMB DES PILIERS	68
4.5.1	<i>Faible apparition de bois flottants</i>	68
4.5.2	<i>Moyenne apparition de bois flottants</i>	69
4.5.3	<i>Extrême apparition de bois flottants</i>	69
4.5.4	<i>Discussion</i>	70
5	RECOMMANDATION	75
5.1	EFFICACITÉ HYDRAULIQUE DU DÉVERSOIR.....	75
5.1.1	<i>Observations</i>	75
5.1.2	<i>Recommandation</i>	76
5.2	PROBABILITÉ DE BLOCAGE.....	78
5.2.1	<i>Observations</i>	78
5.2.2	<i>Recommandation</i>	79
6	CONCLUSIONS	81
6.1	CONTEXTE.....	81
6.2	MODÈLE PHYSIQUE	81
6.3	PARAMÈTRE-CLÉ ÉTUDIÉ	82
6.4	FAIBLE APPARITION DE BOIS FLOTTANTS (RÂTELIER PARTIEL, SANS SURPLOMB).....	82
6.5	MOYENNE APPARITION DE BOIS FLOTTANTS (RÂTELIER PARTIEL, SANS SURPLOMB).....	83
6.6	EXTRÊME APPARITION DE BOIS FLOTTANTS (RÂTELIER PARTIEL, SANS SURPLOMB).....	83
6.7	COMBINAISON DE RÂTELIER PARTIEL ET SURPLOMB DES PILIERS.....	84
6.8	RECOMMANDATION	85
7	NOTATION	87
8	RÉFÉRENCES	88

1 INTRODUCTION

La HES-SO a retenu le projet « Eco-barrages - Des cours d'eau écologiques et des barrages sûrs : le cas des bois flottants » qui a été soumis par le premier auteur de ce rapport dans le contexte de l'appel extraordinaire du programme interdisciplinaire de la HES-SO en 2019. Le soutien financier du projet a été confirmé le 24.02.2020, et les travaux ont rapidement démarrés.

Ce projet représente une deuxième étape d'étude du comportement des bois flottants qui potentiellement obstruent l'entrée de l'évacuateur de crue d'un barrage. Une première étape a été financée par l'Office fédéral de l'énergie OFEN (Recherche énergétique et cleantech, Pfister et al. 2019, Bénét et al. 2021). Elle se concentrait sur l'effet des bois flottants bloquant un évacuateur de crue sous des conditions extrêmes. Ces conditions extrêmes regroupaient simultanément des scénarios défavorables : des passes étroites, le débit de crue et une apparition de bois flottants extrême. L'obstruction extrême qui se produisait à l'entrée de l'évacuateur de crue a été documentée, particulièrement la surélévation du niveau d'eau dans le réservoir comme suite de l'obstruction. Ladite peut être dangereuse pour le barrage, comme le cas de Palagnedra en Suisse le démontre (Bruschin et al. 1981).

Une étude sur modèle réduit a été effectuée en collaboration avec la PL-LCH (Dr. Giovanni De Cesare) de l'EPFL lors de la première étape. Mise à part l'étude de cas sans contre-mesures, trois approches constructives ont été présentées afin de réduire ou éliminer l'effet négatif des bois flottants sur la courbe de tarage. Cela fonctionnait de manière satisfaisante en ce qui concerne le maintien de la capacité de déversement à l'entrée de l'évacuateur de crue. Néanmoins, tous les bois flottants ont été retenus en amont de l'évacuateur de crue, et doivent ainsi obligatoirement être enlevés du cours d'eau après une crue. En conséquence, ils sont perdus comme élément écologique clé du cours d'eau.

Cette présente deuxième étape a comme but de maintenir la sécurité contre une surélévation de la retenue (qui a été développé lors de la première étape), mais de garder – dans la mesure du possible – les bois flottants dans la rivière (au lieu de les enlever). L'enjeu clé est de développer un râtelier spécifique à monter au déversoir, qui aide les bois flottants à passer le déversoir sans provoquer une surélévation significative du niveau du réservoir. Dans ce cas, les deux problèmes majeurs seront résolus : Le niveau de la retenue est quasiment conservé et une partie des bois flottants restent dans le cours d'eau.

L'élément développé et testé dans le cadre cette deuxième étape est un râtelier « partiel » installé suffisamment en amont du déversoir. Au cours de la première étape, ce râtelier a été préliminairement testé et a indiqué un comportement prometteur. Il motivait les bois flottants à s'orienter lors de leur approche du barrage, de manière à ce qu'ils passent éventuellement le déversoir et peuvent ainsi rester dans la rivière. La forme précise et l'efficacité de ce râtelier partiel est testé dans le même modèle physique à l'EPFL utilisé pour la première étape. Des grands et petits tas de bois flottants sont fournis et leur comportement est observé pour des distances différentes du râtelier au déversoir. Le passage des bois flottants et une éventuelle surélévation ont été documentés, afin de déterminer entre autres la position du râtelier idéale. Le présent rapport décrit ce contexte, les essais et notre interprétation.

L'Office fédéral de l'énergie cofinance la présente deuxième étape, ainsi qu'une future troisième étape.

2 ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

2.1 LES BOIS MORTS DANS LES COURS D'EAU

2.1.1 Caractérisation des bois

Des bois flottants appelés « grands » ont été définis comme des troncs d'une longueur supérieure à 1.00 m et d'un diamètre supérieur à 0.10 m (Braudrick et al., 1997, Ruiz-Villanueva et al., 2016 et Wohl et al., 2016).

Selon Rickli et Hess (2009), le bois flottant est apporté dans le secteur d'écoulement d'un cours d'eau par les processus d'érosion des berges, glissements (Figure 1), coulées de boue de versant, avalanches, chablis, pression de la neige et glissements du manteaux neigeux. La quantité totale de bois flottants potentiellement mobilisable se compose de différents « potentiels partiels » : (1) bois dans le secteur d'écoulement (mobilisé avec une grande probabilité lors d'un événement de crue), (2) arbres vivants à proximité directe du secteur d'écoulement et des berges (notamment en cas de forte érosion des berges) et (3) bois arrivant par différents processus dans le secteur d'écoulement d'un cours d'eau. L'apport du bois et son transport dans le chenal d'un cours d'eau se déroulent temporellement souvent de façon indépendante.



Figure 1. Apport du bois dans le chenal d'un torrent par l'érosion et des glissements de berge (Rickli et Hess 2009).

La taille et la forme des bois flottants sont influencés par la pente de la rivière, le débit, la taille et la quantité de roches, de galets et/ou de blocs rocheux bordant le lit du canal. En conséquence, les bois flottants peuvent être caractérisés par une grande variété de dimensions. Les bois flottants qui ont eu un impact sur les blocs rocheux se décomposent généralement en de plus petits éléments individuels (branches, troncs et souches). La distribution du volume de bois flottants peut être définie soit par un large spectre de longueurs de troncs à dimensions sensibles, soit par un relevé des volumes de bois flottants liés aux inondations.

Le chapitre 3.2 donne des informations sur la caractéristique des bois flottants relevée après des crues aux aménagements hydroélectriques en Suisse. Les caractéristiques considérées

pour la production des bois flottants utilisés dans l'étude présente sont issues des études de Bezzola et Hegg (2007) et Rickli et Hess (2009).

2.1.2 Valeur écologique

La littérature montre que les bois morts sont des éléments à part entière des corridors riverains, afin de former des habitats, générer des seuils naturels produisant des petits bassins, et soutenir la reproduction des espèces. La conservation et la transition naturel des larges éléments de bois morts sont essentielles (Naiman et al. 2002). Les grands éléments influencent la bathymétrie du lit et le transport des sédiments, modélisant le lit de la rivière et variant le courant afin d'imposer des habitats variables. Des observations in situ montrent une corrélation étroite entre la présence des bois morts et la biomasse et la population piscicole (Figure 2).

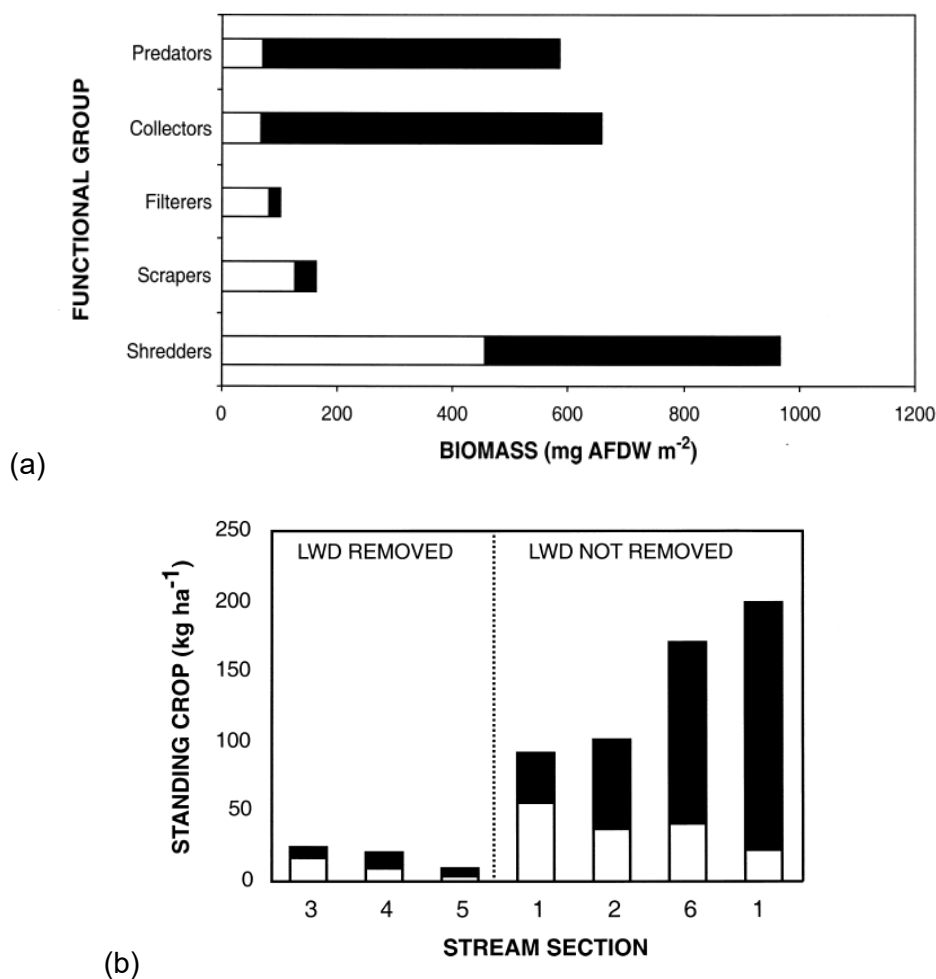


Figure 2. Biomasse (a) des invertébrés (□ sans bois morts (LWD), et ■ avec bois morts), et (b) population piscicole (□ coho salmon, et ■ coastal cutthroat) (Naiman et al. 2002, sur la base des données de Wallace et al. 1995 et de Fausch et Northcote 1992).

Selon Mende (2018), des quantités suffisantes de bois morts sont une exigence centrale pour un habitat aquatique intact. Elles ont une influence sur la morphologie du canal, par exemple les méandres et les bancs de graviers. Le nombre et la diversité des habitats des poissons

sont améliorés. Il n'y a pas que la zone aquatique qui profite des bois, la qualité du domaine des amphibiens est également augmentée.

D'un point de vue écologique, le principe est le suivant : plus la structure de bois mort est grande, plus elle peut influencer positivement le courant (Gafner et al., 2015). Le bois mort influence les variations de courant, il atténue les vitesses d'écoulement trop grandes. La présence de bois dans l'eau offre en effet des zones de protection et de repos ainsi que des habitats pour les jeunes poissons. En retenant des matières organiques, le bois fournit de la nourriture aux invertébrés. Le bois mort promeut également la liaison latérale avec la zone riveraine en connectant les biotopes terrestres et aquatiques.

L'absence de bois mort est synonyme de monotonie dans les cours d'eau (Gafner et al., 2015). Le cours d'eau manque alors de structures diversifiées et par conséquent de biotopes pour favoriser le nombre d'individus : la biodiversité en pâtit. L'absence de bois dans l'eau est de nos jours majoritairement liée au fait que l'apport naturel est entravé, par exemple, le bois est retenu par des ouvrages de protection contre les crues ou des aménagements hydrauliques au fil de l'eau.

Bulliard et Lauper (2019) se sont intéressés à l'influence du bois mort dans les cours d'eau pour les peuplements piscicoles. Ils ont relevé et identifié les différentes espèces de poissons ainsi que leur nombre sur des tronçons de cours d'eau comportant un embâcle de bois mort et sur des tronçons adjacents qui en sont exempts. Si peu de différences ont été constatées concernant l'abondance et la diversité des espèces, la présence de bois mort semble globalement rendre plus favorable à la survie et au développement des organismes aquatiques. La biomasse mesurée est entre 5 et 8 fois plus importante dans les tronçons avec embâcles. Les invertébrés, dont se nourrissent les poissons, utilisent le bois mort comme refuge. Par conséquent, la disponibilité en nourriture pour la faune aquatique semble s'accroître.

Finalement, Braudrick et al. (1997) résument qu'une revitalisation d'un cours d'eau nécessite l'adduction de grands éléments de bois morts afin de réhabiliter les habitats aquatiques.

2.1.3 Potentiel de danger

Les ouvrages hydrauliques dans les cours d'eau ont comme but d'influencer le courant ou le niveau d'eau afin d'y profiter de manière différente. Les ouvrages représentent normalement un obstacle pour le cours d'eau, empêchant le passage libre de l'eau, des sédiments et des corps flottants. Parfois, même le passage de la faune aquatique est interrompu.

Une modification du régime de transport des sédiments et des corps flottants par un ouvrage résulte nécessairement d'un stockage des corps flottants ou d'une sédimentation du charriage transporté lors des crues. Cela est typiquement observé dans les réservoirs créés par des barrages. Une sédimentation réduit le volume de stockage d'eau à lieu, avec sa source au delta du cours d'eau. En outre, les corps flottants sont bloqués dans la retenue, et transportés au fur et à mesure par les vents ou les courants en direction du barrage.

Au barrage, les corps flottants atteignent l'évacuateur de crue, qui les attire à la suite du courant majeur qu'il génère lors de son fonctionnement. Afin de réduire les frais de construction et la limite de surélévation de l'eau dans la retenue, les entrées des évacuateurs de crue sont hydrauliquement optimisées, ce qui les rend limitées au niveau de leurs dimensions. Par conséquent, leur largeur est souvent inférieure à la taille des grands arbres du bassin versant.

Ces longs troncs ont alors un risque considérable d'être bloqués à l'entrée d'un évacuateur de crue, et d'obstruer celui-ci. En conséquence, la capacité hydraulique de déverser l'eau est réduite. La crue qui entre dans la retenue ne peut plus sortir entièrement, ce qui nécessite un

stockage d'eau dans la retenue selon la continuité. Ce stockage partiel d'eau induit conséquemment une montée du niveau d'eau dans le réservoir. Le dépassement du niveau admissible maximal de la retenue représente un danger. Le risque est particulièrement élevé si l'eau se déverse sur la crête du barrage et provoque une érosion de sa fondation aval. Un déversement par la crête d'une digue en remblai est encore plus dangereux. Il est probable que le côté aval du barrage s'érode sous l'impact des eaux qui ruissellent, ce qui démarre normalement un processus de rupture.

L'obstruction d'un évacuateur de crue par des bois flottants génère potentiellement un risque de débordement et éventuellement de rupture pour un barrage, si les conditions de bords n'incluent plus de réserve de sécurité. De nombreux cas d'obstruction d'évacuateurs de crue avec des bois flottants et des surélévations critiques des réservoirs sont documentés dans la littérature spécifique. Le cas de Palagnedra en Suisse est souvent cité dans ce contexte (Bruschin et al. 1981).

2.1.4 Arrivée

L'apparition des bois flottants aux entrées des évacuateurs de crue est observée et est de multiple type. Nombreux paramètres (production de bois par le bassin versant, transport et usage par le cours d'eau, comportement dans le réservoir, courants hydrauliques et géométrie de l'évacuateur de crue, etc.) influencent cela et rendent une prévision quasiment impossible. Une étude sur le sujet doit donc nécessairement inclure des différents types d'apparition de bois, étant :

- Faible apparition : Troncs individuels ou petits groupes de quelques troncs
- Moyenne apparition : Groupes d'une ou quelques dizaines de troncs
- Apparition extrême avec un nombre élevé de troncs, dans l'ordre de centaines ou de milliers de troncs

La littérature scientifique classifie le régime de transport des bois flottants dans les cours d'eau comme « un-congested » (troncs individuels), « congested » (groupes petits à moyens) ou « hyper-congested » (apparition extrême).

- Braudrick et al. (1997) ont étudié le principe du transport des bois flottants le long d'un cours d'eau dans un modèle réduit. Ils introduisent la notion du transport des bois étant « un-congested » (troncs individuels sans contact avec d'autres bois) qui occupent qu'une faible partie du cours d'eau, et le régime « congested » (en groupe) qui prend plus d'un tiers de la largeur du cours d'eau. Ils suggèrent que le transport individuel est dominant dans des grands cours d'eau, et le transport en groupes apparaît plutôt dans des cours d'eau périphériques. Le transport individuel permet normalement une rotation des troncs lorsqu'ils franchissent un obstacle, cependant des groupes migrent comme un élément compact qui ne s'adapte peu aux conditions de bords.
- MacVicar et Piégay (2012) ont quantifié sur la base de vidéos calibrées le flux de bois flottants dans l'Ain en France. Ils observent que le transport des bois flottants apparaît à partir d'un seuil de débit, et que la phase croissante de l'hydrogramme (début de la crue) transporte environ quatre fois plus de bois que la partie décroissante (fin de la crue). Le débit maximum ne transporte pas la charge maximale en termes de bois. Des débits importants et ascendants transportent plutôt des troncs longs, et des débits faibles ou diminuants plutôt des troncs courts. L'orientation des troncs n'est pas corrélée par rapport à l'observation de Braudrick et al. (1997), mais été plutôt arbitraire. Cependant, cela peut être l'effet d'une courbe en amont de la section d'observation.

- Kramer and Wohl (2014) ont étudié similairement le flux de bois flottants dans une rivière, mais sur la base de photos prises sur le Slave River, Canada. Leur travail se focalise sur les aspects techniques des mesure (par exemple la fréquence), et confirme principalement les observations de MacVicar et Piégay (2012).
- Ruiz-Villanueva et al. (2019) ont analysé des vidéos téléchargées sur internet montrant des événements de transport de bois exceptionnels. Une analyse des 28 vidéos considérées a mené à la définition d'un régime supplémentaire, comparé avec Braudrick et al. (1997), étant le transport « hyper-congested ». Celui-ci est caractérisé par une apparition des tas de bois très compacts et en plusieurs couches qui occupe toute la largeur du cours d'eau. Ce régime apparaît au front d'une bore (similaire à un ressaut hydraulique, type de front exceptionnel d'un hydrogramme raide), soit en roulant sur le lit quasiment sec (régions arides) ou en flottant sur un faible débit (état avant la crue). Ce transport extrême apparaît tout au début de la crue pour des hydrogrammes prononcés, et est suivi par le régime « congested » et « un-congested ». Globalement, des troncs plus grands sont transportés au début de l'hydrogramme. Pour des hydrogrammes moins prononcés avec un débit de base considérant, le régime « un-congested » est plus probable avec des troncs individuels ou des petits groupes. Cela correspond selon l'interprétation des auteurs de ce rapport plutôt aux rivières suisses équipées avec un aménagement hydraulique au fil de l'eau ou une retenue.
- Ghaffarian et al. (2020) présentent un vidéo-monitoring sur l'Isère et l'Ain en France. Sur la base des observations, ils développent un lien entre la longueur des troncs et leur fraction cumulative, montrant que les deux cours d'eau ont des relations différentes, mais avec beaucoup d'éléments courts et peu de longs troncs.

2.2 RÉTENTION DES BOIS AUX BARRAGES

2.2.1 Blocage de bois flottants

Godtland et Tesaker (1994) ont effectué des essais préliminaires avec des bois flottants sur un déversoir avec ou sans pont sur l'arête déversante. Selon eux, la probabilité de passage des bois flottants augmente avec l'augmentation du débit.

Johansson et Cederström (1995) ont étudié sur un modèle physique le passage des bois flottants. Ils décrivent qu'un seul arbre a la plus forte probabilité de passer. Si deux troncs arrivent simultanément, la probabilité de passage diminue. Une augmentation relative de la charge hydraulique en amont jusqu'à 10% a été observée en raison du blocage.

Hartlieb (2012a, b) a effectué des essais systématiques de modélisation physique. Le débit, la profondeur d'écoulement et le régime du déversoir (ouvert ou fermé) étaient systématiquement variés. Il conclut que la vitesse d'écoulement d'approche est de faible importance par rapport à la probabilité de blocage, tandis que la longueur relative du tronc est pertinente. Quant à l'augmentation de la charge hydraulique, il décrit que cette dernière augmente avec la présence de bois flottants.

Pfister et al. (2013) présentent une étude sur un modèle réduit lié aux déversoirs à touches de Piano (PWK). La probabilité de blocage d'un seul tronc est fonction de la charge hydraulique et du diamètre du tronc. Dans le cas d'un réservoir, les troncs passent généralement le PKW si la profondeur d'écoulement critique est supérieure au diamètre des troncs. En ce qui concerne les essais avec un volume constitué de bois flottants, il a été démontré que l'accumulation est généralement faible, si bien que l'augmentation absolue du niveau d'eau est faible.

Schmocker (2017) a effectué des essais sur un déversoir à deux passes, soit sans mesures, soit avec un râtelier installé légèrement en amont de la crête. Une plaque en bois avec deux ouvertures représentant un déversoir avec deux passes d'écoulement a été placée dans le canal. Sans râtelier et pour une mise en place naturelle des troncs, une surélévation relative de 30% a été obtenue en raison des passes bloquées, et de moins de 10% si le râtelier était fourni. Si le bois était compacté manuellement au niveau de la passe ou du râtelier, on observait une augmentation de la charge de 40%, contre 10% pour le râtelier.

Walker et al. (2018) ont réalisé des essais sur un modèle d'un déversoir à crête standard à vannes radiales avec deux passes bloquées par des bois flottants. Pour une ouverture complète des vannes, ils ont constaté une élévation du niveau du réservoir de 1,5 m et une réduction du débit de 35%. L'approche des passes correspondait à un écoulement en canal, prouvant un blocage compact similaire à celui connu dans les applications fluviales.

Furlan (2019) a utilisé le dispositif expérimental présenté ici et a effectué des tests avec des tiges artificielles aux caractéristiques bien définies. Les résultats suivants sont résumés : (1) Les expériences sur les bois flottants doivent être répétées au moins 30 fois pour les troncs individuels afin d'obtenir des erreurs inférieures à 10%. Pour des groupes de 32 troncs, 10 répétitions de tests ont généré la même précision ; (2) les troncs ayant une densité élevée (proche de celle de l'eau) se bloquent plus fréquemment que les troncs "légers" ; (3) les charges prononcées H ont tendance à réduire la probabilité de blocage ; (4) de nombreuses passes ouvertes ont tendance à bloquer moins d'une passe ouverte sous la même charge ; (5) les troncs "longs" ($L/b > 0,8$) se bloquent plus fréquemment dans les passes d'une largeur donnée que les troncs "courts" ; (6) des conditions d'essai identiques peuvent entraîner un blocage différent d'un tronc "clé" et donc une augmentation différente du niveau du réservoir ; et (7) l'extension horizontale d'un "tapis" de bois flottants n'est pas significative pour l'augmentation de la charge dans les conditions du réservoir.

Lassus et al. (2019) ont résumé des études de modèles tirées de la littérature et les ont complétées par leurs propres simulations numériques. Ils ont trouvé un accord global et ont spécifié que la réduction du débit à la crête d'un déversoir standard équipé d'un râtelier était de 7 à 22%, selon la densité de bois flottants, le type de râtelier et charge de référence.

Pfister et al. (2019) et Bénet et al. (2021) ont étudié le blocage d'un volume de bois extrême à un déversoir standard. La largeur des passes entre les piliers, le débit et la taille des volumes de bois flottants ont été systématiquement variés. Le coefficient de déversoir exprimé en fonction de la charge relative s'approche d'une constante, dès qu'un volume de bois déterminant est retenu.

2.2.2 Probabilité de blocage

Pour les évacuateurs de crue à déversoirs standards, une quantification des probabilités de blocage a été présentée par Hartlieb (2012a, b). L'estimation de la probabilité de blocage est fonction de la longueur du tronc et de la largeur de la passe. Dans les conditions testées, le débit d'approche et le nombre de Froude n'avaient pas d'influence significative sur le blocage.

Pour les ponts avec et sans piliers, les probabilités de blocage des troncs ont été analysées par Gschnitzer et al. (2015). Le blocage est défini comme un tronc qui passe plus de 30 secondes sur le pilier. Il a démontré que les géométries de troncs cylindriques ont une probabilité de blocage plus faible que les géométries naturelles. Le blocage augmente avec l'élévation du niveau initial de l'eau et l'augmentation de la pente du chenal, de la longueur et du nombre des troncs.

Dans le cas de râteliers, une relation a été obtenue par Shrestha et al. (2011) pour la probabilité de blocage en fonction du nombre de troncs atteignant la structure simultanément. Lange et Bezzola (2006) et Bocchiola et al. (2008) ont noté que la probabilité d'accumulation de bois flottants augmente avec sa longueur (par rapport à la largeur du cours d'eau).

Lors de l'estimation des probabilités de blocage aux tabliers de pont, Schmocker et Hager (2013) ont effectué des expériences visant à trouver un compromis entre le résultat d'essai et la probabilité exacte d'interprétation.

Furlan (2019) a quantifié l'influence des caractéristiques des bois flottants et des conditions hydrauliques sur la probabilité de blocage dans les évacuateurs de crue. 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. De plus, 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.

Schalko et al. (2019) ont réalisé des essais sur modèle réduit pour des blocages de bois flottants en rivière. Trois configurations ont été testées : blocage de bois flottants prédéfini, blocage naturel avec lit du canal fixe et lit du canal mobile. Les conditions d'entrée, les bois flottants et les caractéristiques de déversement ont été variés dans toutes les séries d'essais. Selon les résultats obtenus, l'obstruction créée par les bois flottants dépend principalement du nombre de Froude d'entrée, de la compacité de la sédimentation et de la proportion de matériaux fins. L'accumulation peut être quantifiée à l'aide d'une estimation. La forme de sédimentation peut également être prise en compte avec le facteur type de sédimentation. De plus, il est possible de déterminer le volume caractéristique des bois flottants qui conduit à l'accumulation décisive et de calculer ainsi l'influence du volume de bois flottants sur l'accumulation.

2.2.3 Conséquence des blocages

Le transport de bois flottants peut induire des obstructions dangereuses aux ouvrages hydrauliques pendant les inondations, comme illustré à la Figure 3, et limiter leurs fonctionnalités et leurs capacités de décharge lors de crues extrêmes (Godtland et Tesaker, 1994). Les blocages peuvent augmenter l'ampleur d'une inondation et de ses conséquences, ce qui peut entraîner des risques pour les populations et les constructions environnantes.

Furlan (2019) cite différents travaux sur les répercussions de blocages de bois flottants :

- Pour les petites vitesses d'approche, comme c'est généralement le cas à proximité des déversoirs des réservoirs, les volumes de bois flottants ont tendance à former un « tapis » à la surface de l'eau (Hartlieb, 2012a, b).
- En raison de l'accumulation de bois flottants, la réduction de la section d'écoulement libre entraîne une élévation du niveau de l'eau en amont de la structure (Lyn et al., 2003 ; Johansson et Cederström, 1995).
- Les bois flottants peuvent créer des blocages en raison d'un dégagement insuffisant sous ou au-dessus des obstacles ou des ouvertures de passes trop étroites. Le nombre de passes ouvertes et la configuration géométrique d'un barrage peuvent aussi avoir une incidence sur le blocage des bois flottants. Lorsque toutes les passes de l'évacuateur de crue fonctionnent, le mouvement des troncs a tendance à être plus aléatoire par rapport à une seule passe ouverte (Johansson et Cederström, 1995 ; Hartford et al., 2016). Avec une seule passe qui fonctionne, les bois flottants s'alignent et passent plus fréquemment du côté aval du barrage.

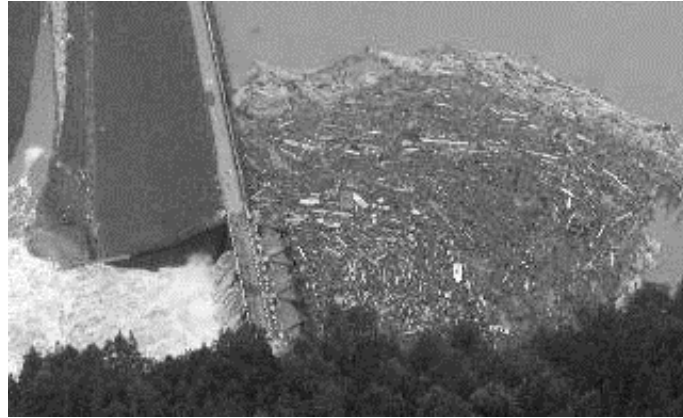


Figure 3. Obstruction d'un râtelier d'un évacuateur de crue en Autriche (Ministère Fédéral de l'Agriculture et des Forêts, de l'Environnement et de la Gestion des Eaux, Autriche).

Selon Godtland et Tesaker (1994), l'obstruction d'un déversoir par des bois flottants réduit sa capacité et des dommages sur le déversoir peuvent se produire plus fréquemment. Une étude sur un modèle physique des différents facteurs influençant l'obstruction des déversoirs a permis de définir quelles sont les grandes lignes à suivre :

- Les risques d'obstruction des déversoirs à petites ouvertures doivent être étudiés, en particulier si le bassin versant est boisé.
- Pour éviter une collecte de plus de 10% à 20% des bois flottants aux déversoirs, les piles du pont servant de passage sur le sommet du déversoir doivent être espacées d'au moins 80% de la longueur des troncs susceptibles d'arriver. La hauteur libre (Figure 4) entre la crête et le pont doit être au moins de 15% de cette longueur.

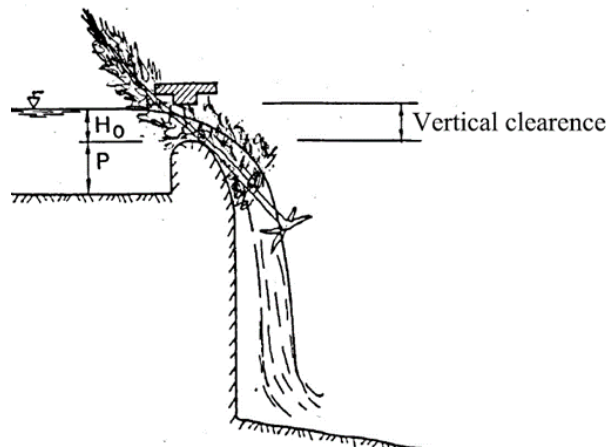


Figure 4. Représentation schématique de la hauteur libre (Godtland et Tesaker, 1994).

Furlan (2019) a observé les éléments suivants : des charges hydrauliques prononcées sur le déversoir tendent à réduire la probabilité de blocage, de nombreuses passes ouvertes ont tendance à bloquer moins qu'une seule passe ouverte, sous la même charge hydraulique, les troncs « longs » bloquent plus fréquemment aux passes d'une largeur donnée que les troncs « courts », des conditions d'essai égales peuvent entraîner une différence de blocage d'un tronc « clé » et donc une augmentation différente du niveau d'eau du réservoir, et l'extension

horizontale d'un « tapis » de bois flottants n'est pas significative pour l'augmentation de la charge hydraulique dans les conditions du réservoir.

Bénet et al. (2021) ont montré pour un blocage complet et sans contre-mesures que le coefficient de déversoir C_d s'approche d'une constante. Ce dernier a priori était indépendant du débit (jusqu'au débit de dimensionnement), de la largeur relative de la passe (aussi longtemps que $b/L_M \leq 0.77$) et du volume de bois flottants (tant que le volume présent dépasse le volume caractéristique qui conduit à l'accumulation décisive). En ce qui concerne la variation des données, étant typique pour les bois flottants, un coefficient $C_{dD}=0.36$ peut être envisageable pour l'évaluation d'ouvrages existants.

2.2.4 Mesures d'atténuation

- Hartung et Knauss (1976) ont proposé un déversoir qui brise les troncs longs et les oriente dans la direction de l'évacuateur de crue. De plus, des solutions ont été étudiées pour retenir les bois flottants dans le réservoir et maintenir ainsi l'entrée libre.
- Schmocker et Weitbrecht (2013) présentent une vue d'ensemble de l'analyse des risques et des mesures de rétention de bois flottants dans les grandes rivières alpines, comme par exemple un système de bypass.
- Perham (1986) discute des mesures à prendre pour maintenir les grilles libres aux entrées des évacuateurs de crue.
- Schmocker et Hager (2013) présentent une étude de modèle physique sur l'accumulation de bois flottants sur les râteliers.
- Hartlieb et Bezzola (2000), ainsi que Lange et Bezzola (2006) présentent un résumé des grilles et des filets construits.
- Möller et al. (2009) décrivent le concept d'une galerie à déversoir latéral pour la Matteschwelle à Berne.
- Pfister (2010) décrit le râtelier longitudinal avec une zone de stockage pour les bois flottants à l'ouvrage d'entrée de la galerie de dérivation à Lyss (BE).
- Bénet et al. (2021) ont testé la prolongation de la tête des piliers dans le réservoir, la suppression des piliers et la mise en place d'un râtelier complet ou partiel. L'ensemble de ces contre-mesures ont amélioré l'efficacité hydraulique au déversoir.

2.3 PASSAGE DES BOIS AUX BARRAGES

2.3.1 Section de passage

UASCE (1997) identifie les sections ouvertes à l'écoulement comme paramètre primaire, similaire à l'observation de Godtland et Tesaker (1994). Il est recommandé que les vannes soient ouvertes à une élévation « appropriée ». Cette ouverture doit être « substantielle » afin de générer le courant nécessaire pour faire passer les corps flottants. Après le passage du déversoir, les corps flottants peuvent générer une érosion à l'aval de l'évacuateur de crue ou des dégâts dans le bassin amortisseur.

Les mesures pour faire passer les bois flottants mentionnées dans UASCE (1997) sont celles de Godtland et Tesaker (1994) pour un écoulement sur un déversoir. Le mode d'opération des vannes – si plusieurs sont à disposition – est mentionné comme possibilité de faire passer les corps flottants, particulièrement si un courant concentré au centre de la structure est produit. Concernant des galeries, une surface lisse, l'absence de contractions et de coudes sont recommandées.

Sans pilier au déversoir, Bénét et al. 2021 n'ont observé aucun effet de blocage des bois flottants sur le coefficient de déversoir C_d si le diamètre maximal du tronc D_M était inférieur à $0.35 H$ (charge de référence H sans bois flottants). Un blocage partiel a été observé pour les diamètres de troncs de $0.35 H$ à $0.60 H$, et un blocage complet pour les diamètres supérieurs à $0.60 H$.

2.3.2 Pilier individuel

Hors des virages, les troncs sont fréquemment orientés dans le sens du cours d'eau lorsqu'ils sont transportés. Par le biais de situations défavorables, les mouvements des troncs deviennent désordonnés. Il faut alors éviter que des troncs individuels ne restent bloqués. Une mesure pour un alignement ciblé (parallèle à l'écoulement) est le pilier individuel situé devant un ouvrage potentiellement obstrué, appelé redresseur. Ce pilier est nommé « débris fin » par FHWA (2005).

Un ouvrage constitué de trois piliers en forme de triangle en amont d'un obstacle similaire à l'entrée d'un évacuateur de cure a été présenté par McFadden et Stallion (1976). Cet arrangement a été testé par le USCE sur un modèle réduit. Les observations n'ont pas été concluantes ; Une grande partie des troncs ont été alignés avec le courant et ont passé l'obstacle. D'autres ont été bloqués aux trois piliers.

Lange et Bezzola (2006) ont testé lors d'essais sur modèle et réalisé plus tard un tel redresseur pour le tunnel de dérivation de Campo Vallemagia, où le risque d'enchevêtrement est réduit au minimum. Avec ce système, les bois flottants individuels s'alignent fréquemment dans le sens longitudinal de l'écoulement. La Figure 5 montre une séquence d'images d'un tronc arrivant transversalement lors d'un test sur modèle.

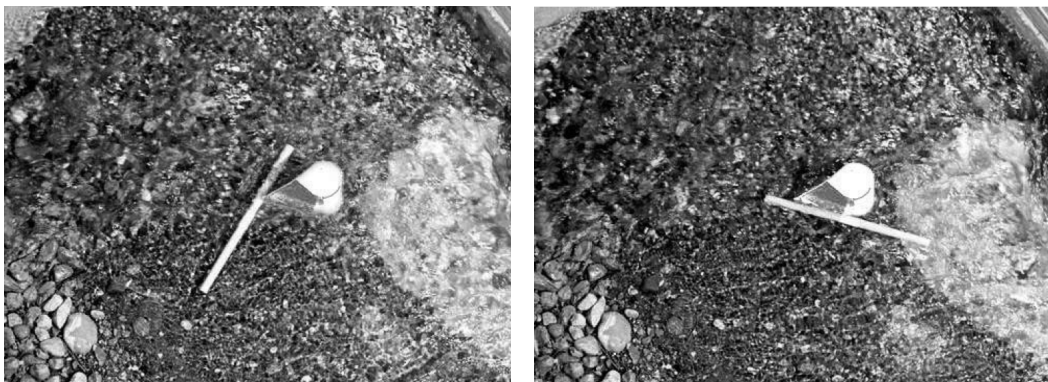


Figure 5. Rotation d'un tronc autour d'un pilier individuel (Lange et Bezzola, 2006).

Lange et Bezzola (2006) ont également analysé le mode de fonctionnement du redresseur au cours d'un événement avec un tapis compact de bois flottants. Il a été déterminé que le redresseur a une influence sur le détachement du tapis de bois flottants et la répartition dans le temps des troncs vers l'aval. Toutefois, dans le cas d'une grande quantité de bois flottants, il est toujours possible qu'une barrière se forme avec le redresseur. Cela commence dès qu'un tronc plus long se bloque. Il est donc possible que toute la section d'écoulement soit obstruée par un tapis de bois flottants.

Schalko (2017) a testé la probabilité de blocage d'un tronc individuel contre un seul pilier (Figure 6). Selon les résultats, la probabilité d'accumulation augmente avec la longueur des

troncs, la vitesse d'écoulement et de transports des troncs d'approche. Le nombre de Froude et la profondeur ont généralement un effet sur la probabilité d'accumulation. La rugosité des piliers et des troncs a indiqué un effet mineur sur la probabilité d'accumulation. Le nombre requis de répétitions pour obtenir des probabilités d'accumulation statistiquement significatives a été définie comme égal ou supérieur à 40

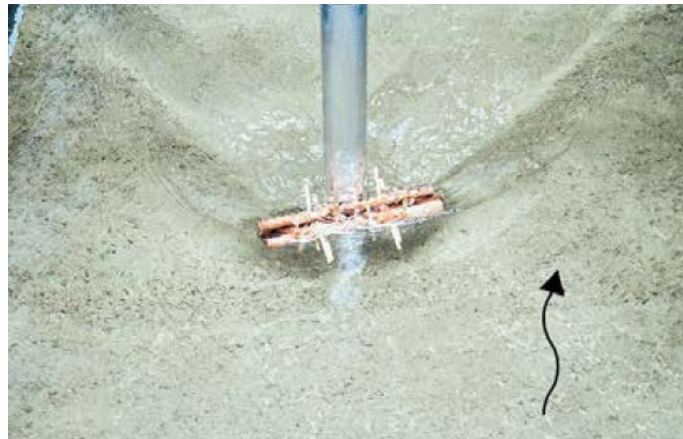


Figure 6. Pilier individuel avec un seul tronc testé par Schalko et al. (2017).

De Cicco et al. (2020) ont étudié l'accumulation de bois flottants contre un seul pilier, mais de différentes formes par modélisations physique et numérique. L'objectif était de tester l'influence de la géométrie des piliers sur la probabilité de blocage des bois flottants. Deux mécanismes de transport du bois, différentes classes de taille des troncs, deux conditions d'écoulement et cinq formes de piliers ont été testées. Cette recherche a montré que :

- La probabilité de blocage des bois flottants à une seule pile était influencée de manière significative par les mécanismes de transport du bois.
- Le champ d'écoulement en amont de la pile était très influencé par la géométrie de la pile, et donc cette dernière a affecté la probabilité de blocage.
- La probabilité de de blocage la forme rectangulaire de la pile a été multipliée par trois comparé à la forme triangulaire du pilier.
- La relation entre la probabilité et la longueur du tronc a révélé que les plus gros troncs, même s'ils sont en faible nombre, se sont bloqués à la pile avec une relative haute fréquence.

2.3.3 Pilier avec ailettes

Schalko et al. (2020) ont effectué des essais sur modèle réduit avec un pilier équipé d'une ailette métallique pour guider les troncs. Divers paramètres ont été variés comme le type d'ailettes (l'épaisseur), l'inclinaison de l'ailette, l'angle par rapport à la direction de l'écoulement, la vitesse d'approche, la hauteur initiale, le nombre de Froude, et la longueur des troncs. La Figure 7 montre une configuration d'essai.

Les conclusions de Schalko et al. (2020) sont les suivantes :

- Les différentes configurations d'ailettes (géométrie, orientation, ...) n'ont pas affecté de manière significative la stabilité des troncs accumulés.
- Les configurations testées n'ont pas diminué la probabilité d'accumulation.

- Sur la base de la gamme de paramètres testés, les ailettes ne peuvent pas être recommandées comme une mesure efficace pour réduire la probabilité d'accumulation.
- Les ailettes évitent l'impact direct des troncs sur le pilier.



Figure 7. Exemple de configuration d'ailettes sur pilier testée par Schalko et al. (2020).

2.4 QUESTIONS DE RECHERCHE

L'étude bibliographique et le retour de la pratique (STK 2017) ont montré que

- Les bois flottants (morts) représentent un élément vital pour un cours d'eau, ils sont nécessaires pour maintenir un système écologique aquatique équilibré.
- Les bois flottants représentent un danger potentiel pour un barrage, car ils peuvent obstruer le « trop plein » (l'entrée de l'évacuateur de crue) et faire monter le niveau de la retenue de manière incontrôlée.
- Des éléments qui réduisent la surélévation sont connus, mais ils retiennent tous les bois flottants, et ceux-ci doivent (LEaux) en conséquence être sortis du cours d'eau.
- Des éléments qui orientent les bois flottants individuels sont documentés dans la littérature, comme le pilier individuel. Des tapis de bois flottants ne peuvent quasiment pas être influencés, ils bloquent normalement contre un obstacle.
- Une orientation des bois combinée avec des passes larges (Godtland et Tesaker, 1994) pourraient aider les bois flottants à passer sur un évacuateur de crue sans l'obstruer.
- Les tests préliminaires de Pfister et al. (2019) et Bénet et al. (2021) ont montré, qu'un râtelier partiel dispose du potentiel pour faire passer partiellement des bois flottants à travers des passes étroites en conservant le niveau de la retenue.

Dans ce contexte (Pfister et al. 2019, Bénet et al. 2021), le râtelier partiel doit être systématiquement testé afin de déterminer son empattement idéal, son efficacité en termes de probabilité de blocage (ou de passage) des bois flottants et de réduction de la capacité du déversoir initié par un râtelier (partiellement ou complètement) bloqué. Les questions de recherche du présent projet sont ainsi :

- A quelle distance le râtelier partiel doit-il être placé en amont du front du déversoir, afin d'initier une rotation (distance suffisamment longue) des troncs mais d'éviter qu'ils puissent se bloquer parallèlement au front du déversoir (distance suffisamment courte) ?
- Quel pourcentage de bois flottants passe (probabilité de blocage) par le déversoir sans rester bloqué pour une certaine distance du râtelier, un débit particulier, une largeur des passes particulières et une apparition des bois variable ?

- Quelle est la surélévation de la retenue initiée par des bois flottants bloqués (au râtelier ainsi qu'au déversoir) pour une certaine distance au râtelier, un débit particulier, une largeur des passes particulière et une apparition des bois variable ?

3 MÉTHODE

3.1 MODÈLE RÉDUIT

3.1.1 Installations

Les expériences ont été effectuées dans un canal droit et horizontal de 10 m de longueur, de 1.50 m de largeur et de 0.70 m de hauteur, qui se trouve à la Plateforme des Constructions Hydrauliques (PL-LCH) de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL). Un déversoir standard est situé transversalement à l'aval du canal, étant donné son utilisation fréquente in situ. La charge de dimensionnement du déversoir est $H_D=0.15$ m.

Le niveau de crête du déversoir est de $W=0.42$ m au-dessus du fond du canal. Sur le déversoir, des piliers à tête ronde d'une épaisseur de 0.04 m sont disposés. Ils peuvent être déplacés dans le sens de largeur du canal pour créer des passes de largeur choisie. Les têtes des piliers sont positionnées à fleur du front vertical du déversoir, à l'exception des tests combinés (chapitre 4.5). Le déversoir et les piliers ont été fabriqués en PVC et ont donc été considérés comme lisses.

La Figure 8 montre un schéma du déversoir et de ces éléments, et donne la nomenclature appliquée dans cette étude. La Figure 9 montre le canal et le déversoir pour un arrangement typique des passes et piliers.

Un grillage métallique est positionné à l'extrémité aval du canal (juste avant l'entrée dans le réservoir principal du laboratoire). Il permet de stopper les bois flottants qui auraient franchi le déversoir.

Un « tranquilizer » a été placé à 6 m en amont du déversoir pour assurer un écoulement homogène le long du canal. Il a été conçu pour atténuer l'effet lié à la configuration d'entrée du canal et assure un champ de vitesse uniforme. Il est constitué d'une grille métallique et de couches de géotextile. De plus, une feuille flottante de mousse de polystyrène a été placée pour éviter les vagues à la surface de l'eau. Furlan (2019) a démontré l'efficacité de ce « tranquilizer ».

Le niveau d'eau dans le canal, étant liée à la charge H du déversoir après la soustraction de W (Figure 8), a été mesuré à 1.5 m en amont du déversoir à l'aide d'un limnimètre (Figure 10), gradué au millimètre (précision de mesure ± 1 mm). Le débit franchissant le déversoir est mesuré par un débitmètre magnétique inductif (précision de mesure $\pm 0.5\%$ FS) se situant sur le circuit général de la pompe qui fournit le débit.

Un râtelier a été mis en place lors des essais en amont du déversoir. Ce râtelier est appelé « râtelier partiel », car une barre de râtelier est positionnée seulement devant un pilier sur deux. Cet élément est constitué de tubes en aluminium de diamètre 4 cm, le même diamètre que les piliers afin de conserver une largeur des passes identiques. Les tubes en aluminium sont maintenus par une poutre en bois. La Figure 11 montre le râtelier partiel, à titre d'exemple, les autres configurations sont représentées à la Figure 19.

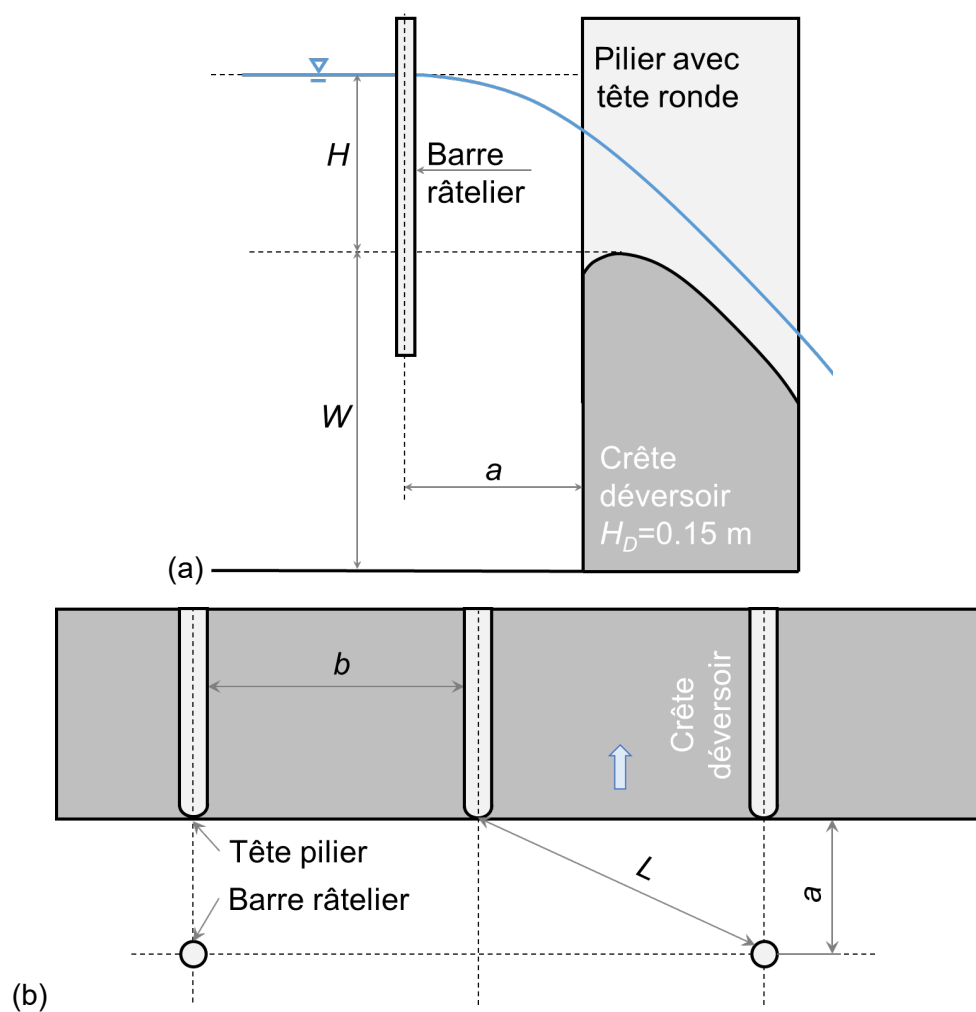


Figure 8. Schéma du déversoir et nomenclature, (a) coupe, et (b) vue en plan.

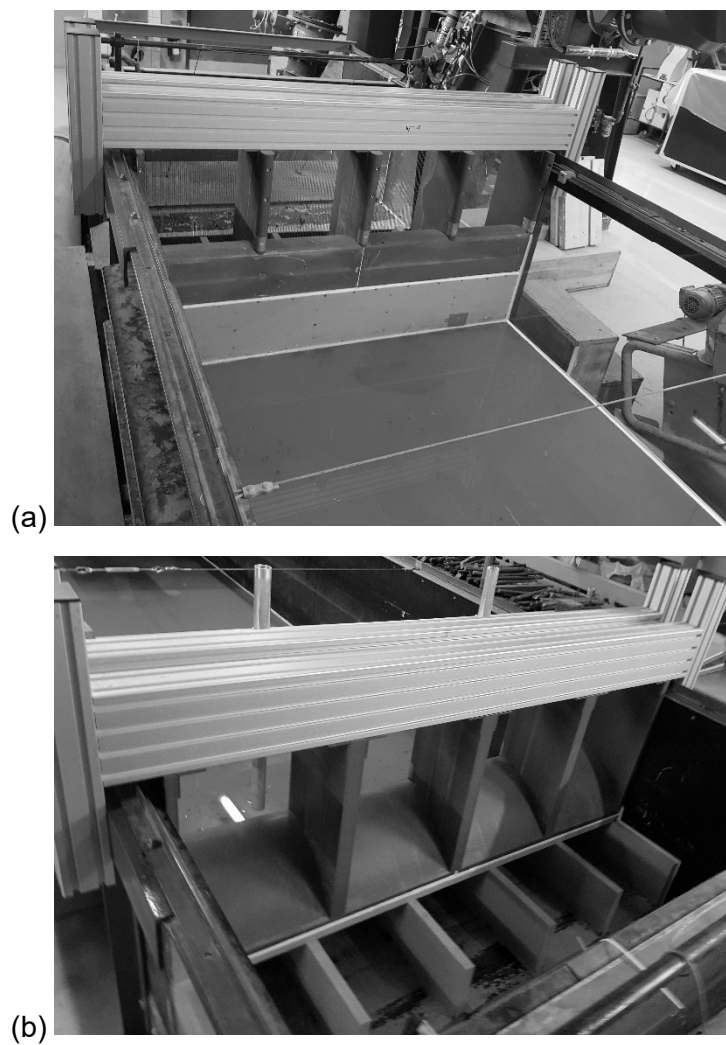


Figure 9. Vues depuis (a) l'amont et (b) l'aval du canal avec le déversoir à l'extrémité avale.

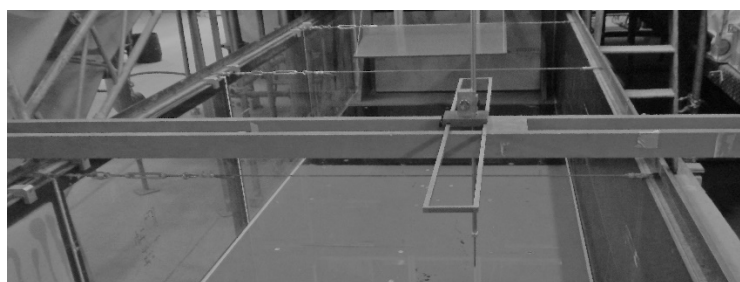


Figure 10. Positionnement du limnimètre, vue depuis l'amont.



Figure 11. Exemple de râtelier partiel en amont du déversoir (Figure 19).

L'avancement du râtelier en amont de la crête du déversoir a varie en fonction de la largeur des passes b , visible à la Figure 8a (Tableau 1).

Pour la position 1 (« **distant** »), le râtelier est positionné de sorte qu'il y ait toujours la dimension maximale des troncs $L_M=0.433$ m de disponible pour le passage des troncs entre la barre du râtelier et le pilier (avec les têtes à fleur du front du déversoir, $p=0$ m), comme exprimé à l'équation (1),

$$\text{Position 1} \quad a_1 = \sqrt{L_M^2 - b^2} \quad (1)$$

Pour la position 2 (« **intermédiaire** »), le râtelier est positionné de sorte que

$$\text{Position 2} \quad a_2 = \frac{1}{2} \left[\frac{b}{2} + \sqrt{L_M^2 - b^2} \right] \quad (2)$$

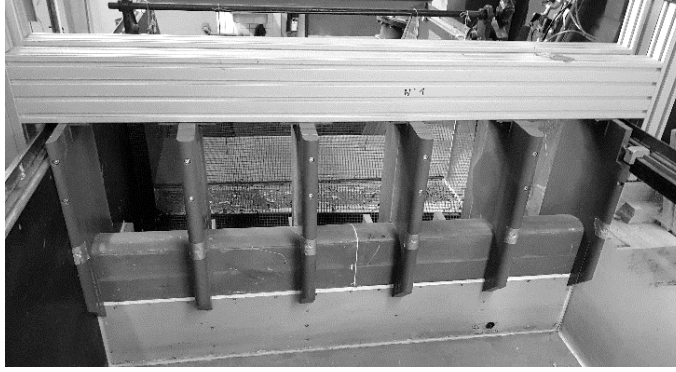
Pour la position 3 (« **proche** »), le râtelier est positionné proche du déversoir, similaire à la distance testée par Pfister et al. (2019) et Bénét et al. (2021)

$$\text{Position 3} \quad a_3 = \frac{b}{2} \quad (3)$$

Pour la position 4 (« **absent** »), aucun râtelier est installé (et les têtes des piliers sont à fleur du front du déversoir).

$$\text{Position 4} \quad a_4 = 0 \quad (4)$$

Les expériences de la dernière série de tests (chapitre 4.5) ont combiné le râtelier partiel avec un surplomb des piliers de $p=0.08$ m. Le surplomb est défini comme longueur horizontale dans le sens de l'écoulement principal entre le front vertical du déversoir et le nez du pilier (Pfister et al. 2019, Bénét et al. 2021). Pour ces expériences, les positions 1, 2 et 4 ont été installées selon les équations (1), (2) et (4), sans prise en compte du surplomb. Les taux L/L_M du Tableau 1 se réduisent, strictement parlé, suite au surplomb, à $L/L_M=0.83 \dots 0.89$ pour la position 1 et à $L/L_M=0.55 \dots 0.84$ pour la position 2. La Figure 12 montre les têtes de piliers avec surplomb (position 4).

Figure 12. Prolongement des têtes de piliers $p=0.08$ m et position 4.Tableau 1 : Avancement a du râtelier en amont de la crête du déversoir

Largeur des passes b [m]	Position	Avancement du râtelier a [m]	Avancement relatif du râtelier a/b [-]	Avancement relatif du râtelier L/L_M [-]
0.175	1	0.396	2.26	1.00
0.260	1	0.346	1.33	1.00
0.335	1	0.275	0.82	1.00
0.175	2	0.242	1.38	0.69
0.260	2	0.238	0.92	0.81
0.335	2	0.221	0.66	0.93
0.175	3	0.088	0.50	0.45
0.260	3	0.130	0.50	0.67
0.335	3	0.168	0.50	0.86

3.1.2 Validation

Pour la validation du fonctionnement du modèle, la charge H et le débit Q sont mesurés sur le modèle. Les calculs du coefficient du déversoir C_d sont effectués sur la base de l'équation de Poleni

$$Q = C_d n b \sqrt{2gH^3} \quad (5)$$

où C_d est le coefficient du déversoir, n est le nombre de passes ouvertes, b est la largeur individuelle d'une passe ouverte (la zone inactive suite la séparation du courant aux piliers est soustrait, Bénet et al. 2021), et g est l'accélération de la gravité.

Les des coefficients du déversoir C_d mesurés sur le modèle (considérant l'équation 5) sont comparés aux valeurs dérivées de la littérature (Vischer et Hager, 1999)

$$C_d = \frac{2}{3\sqrt{3}} \left(1 + \frac{4\chi}{9+5\chi} \right) \quad (6)$$

Vischer et Hager (1999) détaillent le coefficient du déversoir C_d en fonction de la charge relative χ

$$\chi = \frac{H}{H_D} \quad (7)$$

où H est la charge pour un certain débit, et H_D est la charge de dimensionnement du profil standard (ici $H_D=0.15$ m).

La courbe de tarage par calculs a été vérifiée par des essais de validation pour chaque configuration du modèle. Le modèle a fonctionné uniquement avec un débit d'eau, sans bois flottants, lors des tests préliminaires.

La Figure 13 démontre que les points des tests (Q et H sont mesurés, Equation 5) sont relativement voisins de la courbe calculée du déversoir (Equation 6). Une faible sous-estimation du coefficient C_d pour des petits débits (petites valeurs de χ) est observée. Cela est lié à la surestimation de la viscosité dans le modèle réduit pour des faibles charges, qui surélève le niveau de la retenue et réduit ainsi C_d . Des faibles effets d'échelle sont donc visibles pour ces cas, autant que la charge minimale de $H<0.05$ m ($\chi<0.33$) selon la littérature n'est pas respectée (Hager et al. 2020). Cet effet mineur d'échelle semble acceptable, car l'étude se concentre sur des grands débits. Le débit de dimensionnement avec $H_D=0.15$ m étant $\chi=1$ n'est pas affecté, comme le montre la Figure 13.

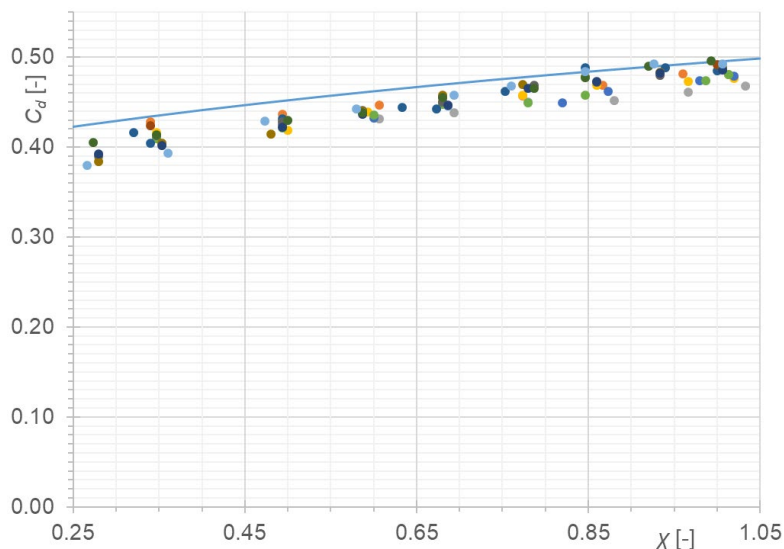


Figure 13. Courbe de tarage mesurée sans bois flottants (points, équation 5), et valeurs calculées selon Vischer et Hager (1999, ligne, équation 6) comme validation du modèle (Pfister et al., 2019).

3.1.3 Effets de modèle

Même que les essais de validation ont démontrés la fiabilité hydraulique du modèle, quelques effets de modèle potentiels doivent être discutés. Il reste à noter qu'ils sont partiellement inévitables, mais pas déterminant pour les résultats obtenus.

- Effets de parois latérales : Le mouvement des bois flottants est influencé par le contact avec les parois du canal. Les troncs ont tendance à s'aligner dans la direction des bords. La Figure 14 montre l'effet de paroi sur l'alignement. Une grande largeur de $B=1.50$ m du canal ainsi qu'au minimum quatre passes ouvertes ont été testées afin de limiter cet effet de bord.
- Caractéristiques mécaniques des bois : In situ, les bois flottants peuvent se briser facilement en raison d'interactions avec d'autres troncs par la suite à des grandes actions.

Dans le modèle réduit, les troncs produisent rarement la force nécessaire pour casser d'autres troncs. Ainsi, seul le mouvement des troncs a été simulé et non la casse ou la flexion. La rigidité du tronc est surestimée. De plus, la rugosité du bois n'est pas identique car les troncs ne sont pas écorchés (à cause du transport) comme en réalité. Cependant, la surface et la forme des troncs restent naturelles. Les feuilles, les branches et les petits troncs ne sont pas présents dans le modèle réduit. Leur influence n'est donc pas prise en considération.

- Homogénéité de l'écoulement d'approche : Un « tranquilizer » (chapitre 3.1.1) est installé pour homogénéiser les vitesses d'écoulement en amont du déversoir, pour s'approcher des conditions d'une retenue. L'effet du tranquilliser a été validé par Furlan (2019).
- Déversement libre : Le niveau de la crête du déversoir (Figure 8) est égal à $W=0.42$ m en dessus du fond du canal. Pour rappel, la charge de dimensionnement H_D a été fixée à 0.15 m. Selon Vischer et Hager (1999), le niveau de crête du déversoir W doit être plus grand que le double de la charge de dimensionnement H_D , pour éliminer l'effet du débit d'approche sur la courbe de tarage, ce qui est toujours le cas dans cette étude.
- Conditions latérales : Pour générer les différentes largeurs de passes, des plaques (Figure 18a) ont été latéralement mises en place pour réduire la section d'écoulement. Les conditions latérales de blocage des troncs sont légèrement modifiées. Les potentielles influences de changement des conditions latérales ne sont pas prises en compte dans les analyses.



Figure 14. Alignement des bois flottants à proximité de la paroi (Test 302).

3.1.4 Effets d'échelle

Les effets d'échelle sont des écarts entre la valeur du modèle mis à l'échelle et la mesure du prototype, qui résultent de la similitude dynamique. Les effets d'échelle sont inévitables parce

que toutes les forces dominantes ou leurs rapports ne peuvent pas être mis à l'échelle simultanément (Pfister et Ribí, 2020). Néanmoins, ils sont négligeables pour une modélisation adéquate.

Pour ce modèle avec une surface d'eau libre étant dominante, la similitude de Froude est appliquée. C'est-à-dire que le nombre de Froude est identique entre la représentation à l'échelle et la réalité. En revanche, le nombre de Reynolds subit une modification et n'est plus égal entre le modèle réduit et le prototype.

Les effets de la tension superficielle et la viscosité sont surestimés dans les modèles réduits pour la similitude de Froude. Selon Pfister et al. (2013), l'effet de la tension superficielle est négligeable si la profondeur d'écoulement dépasse de 0.015 m à 0.020 m. Même que ce critère est toujours respecté dans l'étude présente, des faibles effets d'échelle sont visibles dans la Figure 13 pour des tous faibles débits. Néanmoins, cette étude implique des événements significatifs au niveau des crues et des bois flottants, et produit donc aucun effet de modèle.

3.2 BOIS FLOTTANTS

Une description des bois flottants transportés est nécessaire pour l'évaluation des dangers. La présente étude se concentre, sur la base des tests préliminaires, d'observations in situ et des indications de la littérature, sur

1. L'arrivée *sporadique* (« **faible** » apparition) de petits groupes de trois troncs identiques (en total 60 troncs, 20 groupes à 3 troncs chacun, longueurs homogènes de L_M)
2. L'arrivée de *groupes* (« **moyenne** » apparition) de trente troncs identiques (en total 180 troncs, 6 groupes à 30 troncs chacun, longueurs homogènes de L_M)
3. L'arrivée des volumes *extrêmes* (« **extrême** » apparition) avec une distribution selon les relevées in situ, comme ils peuvent apparaître lors des crues exceptionnelles (Tableau 2).

La composition du volume extrême de bois flottants est représentative des différentes longueurs L et diamètres D des troncs. Afin de déterminer les caractéristiques des volumes, les études de Bezzola et Hegg (2007) et Rickli et Hess (2009) ont été utilisées :

- Au cours des orages de 2005, les quantités documentées de produits déposés ou retirés par Bezzola et Hegg (2007) représentent au moins 110'000 m³ (y compris les interstices) ou 30'000 tonnes. Les auteurs montrent le pourcentage du volume de l'échantillon en fonction de leurs classes de longueurs (Figure 15a).
- Rickli et Hess (2009) représentent la présence des bois flottants dans les lits des cours d'eau et de caractériser le boisement de rive. Ce relevé a été réalisé sur des tronçons de 1'000 m de manière systématique dans dix torrents distincts. Les auteurs expriment directement le nombre de tronc en fonction de leurs classes de longueurs (Figure 15b).

Pour comparer les deux méthodes, il a fallu convertir le pourcentage du volume, en appliquant le facteur $L/D=20$, en un nombre de troncs correspondants. La répartition des différentes longueurs de bois flottants présente dans nos essais sur modèle se rapproche des relevés de Rickli et Hess (2009, Figure 16). Dans nos expériences effectuées, des bois plutôt longs sont considérés. Cela est en lien avec la première étude effectuée dans le contexte des événements extrêmes.

Pour une utilisation pratique les troncs de l'apparition extrême ont été divisés en neuf classes de taille (classes « A » à « I ») selon le Tableau 2 et la Figure 17. Pour une arrivée des groupes

de troncs (3 ou 30 troncs), les troncs sont de longueurs homogènes et correspondent à la longueur maximale $L_M=0.433$ m.

Une échelle géométrique typique du modèle pourrait être défini comme 1:35. Ainsi, le volume extrême représente un volume de bois (bois massif) de 1'640 m³. Dans le modèle réduit, la longueur des troncs varie entre $L=0.100$ m et $L_M=0.433$ m (Tableau 2), ce qui correspond à des dimensions entre 3.50 m et 15.20 m, avec le facteur d'échelle de 1:35. La densité des bois du modèle n'est pas explicitement déterminée.

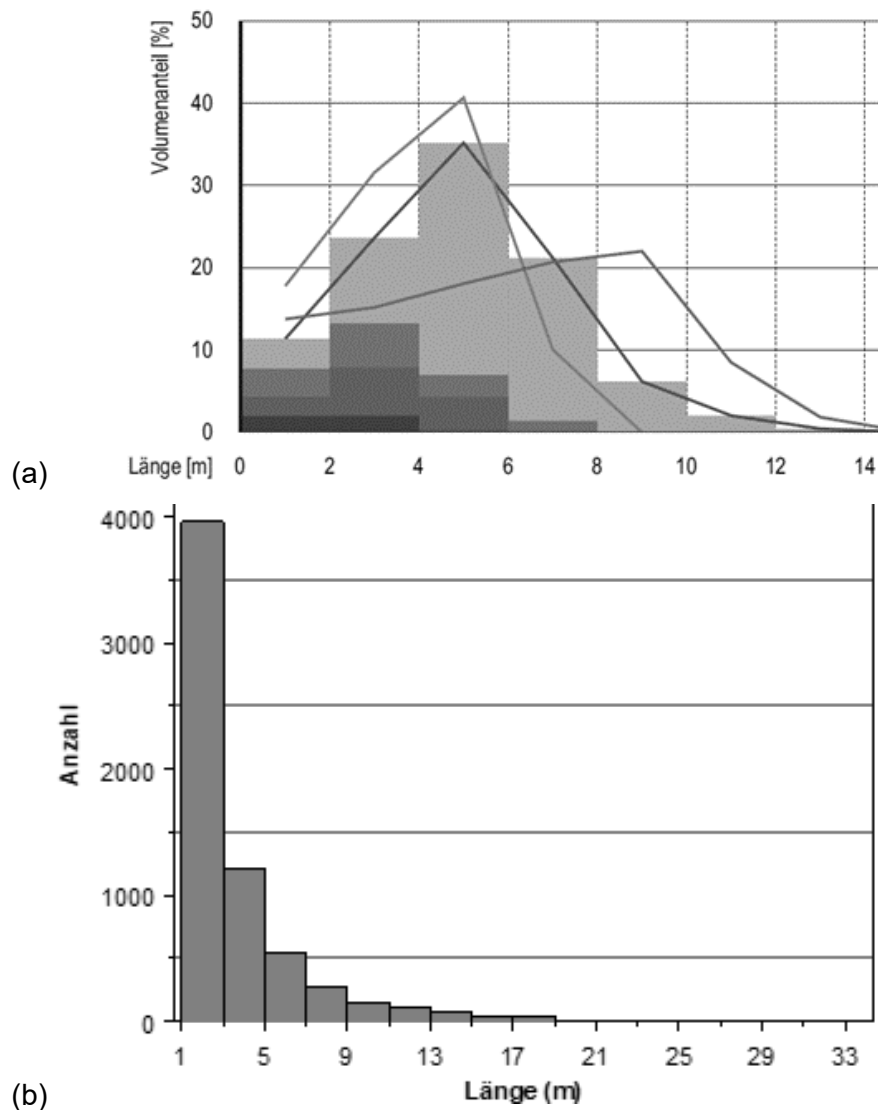


Figure 15. Fractions (a) volumiques selon Bezzola et Hegg (2007), et (b) en nombre de troncs selon Rickli et Hess (2009).

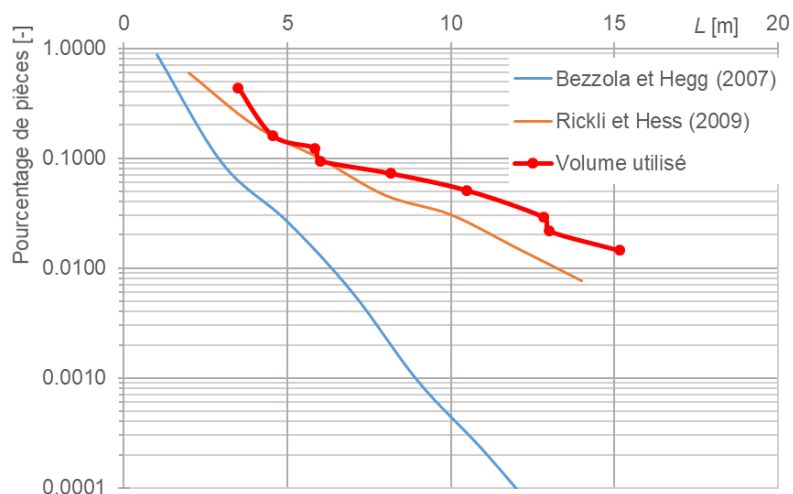


Figure 16. Comparaison entre la courbe des bois flottants utilisés dans cette étude et les relevés in situ (Pfister et al., 2019).



Figure 17. Illustration des troncs par classes (Tableau 2).

Tableau 2. Caractéristique des bois flottants utilisés pour l'apparition extrême, nombre de troncs par classe et volume dans les dimensions du modèle (Figure 17).

Classes de taille	Longueur des troncs L	Diamètre des troncs D	Nombre de troncs, Volume extrême
[-]	[m]	[m]	[-]
A	0.100	0.005	1200
B	0.130	0.006	440
C	0.167	0.008	340
D	0.172	0.008	260
E	0.233	0.012	200
F	0.300	0.015	140
G	0.367	0.018	80
H	0.372	0.010	60
I	0.433 ($=L_M$)	0.022	40
Troncs			2'760
Souches			80
Total			2'840

3.3 MÉTHODOLOGIE

3.3.1 Variation des paramètres

Les paramètres clés ont fait l'objet d'une variation systématique. Un seul paramètre est varié à la fois afin d'estimer son influence. Chaque paramètre possède trois paliers de valeurs distinctes pour en estimer son influence. Les paramètres étudiés ont été choisis en fonction de la littérature étudiée (Chapitre 2) :

- Plusieurs charges ont été choisies dans le canal ($H_1=0.05$ m étant $\chi=0.33$, $H_2=0.10$ m étant $\chi=0.67$ et $H_3=H_D=0.15$ m étant $\chi=1$) et les débits correspondants mesurés. Les trois paliers définis servent comme charge de référence pour les essais. Quelques points intermédiaires entre ces charges ont également été pris en considération pour la validation du modèle.
- Trois largeurs des passes ont été testées, notamment $b=0.175$ m, $b=0.260$ m, et $b=0.335$ m comme largeurs standards (Figure 18). Toutes les passes ont la même largeur pour un essai. Le rapport b/L_M a pour valeur 0.40, 0.60 et 0.77. Dans ce contexte, la distance a entre le râtelier et le front amont du déversoir (Figure 8) varie selon les équations 1 à 4 étant une fonction de la largeur des passes b (et partiellement de la longueur maximale des troncs L_M).
- La variation du volume de bois flottants est décrite dans le chapitre 3.2. Il s'agit d'une arrivée « faible » par groupe de 3 troncs (60 pièces en total), « moyenne » par groupe de 30 troncs (180 pièces en total) et d'un volume « extrême » (2'840 pièces en total). La Figure 20 montre les quantités de bois ajouté au modèle.

Les variations de paramètres, présentées ci-dessus, ont été répétées avec et sans le râtelier partiel dans le but de déterminer son effet (Figure 18 et Figure 19).

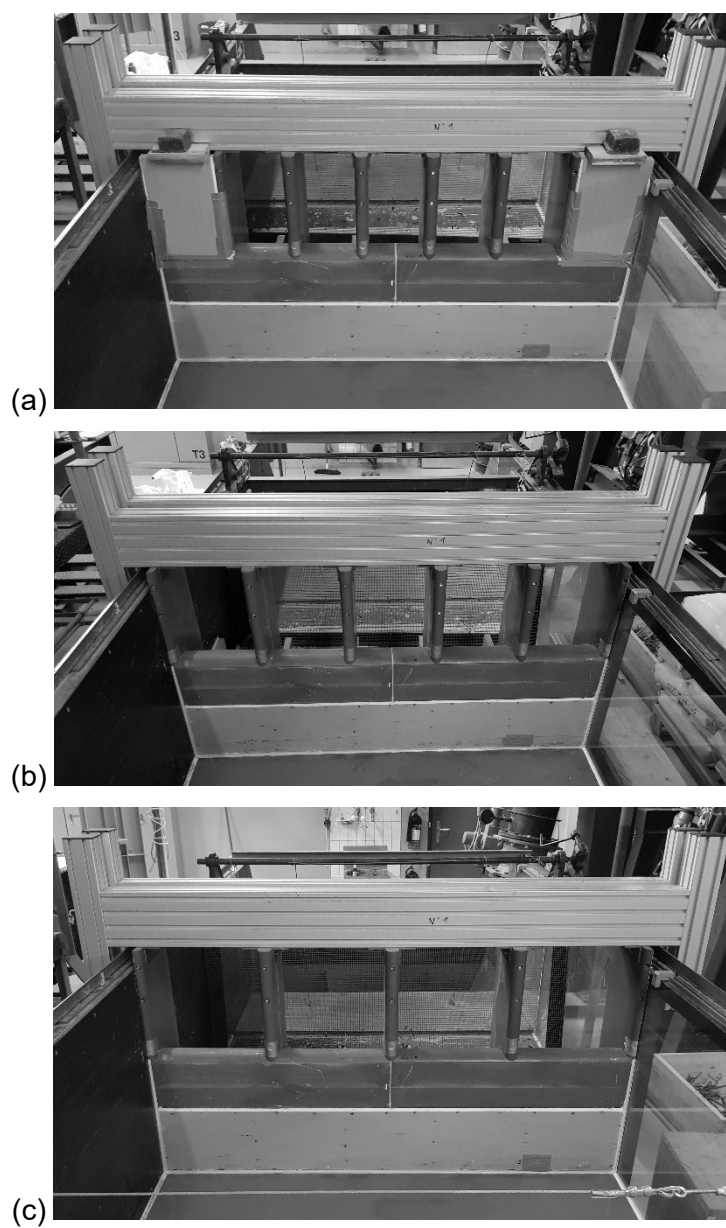


Figure 18. Différence de largeur de passes, $b =$ (a) 0.175 m, (b) 0.260 m, et (c) 0.335 m, sans râtelier.

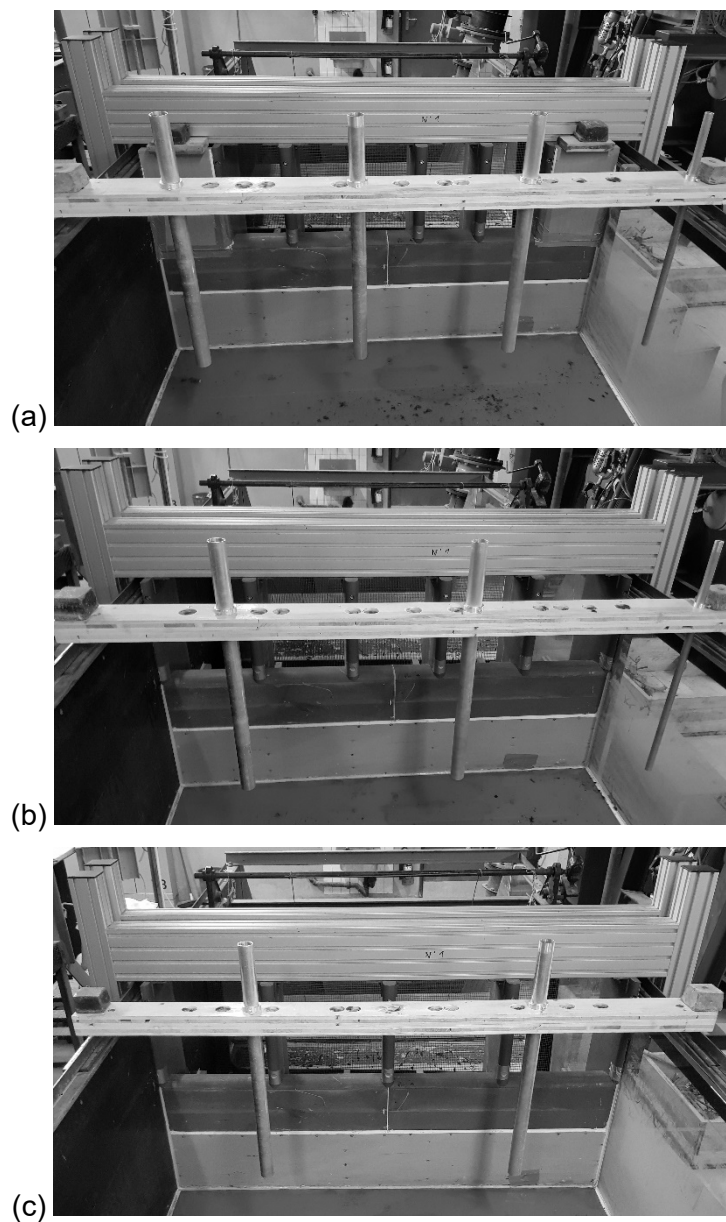


Figure 19. Différence de largeur de passes, $b =$ (a) 0.175 m, (b) 0.260 m, et (c) 0.335 m avec position des barres du râtelier partiel.

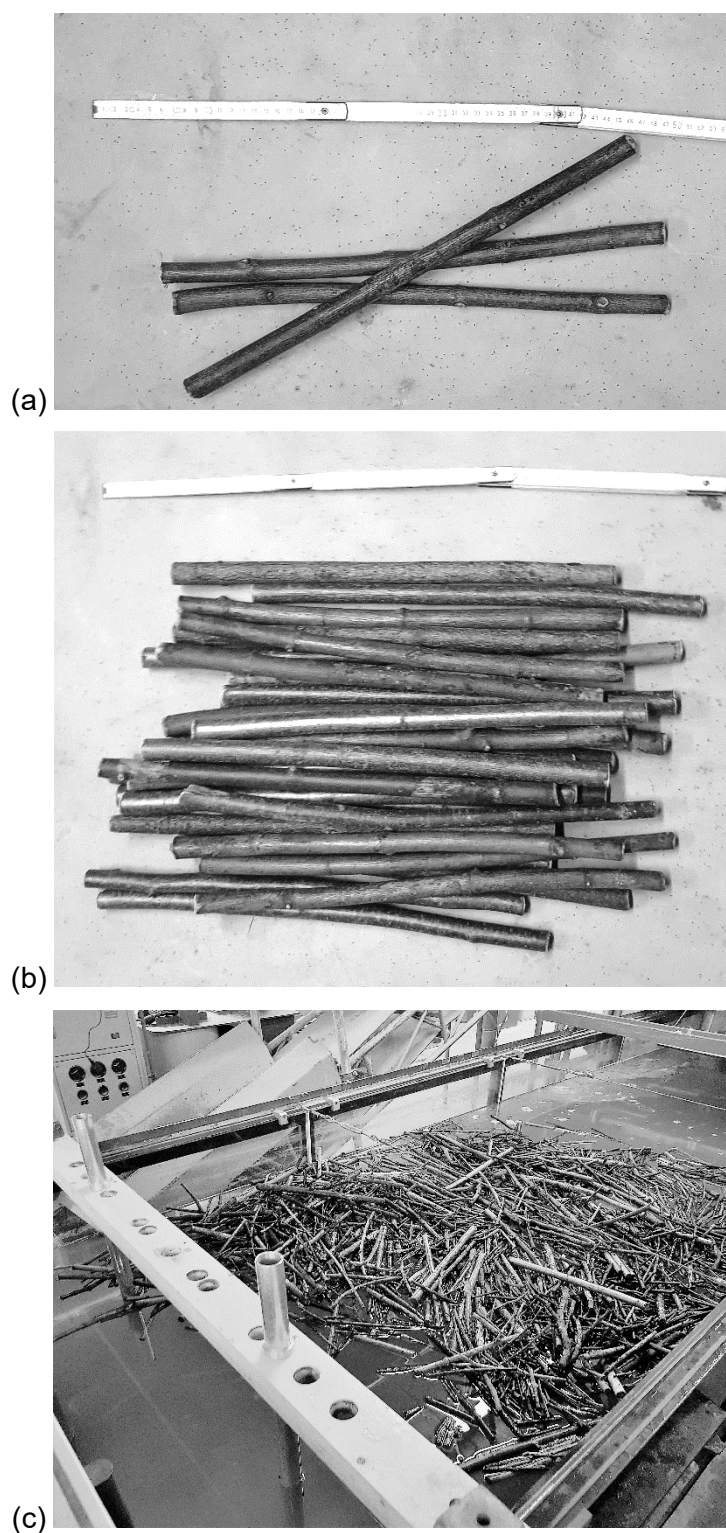


Figure 20. Volumes et types de bois testés, (a) groupe de 3 (60 troncs totaux), (b) groupe de 30 (180 troncs totaux), et (c) volume extrême (Tableau 2)

3.3.2 Programme de tests

Furlan (2019) a recommandé de répéter plusieurs fois des essais identiques sur les bois flottants pour obtenir une pertinence statistique. Le nombre de répétitions nécessaires diminue cependant avec la taille des lots. Le nombre maximum de troncs par lot testé par Furlan (2019) était de 32, pour lesquels 10 répétitions ont été proposées pour satisfaire un intervalle de confiance de 10% concernant la probabilité de blocage. Furlan (2019) a déterminé que lorsque la taille de l'échantillon augmente, la précision de la probabilité de blocage estimée augmente (basé sur la diminution de l'ampleur de l'écart-type).

Les expériences ont montré que l'exactitude de la probabilité de blocage estimée dépend du nombre de répétitions par expérience. D'un point de vue physique, les expériences avec des groupes de troncs de plus en plus nombreux ont plus d'interactions entre les troncs et ceci entraîne des écarts-types plus faibles de l'estimation de blocage. Il s'agit là d'une conclusion avantageuse qui permet de diminuer le nombre de répétitions pour des grands nombres de troncs ajoutés par test, tout en conservant une précision similaire.

Dans cette étude, il a été choisi de faire

- 10 répétitions lorsque le nombre de troncs totaux est de 60 pièces (« **faible** » apparition),
- 5 répétitions pour 180 troncs totaux (« **moyenne** » apparition) et
- 2 répétitions pour un volume extrême (« **extrême** » apparition).

Le programme d'expérience donne la priorité à un paramètre par temps afin d'en comprendre l'effet de chaque paramètre. Les tests peuvent être résumés selon le Tableau 3, 4 et 5. Les tableaux donnent le coefficient de déversoir C_d avec une apparition de bois (selon l'équation 5 et les mesures de Q et H), le coefficient de déversoir de référence C_{dR} sans bois (Vischer et Hager 1999, sur la base de l'équation 6), le taux η de deux comme efficacité (réduite si $\eta < 1$) du déversoir

$$\eta = \frac{C_d}{C_{dR}} \quad (8)$$

et finalement la probabilité de blocage P étant le nombre de troncs bloqués (somme de ceux qui sont bloqués au râtelier et au déversoir) divisée par le nombre de troncs ajoutés en total. L'avancement du râtelier a suite des équations 1 à 4.

Les tableaux suivants donnent les tests effectués avec les paramètres variés et les valeurs mesurées clés. Chaque série de répétition des tests donne la priorité à un paramètre par temps. La procédure des tests diffère légèrement s'il s'agit de l'arrivée par groupe de 3 ou 30 troncs ou du volume extrême.

Tableau 3. Faible apparition de bois flottants, série d'essais de 20 groupes de troncs composés de 3 éléments chacun, valeurs moyenne des 10 répétitions ($p=0$ m).

Test	X Eq. (7) [-]	b/L_M [-]	C_d avec bois Eq. 5 [-]	C_{dR} sans bois Eq. 6 [-]	η Eq. 8 [-]	a Eqs. 1-4 [m]	P [-]
1 .. 10	0.338	0.40	0.406	0.434	0.937	0.40	0.172
11 .. 20	0.670	0.40	0.440	0.468	0.940	0.40	0.160
21 .. 30	1.013	0.40	0.468	0.496	0.944	0.40	0.335
31 .. 40	0.341	0.77	0.412	0.434	0.949	0.27	0.015
41 .. 50	0.668	0.77	0.451	0.468	0.962	0.27	0.002
51 .. 60	1.008	0.77	0.492	0.495	0.994	0.27	0.003
61 .. 70	0.338	0.60	0.399	0.434	0.921	0.35	0.048
71 .. 80	0.669	0.60	0.445	0.468	0.950	0.35	0.073
81 .. 90	1.010	0.60	0.476	0.496	0.960	0.35	0.050
91 .. 100	0.341	0.40	0.381	0.434	0.878	0.00	0.348
101 .. 110	0.672	0.40	0.365	0.469	0.778	0.00	0.495
111 .. 120	1.014	0.40	0.365	0.496	0.736	0.00	0.390
121 .. 130	0.336	0.77	0.392	0.433	0.905	0.00	0.128
131 .. 140	0.668	0.77	0.448	0.468	0.957	0.00	0.022
141 .. 150	1.008	0.77	0.496	0.495	0.989	0.00	0.005
151 .. 160	0.339	0.60	0.399	0.434	0.921	0.00	0.162
161 .. 170	0.670	0.60	0.391	0.468	0.834	0.00	0.240
171 .. 180	1.010	0.60	0.441	0.496	0.890	0.00	0.135
367 .. 376	0.335	0.60	0.389	0.433	0.897	0.13	0.250
377 .. 386	0.673	0.60	0.451	0.469	0.961	0.13	0.388
387 .. 396	1.010	0.60	0.476	0.496	0.961	0.13	0.260
397 .. 406	0.335	0.60	0.395	0.433	0.911	0.24	0.110
407 .. 416	0.672	0.60	0.426	0.469	0.909	0.24	0.192
417 .. 426	1.010	0.60	0.469	0.496	0.947	0.24	0.190

Tableau 4. Moyenne apparition de bois flottants, série d'essais de 6 groupes de troncs composés de 30 éléments chacun, valeurs moyenne des 5 répétitions ($p=0$ m).

Test	X Eq. (7) [-]	b/L_M [-]	C_d avec bois Eq. 5 [-]	C_{dR} sans bois Eq. 6 [-]	η Eq. 8 [-]	a Eqs. 1-4 [m]	P [-]
181 .. 185	0.342	0.40	0.401	0.434	0.923	0.40	0.929
186 .. 190	0.668	0.40	0.445	0.468	0.950	0.40	0.951
181 .. 195	1.014	0.40	0.467	0.496	0.942	0.40	0.937
196 .. 200	0.338	0.77	0.391	0.434	0.902	0.27	0.906
201 .. 205	0.665	0.77	0.438	0.468	0.935	0.27	0.450
206 .. 210	1.008	0.77	0.475	0.495	0.959	0.27	0.421
211 .. 215	0.338	0.60	0.385	0.434	0.887	0.35	0.894
216 .. 220	0.666	0.60	0.416	0.468	0.889	0.35	0.680
221 .. 225	1.010	0.60	0.419	0.496	0.845	0.35	0.457
226 .. 230	0.337	0.40	0.355	0.433	0.818	0.00	0.963

231 .. 235	0.666	0.40	0.381	0.468	0.814	0.00	0.683
236 .. 240	1.014	0.40	0.358	0.496	0.723	0.00	0.759
241 .. 245	0.338	0.77	0.343	0.434	0.792	0.00	0.718
246 .. 250	0.666	0.77	0.405	0.468	0.865	0.00	0.571
251 .. 255	1.008	0.77	0.407	0.495	0.822	0.00	0.283
256 .. 260	0.339	0.60	0.334	0.434	0.771	0.00	0.799
261 .. 265	0.668	0.60	0.363	0.468	0.775	0.00	0.629
266 .. 270	1.010	0.60	0.374	0.496	0.754	0.00	0.727
307 .. 311	0.336	0.60	0.373	0.433	0.861	0.13	0.929
312 .. 316	0.671	0.60	0.434	0.469	0.925	0.13	0.714
317 .. 321	1.010	0.60	0.458	0.496	0.925	0.13	0.806
322 .. 326	0.332	0.60	0.375	0.433	0.866	0.24	0.901
327 .. 331	0.666	0.60	0.415	0.468	0.886	0.24	0.630
332 .. 336	1.010	0.60	0.454	0.496	0.916	0.24	0.749
337 .. 341	0.342	0.77	0.400	0.434	0.922	0.17	0.630
342 .. 346	0.666	0.77	0.440	0.468	0.940	0.17	0.763
347 .. 351	1.008	0.77	0.474	0.495	0.958	0.17	0.357
352 .. 356	0.341	0.77	0.402	0.434	0.926	0.22	0.928
357 .. 361	0.667	0.77	0.430	0.468	0.919	0.22	0.671
362 .. 366	1.008	0.77	0.474	0.495	0.957	0.22	0.389

Tableau 5. Extrême apparition de bois flottants, valeurs moyenne des 2 répétitions. Les numéros de tests en italique : Tests de Pfister et al. 2019 respectivement Bénét et al. 2021 ($p=0$ m).

Test	X Eq. (7) [-]	b/L_M [-]	C_d avec bois Eq. 5 [-]	C_{dR} sans bois Eq. 6 [-]	η Eq. 8 [-]	a Eqs. 1-4 [m]	P [-]
271, 272	0.340	0.40	0.404	0.434	0.931	0.40	1
273, 274	0.667	0.40	0.452	0.468	0.966	0.40	1
275, 276	1.014	0.40	0.478	0.496	0.963	0.40	1
277, 278	0.336	0.77	0.411	0.433	0.949	0.27	1
279, 280	0.664	0.77	0.463	0.468	0.989	0.27	1
281, 282	1.008	0.77	0.495	0.495	0.999	0.27	1
283, 284	0.336	0.60	0.401	0.433	0.925	0.35	1
285, 286	0.666	0.60	0.456	0.468	0.974	0.35	1
287, 288	1.010	0.60	0.484	0.496	0.977	0.35	1
289, 290	0.340	0.40	0.377	0.434	0.869	0.00	1
291, 292	0.667	0.40	0.402	0.468	0.859	0.00	1
293, 294	1.014	0.40	0.416	0.496	0.839	0.00	1
295, 296	0.333	0.77	0.374	0.433	0.863	0.00	1
297, 298	0.662	0.77	0.372	0.468	0.796	0.00	1
299, 300	1.007	0.77	0.383	0.495	0.772	0.00	1
301, 302	0.336	0.60	0.374	0.433	0.864	0.00	1
303, 304	0.668	0.60	0.394	0.468	0.842	0.00	1
305, 306	1.010	0.60	0.416	0.496	0.840	0.00	1

99	0.166	0.77	0.417	0.411	1.000	0.17	1
100	0.262	0.77	0.391	0.424	0.922	0.17	1
101	0.341	0.77	0.422	0.434	0.972	0.17	1
102	0.410	0.77	0.427	0.442	0.967	0.17	1
103	0.471	0.77	0.429	0.449	0.956	0.17	1
104	0.522	0.77	0.441	0.454	0.970	0.17	1
105	0.576	0.77	0.441	0.460	0.960	0.17	1
106	0.626	0.77	0.451	0.464	0.971	0.17	1
107	0.751	0.77	0.471	0.476	0.991	0.17	1
108	0.805	0.77	0.470	0.480	0.978	0.17	1
109	0.885	0.77	0.480	0.486	0.986	0.17	1
110	0.964	0.77	0.482	0.492	0.979	0.17	1
111	1.007	0.77	0.487	0.495	0.983	0.17	1
112	0.335	0.40	0.423	0.433	0.975	0.09	1
113	0.550	0.40	0.449	0.457	0.983	0.09	1
114	0.668	0.40	0.452	0.468	0.966	0.09	1
115	0.825	0.40	0.476	0.482	0.989	0.09	1
116	0.968	0.40	0.463	0.493	0.939	0.09	1
117	1.009	0.40	0.465	0.495	0.939	0.09	1

Tableau 6. Tests supplémentaires (chapitre 4.5, $b/L_M=0.60$) avec une combinaison de surplomb des piliers ($p=0.08$ m) et un râtelier partiel, pour de différentes apparitions des bois.

Test	X Eq. (7) [-]	b/L_M [-]	C_d avec bois Eq. 5 [-]	C_{dR} sans bois Eq. 6 [-]	η Eq. 8 [-]	a Eqs. 1-4 [m]	P [-]	Appari- tion bois
529 .. 538	0.337	0.60	0.404	0.433	0.933	0.00	0.298	faible
539 .. 548	0.668	0.60	0.468	0.468	1.000	0.00	0.397	faible
549 .. 558	1.010	0.60	0.486	0.496	0.980	0.00	0.267	faible
427 .. 436	0.334	0.60	0.406	0.433	0.937	0.24	0.308	faible
437 .. 446	0.672	0.60	0.468	0.469	0.999	0.24	0.172	faible
447 .. 456	1.010	0.60	0.499	0.496	1.007	0.24	0.312	faible
478 .. 487	0.336	0.60	0.411	0.433	0.949	0.35	0.158	faible
488 .. 497	0.670	0.60	0.471	0.468	1.006	0.35	0.170	faible
498 .. 507	1.010	0.60	0.496	0.496	1.000	0.35	0.278	faible
559 .. 563	0.336	0.60	0.389	0.433	0.898	0.00	0.896	moy.
564 .. 568	0.668	0.60	0.462	0.468	0.987	0.00	0.742	moy.
569 .. 573	1.010	0.60	0.483	0.496	0.976	0.00	0.802	moy.
457 .. 461	0.334	0.60	0.402	0.433	0.929	0.24	0.927	moy.
462 .. 466	0.669	0.60	0.471	0.468	1.006	0.24	0.720	moy.
467 .. 471	1.010	0.60	0.493	0.496	0.995	0.24	0.808	moy.
508 .. 512	0.336	0.60	0.405	0.433	0.934	0.35	0.936	moy.
513 .. 517	0.670	0.60	0.469	0.468	1.000	0.35	0.738	moy.
518 .. 522	1.010	0.60	0.498	0.496	1.005	0.35	0.791	moy.
472, 473	0.336	0.60	0.418	0.433	0.965	0.24	1	extrême

474, 475	0.668	0.60	0.471	0.468	1.006	0.24	1	extrême
476, 477	1.010	0.60	0.502	0.496	1.012	0.24	1	extrême
523, 524	0.333	0.60	0.412	0.433	0.952	0.35	1	extrême
525, 526	0.667	0.60	0.474	0.468	1.013	0.35	1	extrême
527, 528	1.010	0.60	0.502	0.496	1.012	0.35	1	extrême

Pour l'arrivée par groupe de 3 ou 30 troncs, la procédure est la suivante :

- Les groupes de 3 ou 30 troncs ($L_M=0.433$ m) sont préalablement préparés à proximité du canal d'essai.
- Un débit souhaité est mis en place dans le canal, il reste constant ($\chi=1/3$, $2/3$ ou $3/3$).
- Les troncs sont mis en place dans le canal par groupe toutes les 10 secondes à environ 2.50 m à l'amont du déversoir. Le 1^{er} groupe est disposé sur la partie gauche du canal, le 2^{ème} au centre, le 3^{ème} sur la partie droite, le 4^{ème} à nouveau à gauche, le 5^{ème} au centre et la même suite logique est appliquée jusqu'à ce que l'ensemble des groupes se retrouvent dans le canal.
- Environ 10 minutes sont laissées après le dernier groupe mis en place pour observer l'interaction entre les groupes de troncs. Le nombre de troncs qui passent est recensé ainsi que la surélévation du niveau d'eau.
- Les essais sont documentés par des photos (vue de dessus) prises toutes les 10 secondes pendant les lancers, puis toutes les 30 secondes lors de la phase de stabilisation. Les mesures sont effectuées et la fiche de test est également remplie à la fin de chaque essai.

Pour l'arrivée du volume extrême, la procédure est la suivante :

- Le volume extrême est préalablement préparé à proximité du canal d'essai.
- Le canal est rempli avec de l'eau aux deux tiers de W (Figure 8), le débit est nul ($Q=0$ m³/s).
- Le volume extrême de bois flottants est ajouté dans le réservoir. Les troncs sont mélangés et brassés pour qu'ils forment un tapis homogène à la surface de l'eau.
- Le débit est ensuite augmenté de manière prudente jusqu'au premier palier théorique correspondant à H_1 (Chapitre 3.3.1).
- Les bois flottants qui franchissent le déversoir est ajouté à l'amont dans le réservoir. Environ dix minutes sont laissées pour que le tout se stabilise. Ainsi, le volume bloqué correspond toujours au volume de bois flottants ajouté.
- Les photographies (vue en plan, vue amont, vue aval et vue latérale) sont prises de manière systématique. Les mesures sont effectuées et la fiche de test est remplie.
- Un essai est donc terminé (par exemple le test 1).
- Le débit est augmenté progressivement jusqu'au deuxième palier qui correspond à H_2 , pour effectuer un essai suivant avec le volume extrême.
- La même procédure est répétée et ce nouvel essai est donc terminé (par exemple le test 2).
- Le débit est augmenté de manière progressive jusqu'à la valeur théoriquement correspondant à H_3 , pour effectuer un essai suivant toujours avec le volume extrême.
- La même procédure est répétée et ce nouvel essai est donc terminé.

Une fiche de test standard a été établie pour répertorier les éléments suivants par test effectué :

- Débit Q [m^3/s]
- Charge H [m]
- Type de volume de bois flottants [-] (60 ou 180 troncs, volume extrême)
- Nombre de passes ouvertes n [-]
- Largeur des passes b [m]
- Nombre de piliers [-]
- Numérotations des photos
- Croquis si nécessaire de la situation
- Nombre et type de troncs franchissant le déversoir
- Configuration du râtelier
- Observations particulières
- Type de troncs responsables du blocage
- Nom de l'opérateur
- Date et heure
- Numéro de l'essai

4 RÉSULTATS

4.1 FAIBLE APPARITION DE BOIS FLOTTANT

Une faible apparition de bois flottants signifie une arrivée à intervalle de temps régulier de 20 groupes de troncs de chacun 3 pièces. Au total 60 troncs sont utilisés pour ce type d'essais. Chaque configuration testée est composée de 10 répétitions. Le Tableau 3 résume l'ensemble des essais pris en considération sous la dénomination « faible » apparition de bois.

Pour rappel, la mise en place d'un râtelier partiel a pour but de favoriser l'alignement partiel des troncs (c'est-à-dire la rotation) qui arrivent au déversoir dans le sens du courant, en particulier des plus grands troncs ($L_M=0.433$ m) afin qu'ils puissent franchir l'évacuateur de crue.

De manière générale, le temps nécessaire aux troncs pour la rotation autour des barres du râtelier est plus élevé lorsque que le débit est faible ($\chi=0.33$), la force du courant est moindre. Dans ce cas précis, les risques d'interaction (voir de blocage) avec le groupe se présentant à la suite au déversoir sont augmentés.

Indépendamment de la configuration testée, les troncs sont « freinés » dans leur élan par les barres de râtelier lorsqu'ils les heurtent pour initier le mouvement de rotation.

La mise en place du râtelier partiel n'évite pas de manière systématique un blocage contre les barres du râtelier ou/et les piliers du déversoir. Les troncs bloqués retiennent en amont les troncs qui arrivent par la suite (Figure 21). Dès que le blocage est créé, il est rare pour les troncs suivants de franchir le déversoir dans la zone où le blocage a eu lieu.

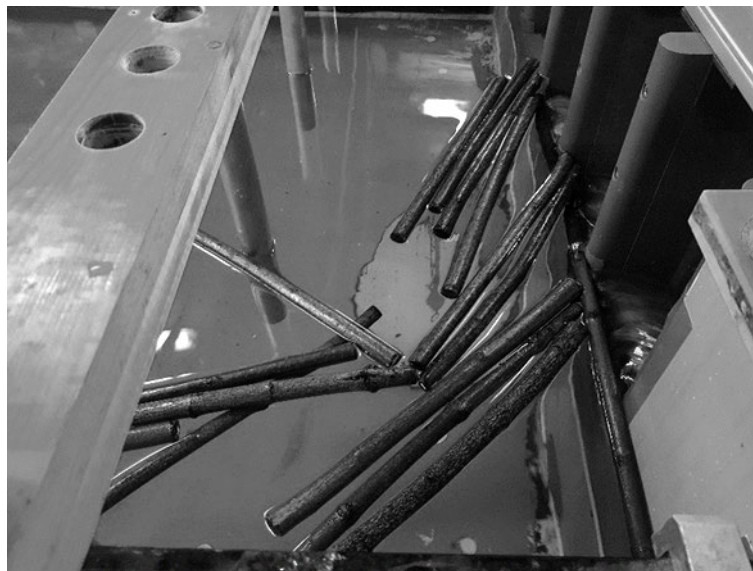


Figure 21. Premiers troncs bloqués contre le râtelier et les piliers qui retiennent les troncs arrivés à la suite (Test 6, position 1 « distant », $b/L_M=0.40$).

Il est nécessaire de souligner la relation entre l'instant où les premiers se bloquent dans l'essai et le nombre total de troncs bloqués, comme suit : si les troncs bloqués apparaissent tôt dans l'essai, le nombre total de troncs bloqués ensuite sera plus important. Cependant, il est à noter

parfois que l'ensemble du tapis s'est débloqué et a franchi le déversoir après quelques minutes de stabilisation.

L'interaction entre les troncs (frottements, chocs, dispositions en plusieurs couches ou différentes orientations, ...) perturbent le mouvement individuel des troncs. Ce phénomène a pour incidence que des troncs se retrouvent bloqués contre les piliers, malgré l'effet de rotation donné préalablement par les barres du râtelier partiel (Figure 22). Comme déjà mentionné, une passe bloquée par un ou plusieurs troncs empêchent fréquemment les troncs suivant de franchir le déversoir. Ce blocage contre les piliers est relativement stable pendant le temps de stabilisation comparé à un blocage contre les barres du râtelier partiel. Une surélévation du niveau d'eau peut être observée.

Les troncs peuvent se retrouver accrochés aux barres du râtelier en forme de « ciseau », une conséquence d'interactions entre les troncs (Figure 23). Parfois ils arrivent à se décrocher par la force du courant ou avec l'interaction des lots de troncs suivants.



Figure 22. Bois bloqués contre les piliers alors que le mouvement de rotation avait été initié par la barre du râtelier partiel (libre de blocage, en arrière-plan, Test 6, position 1 « distant »).

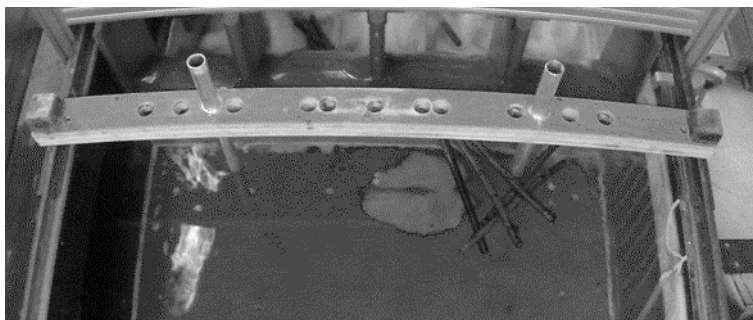


Figure 23. Troncs en "ciseau" contre les barres du râtelier (Test 44, position 1 « distant »).

De manière générale, il est observé que les troncs se bloquent plus fréquemment avec un rapport de passes « étroites » ($b/L_M=0.40$) comparé à des passes « larges » ($b/L_M=0.77$). La stabilité du blocage globale est également liée à la configuration testée. Avec des passes « larges » ($b/L_M=0.77$), le blocage est moins stable qu'avec des passes plus « étroites ». Il est plus fréquent que les troncs peuvent se débloquer au cours du temps de stabilisation. Ils franchissent ainsi le déversoir.

Sans mise en place du râtelier partiel, le blocage se produit directement contre les piliers. Les troncs sont bloqués de manière perpendiculairement aux piliers. Généralement, le tapis formé par les troncs bloqués est plus compact comparé à la mise en place du râtelier. Le blocage a régulièrement lieu sur l'ensemble des passes, comparé à une situation avec râtelier où il ne s'agit que de quelques passes bloquées.

Sans râtelier partiel, le blocage peut s'amplifier très rapidement jusqu'à prendre la forme d'un « mur » de bois contre les piliers (Figure 24). Il est évident que l'écoulement de l'eau est perturbé avec une telle configuration.



Figure 24. « Mur » de bois contre les piliers (Test 112, position 4 sans râtelier).

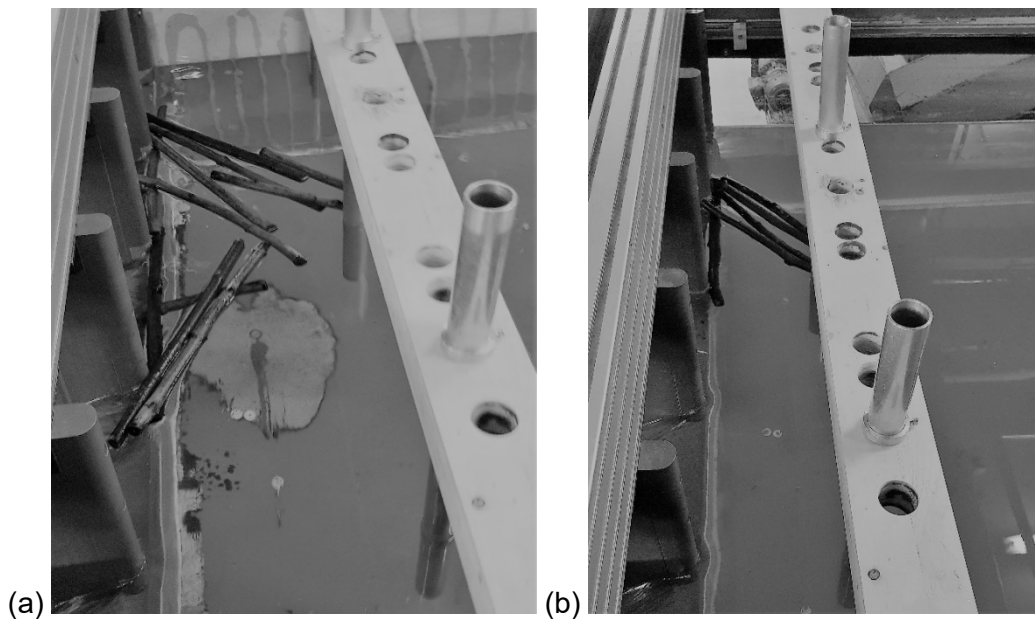


Figure 25. Différence de type de blocage : (a) Position 1 du râtelier avec un blocage transversal (perpendiculaire, Test 64), et (b) position 2 du râtelier avec un blocage en diagonale (Test 112).

Le positionnement du râtelier partiel (Tableau 1, chapitre 3.1.1) modifie la configuration du blocage. La position 1 permet qu'il y ait toujours la dimension maximale des troncs entre la barre du râtelier et le pilier du déversoir. Pour les positions 2 et 3, le râtelier est rapproché du déversoir. Il a été fréquemment observé que pour la position 1 les troncs se bloquent de manière perpendiculaire (Figure 25a) aux piliers, sans influence des barres du râtelier partiel.

Alors que pour les positions 2 et 3, les troncs se retrouvent bloqués en diagonale, c'est-à-dire à la fois appuyé contre une barre du râtelier et contre un pilier (Figure 25b).

4.1.1 Râtelier partiel distant (Position 1)

Les tests 1 à 90 (Tableau 3) représentent cette configuration.

L'efficacité du râtelier pour le passage des troncs est démontrée à la Figure 26 qui représente la probabilité de blocage P en fonction du débit relatif χ pour les trois largeurs de passes testées (a) $b/L_M=0.40$, (b) $b/L_M=0.60$ et (c) $b/L_M=0.77$.

Pour une largeur de passes « étroites » ($b/L_M=0.40$, Figure 26a), il est constaté une augmentation de la probabilité de blocage P en fonction du débit relatif χ . La dispersion des valeurs est également conséquente. En agrandissant la largeur des passes ($b/L_M=0.60$, Figure 26b), la probabilité de blocage P diminue. Elle reste quasiment constante en fonction du débit relatif χ . La dispersion des valeurs se réduit. Pour un rapport de largeur « grand » ($b/L_M=0.77$, Figure 26c), la probabilité de blocage P est quasiment zéro, c'est-à-dire presque tous troncs franchissent le déversoir. Cela est cohérent avec Godtland et Tesaker (1994) car $b/L_M \geq 0.80$ (grande probabilité de passage des bois) est approché.

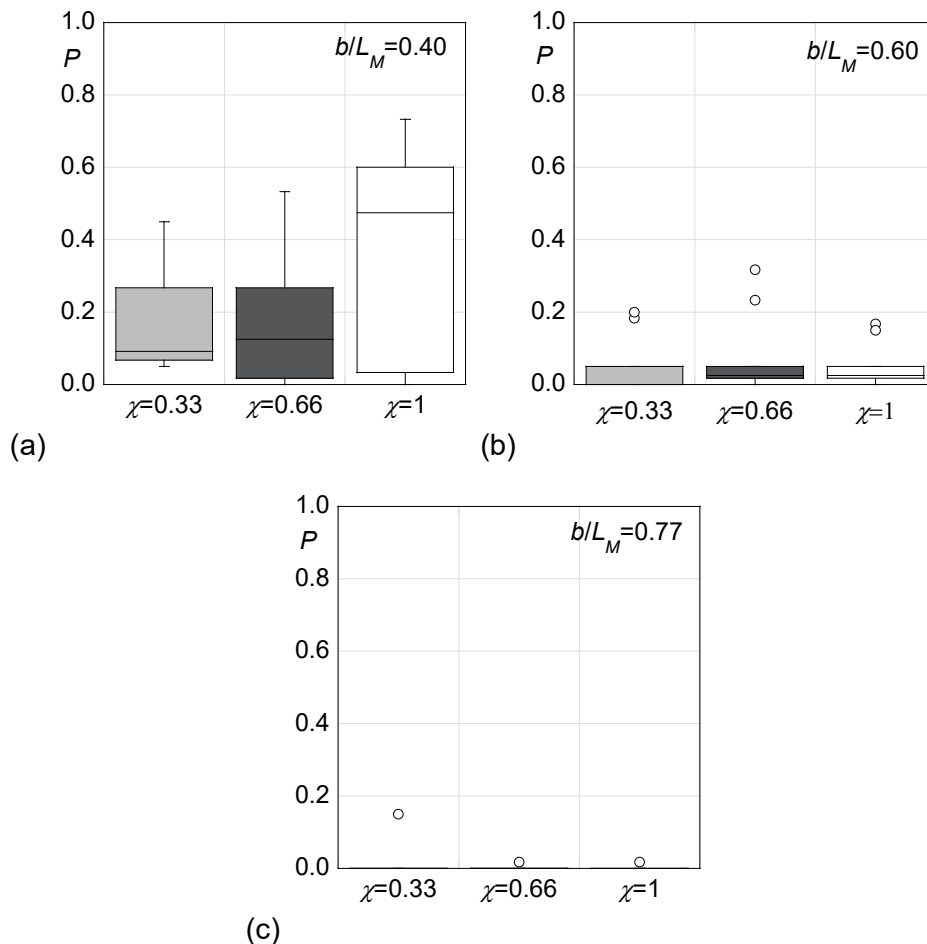


Figure 26. Probabilité de blocage P versus débit relatif χ pour le râtelier partiel distant (Position 1) et une faible apparition de bois flottants : b/L_M =(a) 0.40, (b) 0.60, et (c) 0.77.

La Figure 27 montre l'efficacité hydraulique du déversoir. La Figure 27a exprime le coefficient du déversoir C_d versus débit relatif χ . La courbe de référence de Vischer et Hager (1999, équation 6) sans bois flottants y est représentée. L'efficacité η (équation 8) versus le débit relatif χ est décrit à la Figure 27b.

La dispersion des valeurs est plus grande lorsque que le débit relatif χ augmente. L'influence de la largeur des passes est moindre. L'efficacité η lors de l'ensemble des essais est $\eta > 0.80$, avec une grande partie des valeurs où $\eta > 0.90$.

La Figure 28 montre l'efficacité relative η en fonction de la probabilité de blocage P . Pour des petites probabilités de blocage $P < 0.10$, l'efficacité est grande $\eta > 0.90$. Pour des probabilités $P > 0.10$, l'efficacité est plus dispersée, elle est cependant à $\eta > 0.80$.

Pour le râtelier distant (Position 1), l'efficacité hydraulique au déversoir η est relativement similaire pour les rapports de largeurs testés. Concernant la probabilité de blocage P , un avantage pour un rapport de largeurs « grand » apparaît, qui ne retient quasiment aucun tronc.

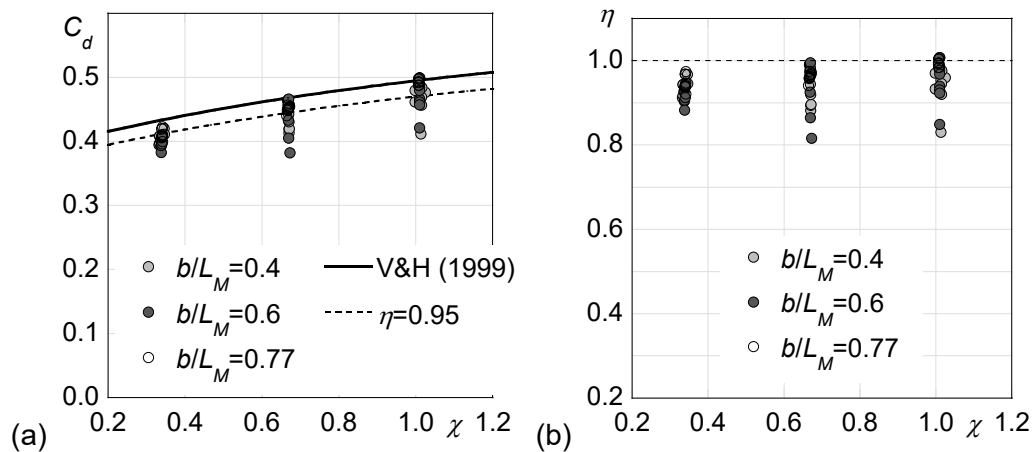


Figure 27. Pour le râtelier partiel distant (Position 1) et une faible apparition de bois flottants : (a) Coefficient du déversoir C_d versus débit relatif χ , et (b) efficacité η versus débit relatif χ .

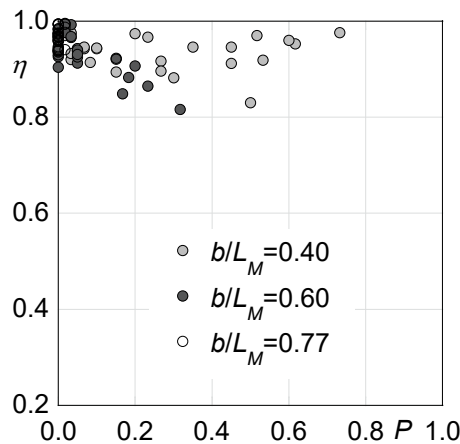


Figure 28. Pour le râtelier distant (Position 1) et une faible apparition de bois flottants : Capacité relative η versus probabilité de blocage P .

4.1.2 Râtelier partiel intermédiaire et proche (Positions 2 et 3)

Les tests 367 à 426 (Tableau 3) représentent cette configuration.

La probabilité de blocage P en fonction du débit relatif χ est représenté à la Figure 29 pour un rapport $b/L_M=0.60$. La position intermédiaire (Position 2) est visible à la Figure 29a et la position proche (Position 3) à la Figure 29b.

Il est constaté que la probabilité de blocage P est plus grande pour la position proche (Position 3) comparé à position intermédiaire (Position 2). Les valeurs sont également plus dispersées. La probabilité de blocage P varie en fonction du débit relatif χ . Le palier ($\chi=0.66$) présente la plus grande probabilité de blocage P . Cette distinction est valable pour les deux positions de râtelier testées.

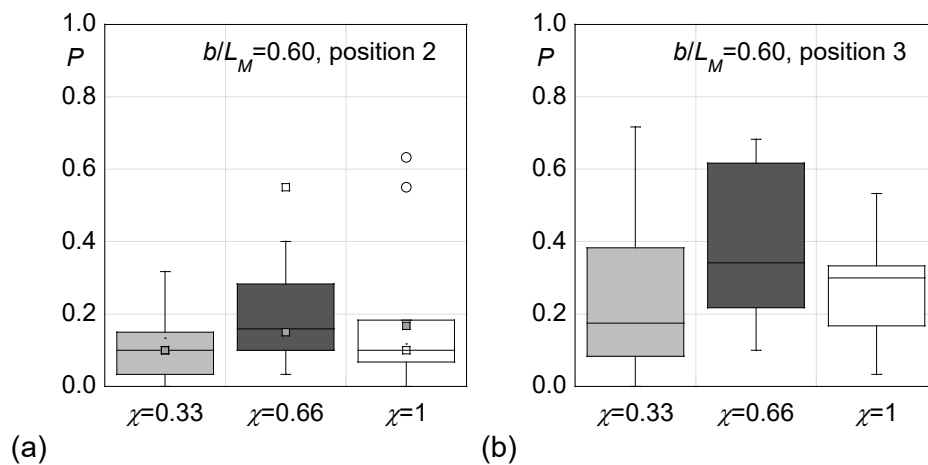


Figure 29. Probabilité de blocage P versus débit relatif χ pour $b/L_M=0.60$ et une faible apparition de bois flottants. Position du râtelier : (a) intermédiaire (position 2), et (b) proche (position 3).

La Figure 30 montre l'efficacité hydraulique du déversoir pour les positions intermédiaire et proche du râtelier. La Figure 30a exprime le coefficient du déversoir C_d versus débit relatif χ . La courbe de référence de Vischer et Hager (1999, équation 6) sans bois flottants y est représentée. L'efficacité η versus le débit relatif χ est décrit à la Figure 30b.

La dispersion des valeurs augmente en fonction du débit relatif χ . L'efficacité η semble s'améliorer avec un débit relatif χ plus important. Cette remarque est recevable pour les deux positions de râtelier. L'amélioration de l'efficacité η peut s'expliquer par le fait que la probabilité de blocage P est plus faible au palier $\chi=1$ (Figure 29).

L'efficacité relative η versus la probabilité de blocage P est représentée à la Figure 31. L'efficacité relative est $\eta > 0.85$ pour l'ensemble des tests pris en considération dans cette analyse. Aucune différence marquée est visible entre les deux positions de râtelier testées.

Un comportement similaire au niveau de la capacité hydraulique entre le râtelier intermédiaire et proche (Positions 2 et 3) peut être observé. Cependant, le râtelier intermédiaire (position 2) présente une probabilité de blocage P inférieure.

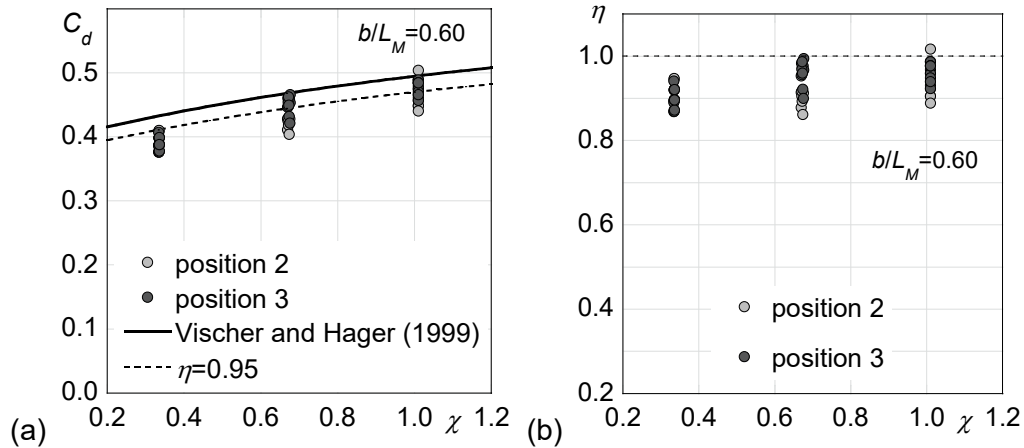


Figure 30. (a) Coefficient du déversoir C_d et (b) efficacité η , les deux versus débit relatif χ , pour $b/L_M=0.60$ et une faible apparition de bois flottants. Position du râtelier intermédiaire (position 2) et proche (position 3).

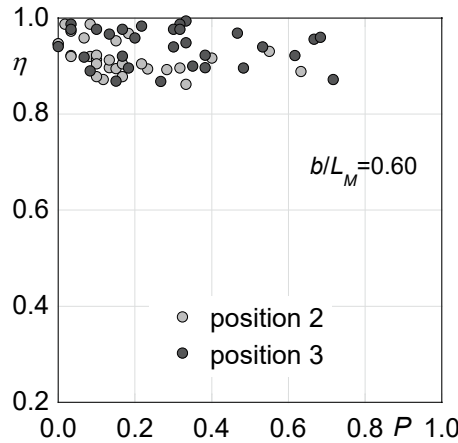


Figure 31. (a) Capacité relative η versus probabilité de blocage P , pour $b/L_M=0.60$ et une faible apparition de bois flottants. Position du râtelier : (a) intermédiaire (position 2), et (b) proche (position 3).

4.1.3 Sans râtelier (Position 4)

Les tests 91 à 180 (Tableau 3) représentent cette configuration.

La Figure 32 montre la probabilité de blocage P en fonction du débit relatif χ pour les trois rapports de largeurs de passes testés (a) $b/L_M=0.40$, (b) $b/L_M=0.60$ et (c) $b/L_M=0.77$. La variation des rapports de largeurs change le comportement de blocage des troncs.

À la Figure 32a ($b/L_M=0.40$), la dispersion des valeurs diminue en fonction du débit relatif χ . Le palier $\chi=0.66$ présente la plus grande probabilité de blocage P , en moyenne. À la Figure 32b ($b/L_M=0.60$), Le palier $\chi=0.66$ présente la plus grande probabilité de blocage P et la plus grande dispersion des valeurs. À la Figure 32c ($b/L_M=0.77$), la probabilité de blocage P et la dispersion des valeurs diminue avec l'augmentation du débit relatif χ . Cette configuration présente une faible probabilité de blocage P comparée aux deux autres configurations testées.

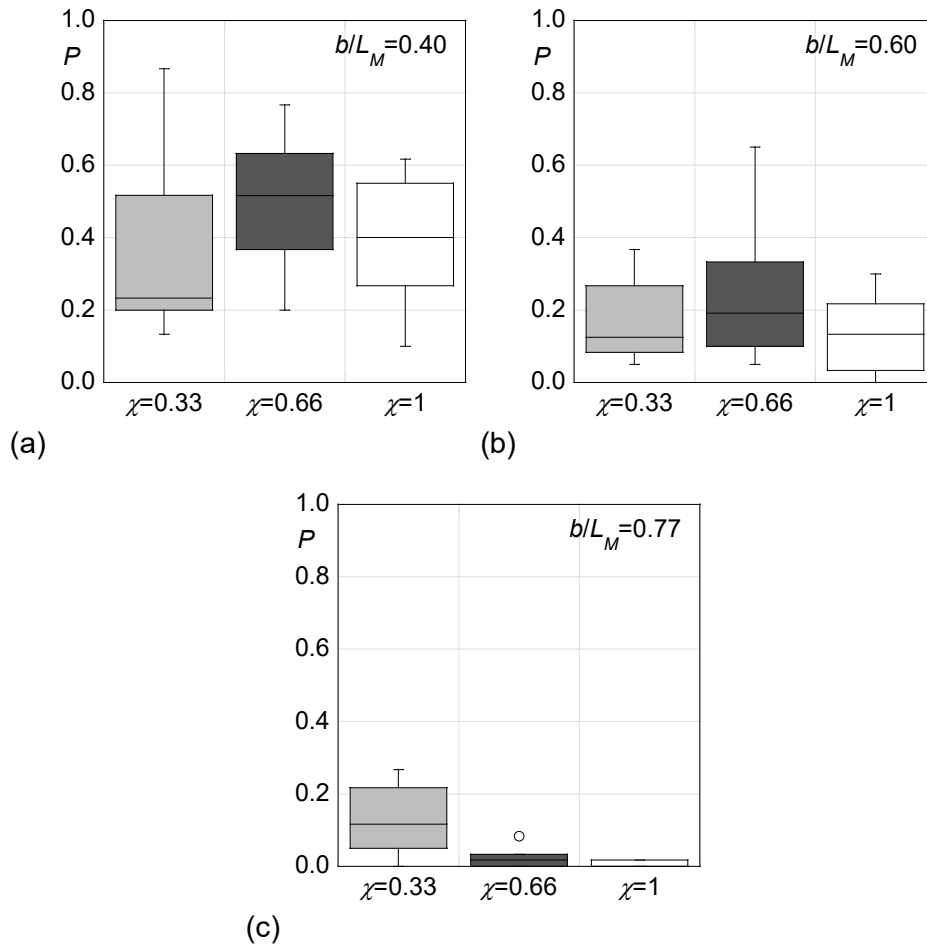


Figure 32. Probabilité de blocage P versus débit relatif χ sans râtelier et pour une faible apparition de bois flottants : b/L_M =(a) 0.40, (b) 0.60, et (c) 0.77.

La Figure 33a montre le coefficient du déversoir C_d versus débit relatif χ . La courbe de référence de Vischer et Hager (1999, équation 3) sans bois flottants y est représentée. L'efficacité η versus débit relatif χ est décrite à la Figure 33b.

Le coefficient du déversoir C_d (Figure 33a), respectivement l'efficacité η (Figure 33b), diminue avec l'augmentation du débit relatif χ . Ces analyses sont indépendantes des rapports de largeurs de passes testés. Le rapport de largeur $b/L_M=0.40$ présente des coefficients du déversoir C_d , respectivement l'efficacité η , plus faible comparé aux deux rapports de largeur.

La Figure 34 représente l'efficacité η versus probabilité de blocage P . Une tendance semble perceptible, l'efficacité η diminue en fonction de l'augmentation de la probabilité de blocage P . Le rapport de largeur $b/L_M=0.77$ présente de faibles probabilités de blocage P pour de grandes efficacités η , alors que $b/L_M=0.40$ montre de grandes probabilités de blocage P pour de petites efficacités η .

La variation du rapport de largeurs a une influence sur la probabilité de blocage P et sur l'efficacité η . L'augmentation du débit relatif χ provoque une dispersion plus grande des valeurs et une diminution de l'efficacité η , de manière générale.

La configuration $b/L_M=0.77$ présente une probabilité de blocage P plus faible et une meilleure efficacité η rapporté aux deux autres configurations.

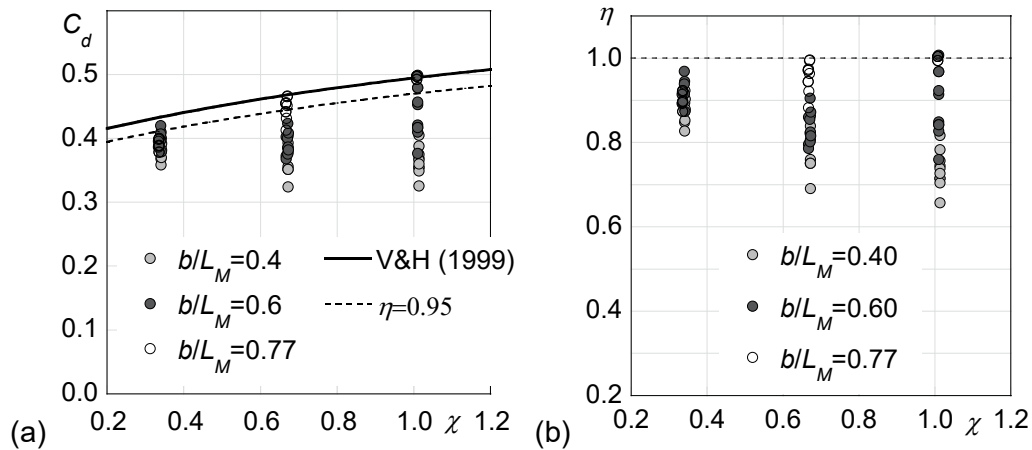


Figure 33. Sans râtelier et pour une faible apparition de bois flottants : (a) Coefficient du déversoir C_d versus débit relatif χ , et (b) efficacité η versus débit relatif χ .

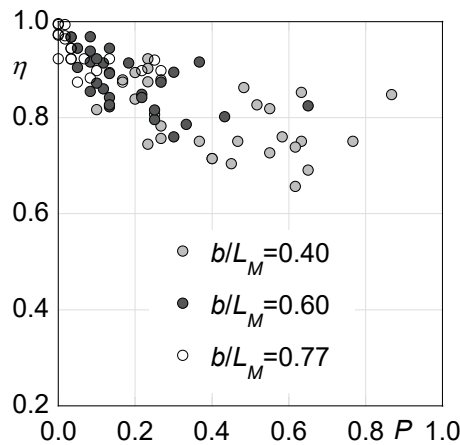


Figure 34. Sans râtelier et pour une faible apparition de bois flottants : Capacité relative η versus probabilité de blocage P .

4.2 MOYENNE APPARITION DE BOIS FLOTTANT

Une moyenne apparition de bois flottants signifie une arrivée à intervalle de temps régulier de 6 groupes de troncs de chacun 20 pièces. 180 troncs au total sont donc utilisés pour ce type d'essais. Chaque configuration identique est composée de 5 répétitions. Le Tableau 4 résume l'ensemble des essais pris en considération sous la dénomination moyenne apparition de bois flottants.

Des observations sont semblables au chapitre 4.1 :

- Lorsque le débit est faible ($\chi=0.33$), le temps nécessaire aux troncs pour la rotation autour des barres du râtelier est plus élevé, due à la « faible » force du courant. Le blocage qui en résulte est donc plus important.
- Indépendamment de la configuration testée, les troncs sont « freinés » dans leur élan par les barres de râtelier lorsqu'ils les heurtent pour initier le mouvement de rotation.

- Les troncs bloqués retiennent en amont les troncs qui arrivent par la suite sous forme de tapis. Il est nécessaire de souligner la relation entre l'instant où les premiers se bloquent dans l'essai et le nombre total de troncs bloqués.
- L'interaction entre les troncs (frottements, chocs, dispositions en plusieurs couches ou différentes orientations, ...) perturbent le mouvement individuel des troncs.
- Sans mise en place du râtelier partiel, le blocage se produit directement contre les piliers. Les troncs sont bloqués de manière perpendiculairement aux piliers. Le blocage peut s'amplifier très rapidement jusqu'à prendre la forme d'un « mur » de bois contre les piliers.

Les groupes qui arrivent se retrouvent généralement plus bloqué au râtelier et peu contre les piliers, indépendamment de la configuration testée. Les interactions entre eux sont plus fortes car la taille du groupe est plus importante (30 pièces). Par conséquent, il est difficile pour le groupe en entier de s'orienter grâce aux barres du râtelier. Point positif, le déversoir se retrouve alors peu obstrué, voire libre de blocage.

Le tapis formé par les troncs bloqués est généralement clairsemé avec des faibles débits ($\chi=0.33$) et se compacte de plus en plus avec des débits plus élevés.



Figure 35. Blocage contre les barres du râtelier partiel (Test 211).

4.2.1 Râtelier partiel distant (Position 1)

Les tests 181 à 225 (Tableau 4) représentent cette configuration.

La Figure 36 montre la probabilité de blocage P en fonction du débit relatif χ pour les trois rapports de largeurs de passes testés b/L_M = (a) 0.40, (b) 0.60 et (c) 0.77.

À la Figure 36a ($b/L_M=0.40$), la probabilité de blocage P est très grande, sans être fonction du débit relatif χ . La dispersion des valeurs est faible et ne varie pas avec le débit relatif χ . À la Figure 36b ($b/L_M=0.60$), la probabilité de blocage P diminue avec l'augmentation du débit relatif χ , alors que la dispersion des valeurs augmente. À la Figure 36c ($b/L_M=0.77$), les constatations sont identiques que pour la Figure 36b. La dispersion des valeurs pour le palier $\chi=0.66$ est très élevée.

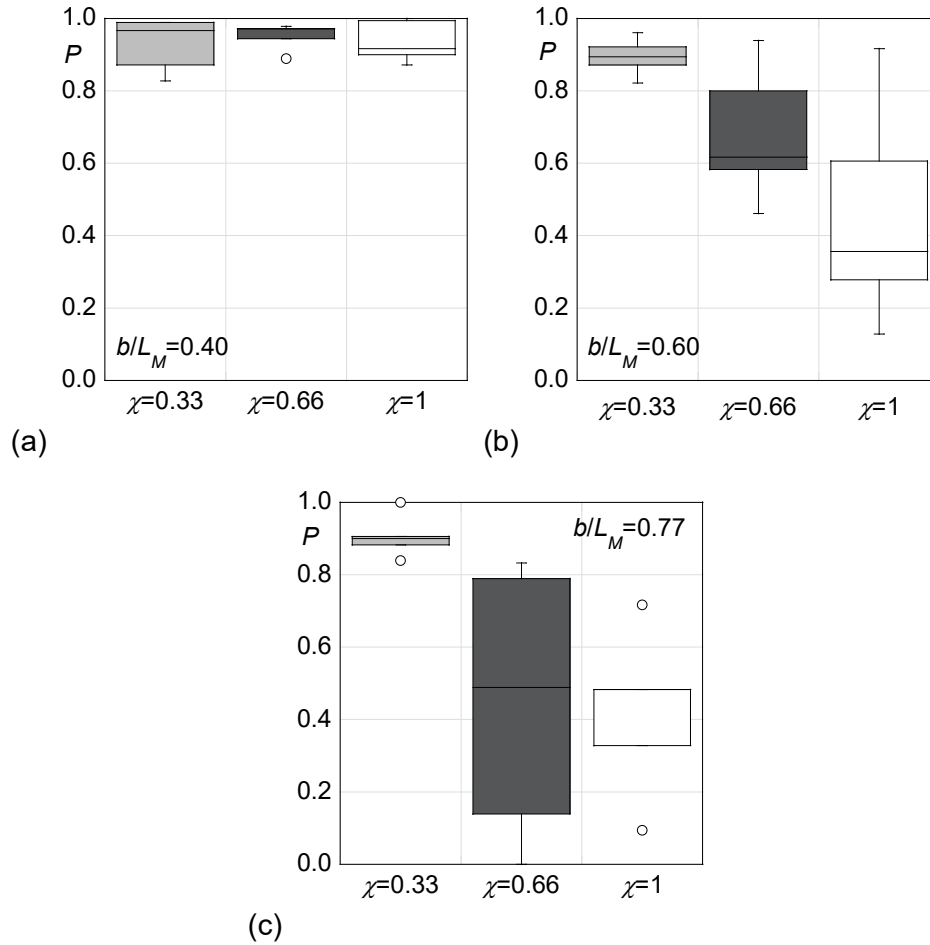


Figure 36. Probabilité de blocage P versus débit relatif χ pour le râtelier partiel distant (Position 1) et une moyenne apparition de bois flottants : b/L_M =(a) 0.40, (b) 0.60, et (c) 0.77.

La Figure 37a représente le coefficient du déversoir C_d versus le débit relatif χ , et la Figure 37b l'efficacité η versus le débit relatif χ . Il est observé que la dispersion des valeurs augmente en fonction du débit relatif χ alors que coefficient du déversoir C_d et l'efficacité η diminue avec l'augmentation du débit relatif χ . La configuration $b/L_M=0.60$ présente une efficacité η légèrement inférieure aux autres configurations.

La Figure 38 représente l'efficacité η versus la probabilité de blocage P . L'efficacité η reste constante en fonction de la probabilité de blocage P . La configuration $b/L_M=0.60$ présente une efficacité η plus faible que la configuration $b/L_M=0.77$.

De manière générale, la largeur relative $b/L_M=0.77$ présente une probabilité de blocage P plus faible et une meilleure efficacité η comparé aux deux autres largeurs relatives testées.

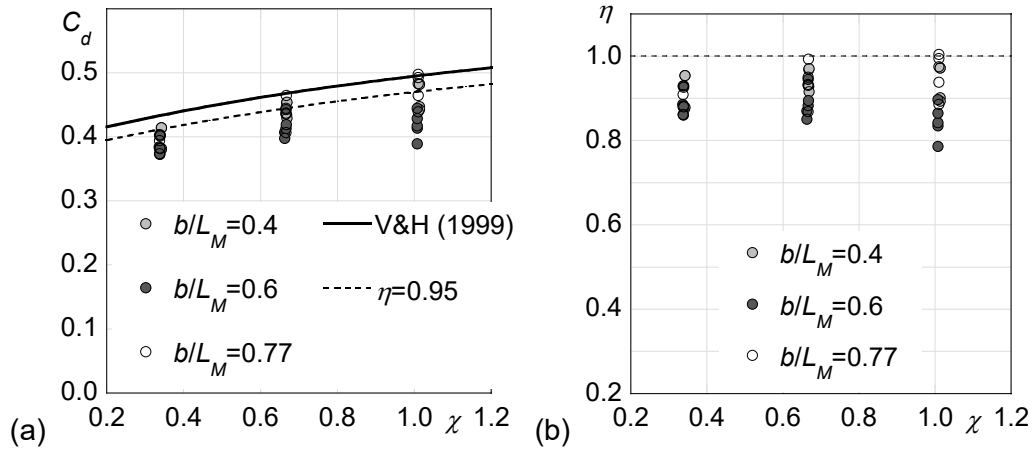


Figure 37. Pour le râtelier partiel distant (Position 1) et une moyenne apparition de bois flottants : (a) Coefficient du déversoir C_d versus débit relatif χ , et (b) efficacité η versus débit relatif χ .

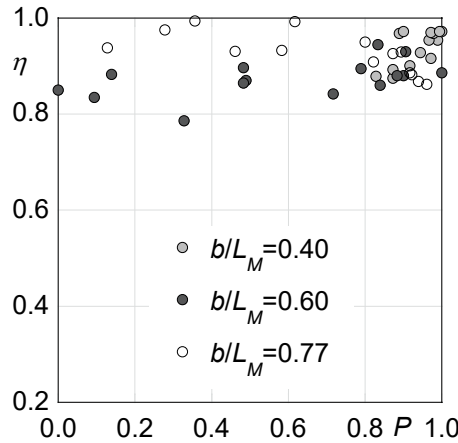


Figure 38. Pour le râtelier distant (Position 1) et une moyenne apparition de bois flottants : Capacité relative η versus probabilité de blocage P .

4.2.2 Râtelier partiel intermédiaire (Position 2)

Les tests 322 à 336 avec $b/L_M = 0.60$, et les tests 352 à 366 avec $b/L_M = 0.77$ (Tableau 4) représentent cette configuration.

La Figure 39 exprime la probabilité de blocage P en fonction du débit relatif χ . Pour $b/L_M = 0.60$ (Figure 39a), le palier $\chi = 0.66$ présente la plus faible probabilité de blocage P et la plus grande dispersion de valeurs. Une tendance de diminution de la probabilité de blocage P avec l'augmentation du débit relatif χ peut être suggérée. Pour $b/L_M = 0.77$ (Figure 39b), une diminution de la probabilité de blocage P avec l'augmentation du débit relatif χ est identifiée ainsi qu'une plus grande dispersion des valeurs.

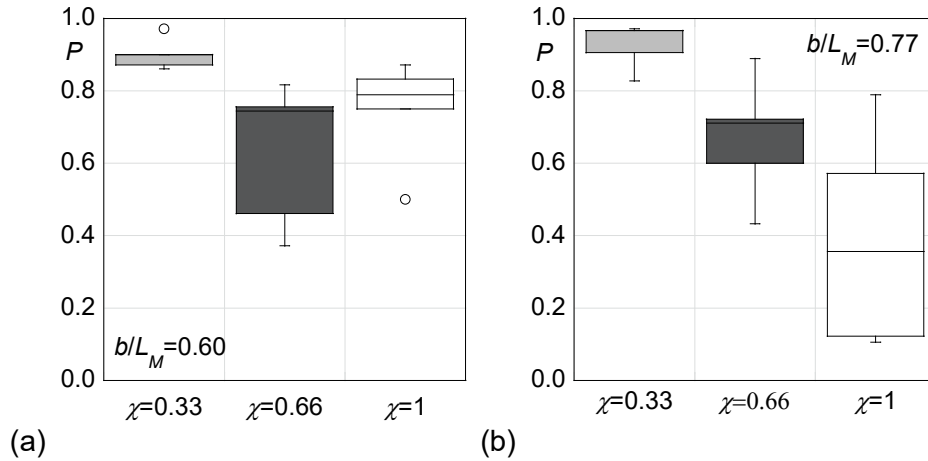


Figure 39. Probabilité de blocage P versus débit relatif χ pour le râtelier partiel intermédiaire (Position 2) et une moyenne apparition de bois flottants : b/L_M =(a) 0.60, et (b) 0.77.

La Figure 40a représente le coefficient du déversoir C_d versus le débit relatif χ , et la Figure 40b l'efficacité η versus le débit relatif χ . La largeur relative $b/L_M=0.77$ présente un coefficient du déversoir C_d , respectivement une efficacité η , légèrement supérieure comparé à $b/L_M=0.60$, de manière indépendante au débit relatif χ . L'efficacité η tend vers une constante pour les deux largeurs relatives testées.

À la Figure 41, l'efficacité η est représentée versus la probabilité de blocage P . L'efficacité η reste plus au moins constante en fonction de la probabilité de blocage P . La largeur relative $b/L_M=0.77$ est relativement plus efficace que $b/L_M=0.60$.

Pour la râtelier intermédiaire (Position 2), la largeur relative $b/L_M=0.77$ présente une probabilité de blocage P plus faible et une meilleure efficacité η que $b/L_M=0.60$.

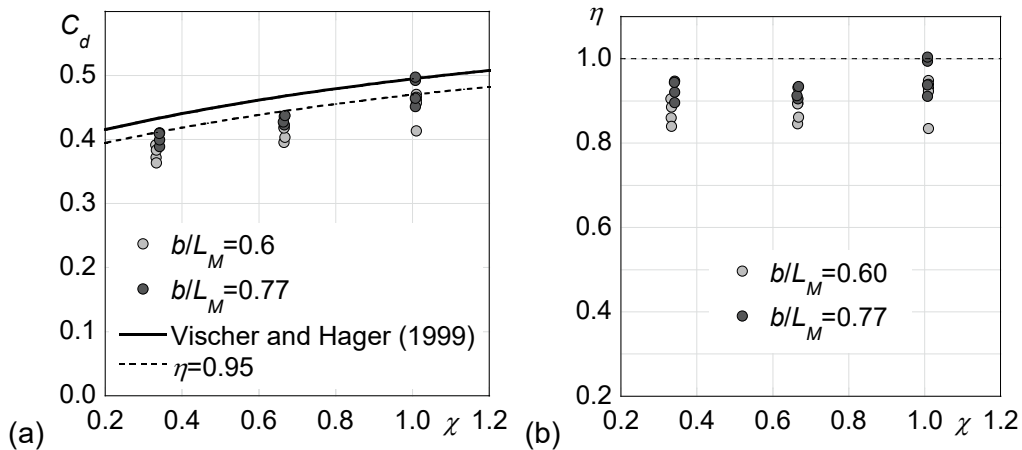


Figure 40. Pour le râtelier partiel intermédiaire (Position 2) et une moyenne apparition de bois flottants : (a) Coefficient du déversoir C_d versus débit relatif χ , et (b) efficacité η versus débit relatif χ .

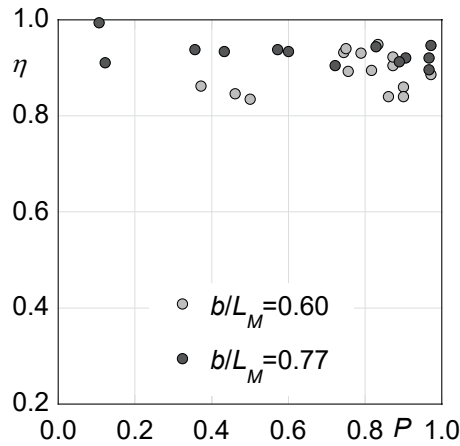


Figure 41. Pour le râtelier intermédiaire (Position 2) et une moyenne apparition de bois flottants : Capacité relative η versus probabilité de blocage P .

4.2.3 Râtelier partiel proche (Position 3)

Les tests 307 à 321 avec $b/L_M=0.60$, et les tests 337 à 351 avec $b/L_M=0.77$ (Tableau 4) représentent cette configuration.

La Figure 42 montre la probabilité de blocage P en fonction du débit relatif χ , pour $b/L_M=0.60$ à la Figure 42a et pour $b/L_M=0.77$ à la Figure 42b.

À la Figure 42a, la probabilité de blocage P diminue légèrement avec l'augmentation du débit relatif χ , corrélée avec une plus grande dispersion des valeurs. Pour $\chi=0.66$, la probabilité de blocage P est la plus faible. Pour la Figure 42b, les constatations sont identiques avec une probabilité de blocage P plus faible pour $\chi=1$. Il faut noter la grande dispersion de valeurs pour $\chi=0.33$ et $\chi=1$.

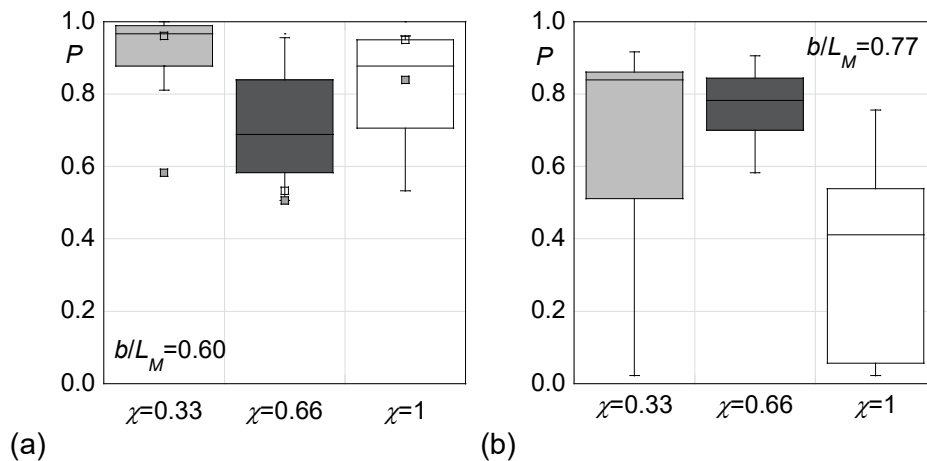


Figure 42. Probabilité de blocage P versus débit relatif χ pour le râtelier partiel proche (Position 3) et une moyenne apparition de bois flottants : b/L_M =(a) 0.60, et (b) 0.77.

La Figure 42a représente le coefficient du déversoir C_d versus le débit relatif χ , et la Figure 42b l'efficacité η versus le débit relatif χ . La largeur relative $b/L_M=0.77$ possède un meilleur coefficient du déversoir C_d et une meilleure efficacité η comparé à $b/L_M=0.60$. L'efficacité η reste plus ou moins constante en fonction du débit relatif χ .

L'efficacité η versus la probabilité de blocage P est montrée à la Figure 44. L'efficacité η tend vers une constante en fonction de la probabilité de blocage P . Peu de distinctions peuvent être faite entre les deux largeurs relatives testées, avec un léger mieux pour $b/L_M=0.77$.

Concernant le râtelier proche (Position 3), la même tendance que pour le râtelier intermédiaire semble ressortir avec un avantage pour $b/L_M=0.77$. En effet, la largeur relative $b/L_M=0.77$ présente une probabilité de blocage P plus faible et une meilleure efficacité η que $b/L_M=0.60$.

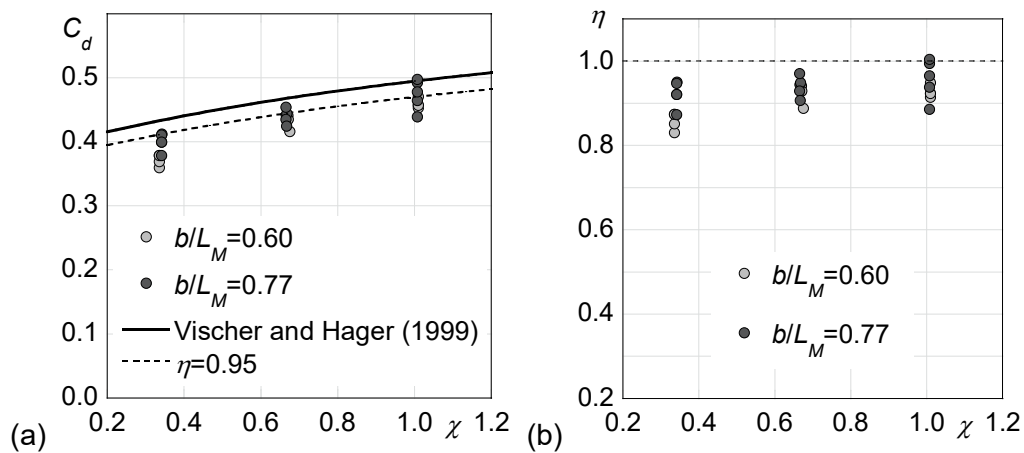


Figure 43. Pour le râtelier partiel proche (Position 3) et une moyenne apparition de bois flottants : (a) Coefficient du déversoir C_d versus débit relatif χ , et (b) efficacité η versus débit relatif χ .

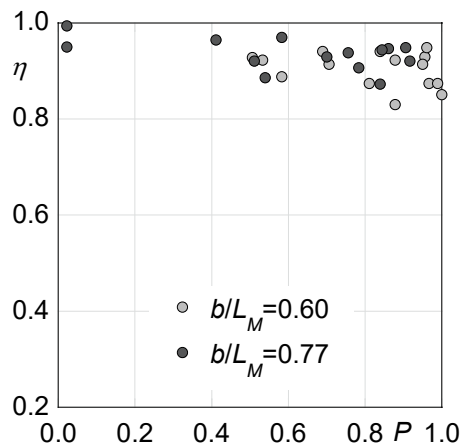


Figure 44. Pour le râtelier proche (Position 3) et une moyenne apparition de bois flottants : Capacité relative η versus probabilité de blocage P .

4.2.4 Sans râtelier (Position 4)

Les tests 226 à 270 (Tableau 4) représentent cette configuration.

La Figure 45 montre la probabilité de blocage P en fonction du débit relatif χ . La dispersion des valeurs est plus grande avec l'augmentation du débit relatif χ . Une influence de la largeur relative b/L_M est mise en évidence.

À la Figure 45a pour $b/L_M=0.40$, la probabilité de blocage P varie en fonction du débit relatif χ . Pour $\chi=0.66$, il y a une faible probabilité de blocage P , rapportée aux deux autres débits relatifs χ . À la Figure 45b pour $b/L_M=0.60$, la probabilité de blocage P diminue de manière presque linéaire avec l'augmentation du débit relatif χ . À la Figure 45c pour $b/L_M=0.77$, la probabilité de blocage P diminue de manière presque linéaire avec l'augmentation du débit relatif χ , de manière plus prononcée que pour $b/L_M=0.66$.

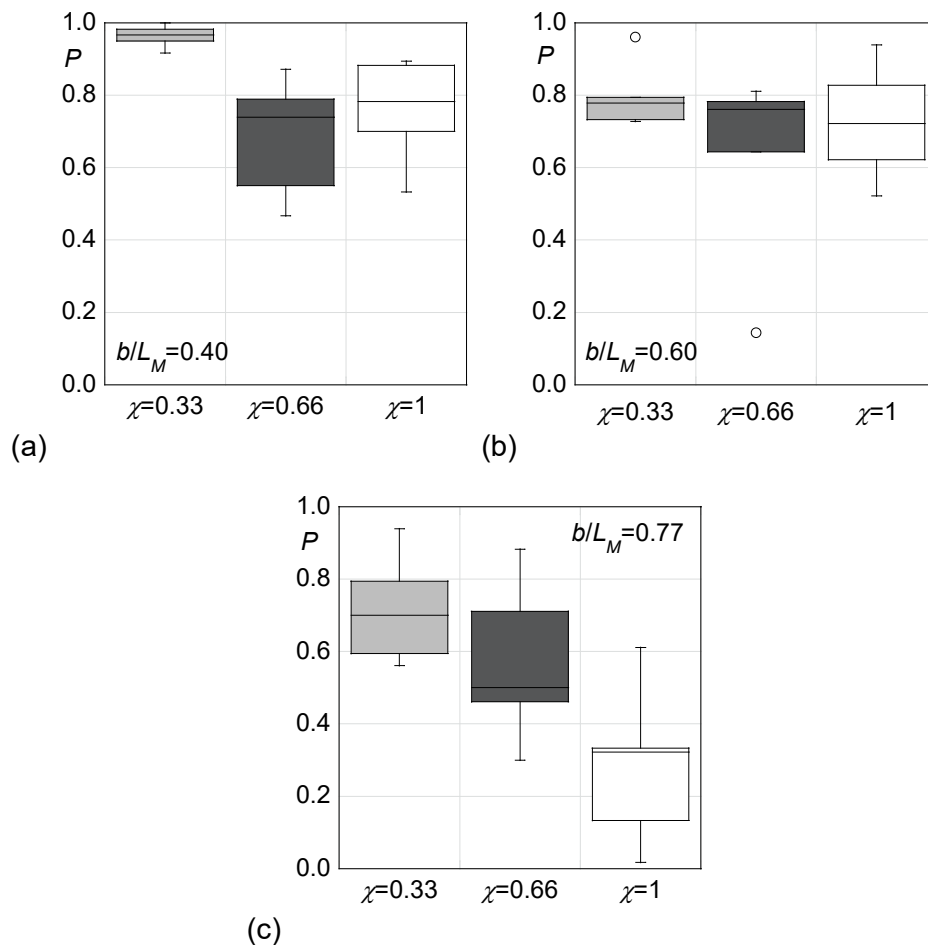


Figure 45. Probabilité de blocage P versus débit relatif χ sans râtelier (Position 4) et pour une moyenne apparition de bois flottants : b/L_M =(a) 0.40, (b) 0.60, et (c) 0.77.

Le coefficient du déversoir C_d en fonction du débit relatif χ est représenté à la Figure 46a. La courbe de référence de Vischer et Hager (1999, équation 3) sans bois flottants y est représentée. L'efficacité η versus le débit relatif χ est montré à la Figure 46b.

Une diminution du coefficient du déversoir C_d , respectivement de l'efficacité η , est visible par rapport à une situation sans bois flottants. La dispersion des valeurs augmente en fonction

du débit relatif χ . La largeur relative $b/L_M=0.77$ semble légèrement montrer un meilleur coefficient du déversoir C_d et une meilleure efficacité η comparé aux deux autres largeurs relatives.

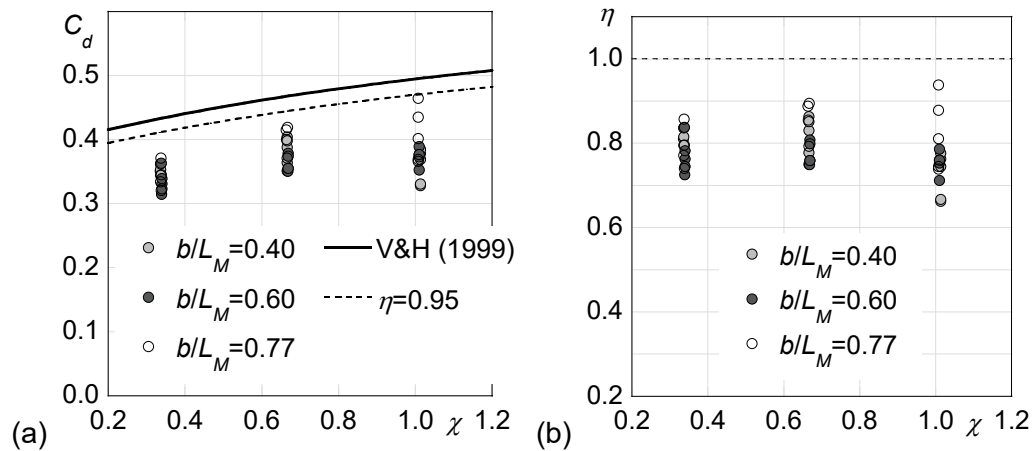


Figure 46. Sans râtelier (Position 4) et pour une moyenne apparition de bois flottants : (a) Coefficient du déversoir C_d versus débit relatif χ , et (b) efficacité η versus débit relatif χ .

La Figure 47 montre l'efficacité η en fonction de la probabilité de blocage P . Une diminution de l'efficacité η liée à une augmentation de la probabilité de blocage P semble être corrélée. La largeur relative $b/L_M=0.77$ montre une meilleure efficacité η comparé aux autres largeurs relatives b/L_M , indépendamment de la variation de la probabilité de blocage P .

Sans râtelier (Position 4), une diminution de l'efficacité η est observée dès qu'un blocage de troncs se produit au déversoir. La largeur relative $b/L_M=0.77$ possède une plus faible probabilité de blocage P et une meilleure efficacité η comparativement aux autres largeurs relatives b/L_M testées.

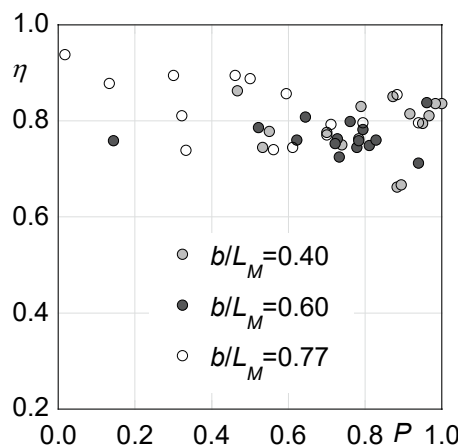


Figure 47. Sans râtelier (Position 4) et pour une moyenne apparition de bois flottants : Capacité relative η versus probabilité de blocage P .

4.3 EXTRÊME APPARITION DE BOIS FLOTTANT

Une extrême apparition de bois flottants signifie l'arrivée d'un volume extrême de bois flottants (Tableau 2). Chaque configuration est composée de 2 répétitions. Le Tableau 5 résume l'ensemble des essais pris en considération sous la dénomination extrême apparition de bois flottants. Les données des tests pour le râtelier proche (position 3) proviennent de Pfister et al. (2019) et Bénet et al. (2021).

La probabilité de blocage P tend vers 1. En effet, le nombre de troncs franchissant le déversoir est très faible comparé au volume total. Un blocage complet a donc lieu.

Avec une arrivée extrême de bois flottants, les interactions entre les troncs sont très importantes. Le râtelier partiel n'arrive pas à jouer son rôle d'orientation des troncs. L'ensemble du volume de bois flottants se retrouvent bloqués contre les barres du râtelier sous la forme d'un tapis. Il se peut que quelques troncs arrivent à se détacher du volume et franchissent le déversoir ou se bloquent contre les piliers.

Il est observé que la compacité du tapis formé par les troncs bloqués varie en fonction du débit. Le tapis est généralement clairsemé avec les faibles débits ($\chi=0.33$), c'est-à-dire qu'il y a de l'espace entre les troncs. En augmentant le débit ($\chi=0.66$ et $\chi=1$), le tapis se compacte de plus en plus et les espaces se referment entre les troncs.

L'augmentation du débit permet au volume dans son ensemble de s'avancer en direction du déversoir. Par conséquent, les troncs se posent contre les piliers du déversoir dans le cas où il n'y pas de barres de râtelier devant le pilier. Cette observation est, de manière générale, plus fréquente pour les rapports de passes « larges » ($b/L_M=0.77$).



Figure 48. Blocage des troncs contre les barres du râtelier avec un déversoir libre (Test 284).



Figure 49. Avancement des troncs contre les piliers du déversoir (Test 284).

4.3.1 Râtelier partiel distant (Position 1)

Les tests 271 à 288 (Tableau 5) représentent cette configuration.

La Figure 50a exprime le coefficient du déversoir C_d en fonction du débit relatif χ . La courbe de référence de Vischer et Hager (1999, équation 3) sans bois flottants y est représentée. L'efficacité η versus le débit relatif χ est décrit à la Figure 50b.

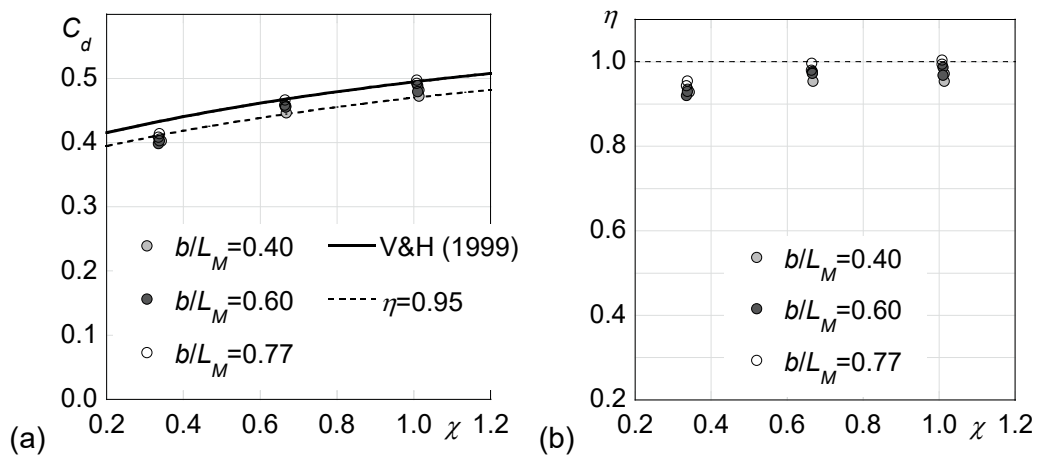


Figure 50. Pour le râtelier partiel distant (position 1) et une extrême apparition de bois flottants : (a) Coefficient du déversoir C_d versus débit relatif χ , et (b) efficacité η versus débit relatif χ .

La dispersion des valeurs est très faible. Aucune influence de la largeur relative b/L_M peut être conclue. Une légère augmentation de l'efficacité η en fonction de l'augmentation du débit relatif χ peut être soulignée. Avec le râtelier distant (Position 1), l'efficacité η semble très peu modifiée. Pfister et al. (2019) et Bénét et al. (2021) ont démontré que la variation de la largeur relative b/L_M n'a pas d'influence majeure sur l'efficacité η .

4.3.2 Râtelier partiel proche (Position 3)

Les tests 99 à 117 (Tableau 5) représentent cette configuration.

Pour cette analyse, les données des études de Pfister et al. (2019) et Bénét et al. (2021) sont reprises. La Figure 51a exprime le coefficient du déversoir C_d en fonction débit relatif χ . La courbe de référence de Vischer et Hager (1999, équation 3) sans bois flottants y est représentée. L'efficacité η versus le débit relatif χ est décrit à la Figure 51b. Comme pour le râtelier distant (Position 1), le coefficient du déversoir C_d et l'efficacité η semblent très peu perturbés. La variation de la largeur relative b/L_M semble avoir peu d'effet sur les résultats.

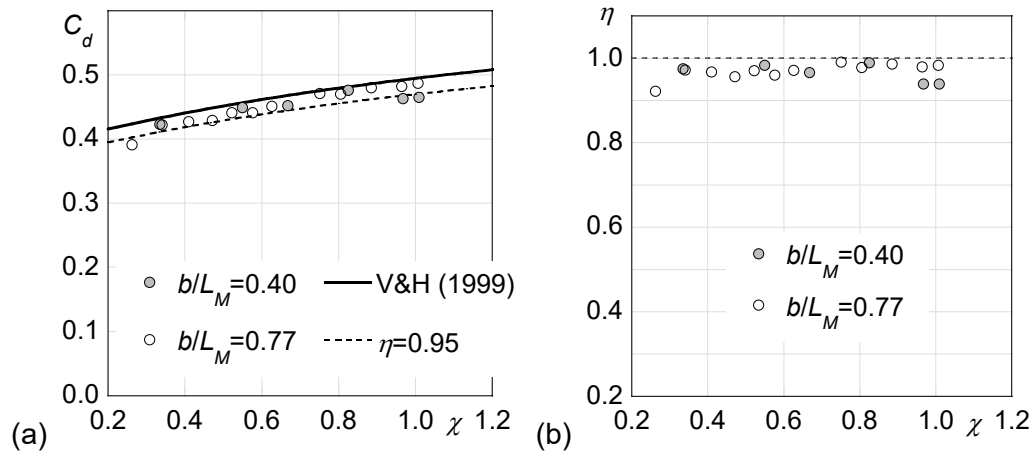


Figure 51. Pour le râtelier partiel proche (Position 3) et une extrême apparition de bois flottants : (a) Coefficient du déversoir C_d versus débit relatif χ , et (b) efficacité η versus débit relatif χ .

4.3.3 Sans râtelier (Position 4)

Les tests 289 à 306 (Tableau 5) représentent cette configuration.

La Figure 52a exprime le coefficient du déversoir C_d en fonction du débit relatif χ . La courbe de référence de Vischer et Hager (1999, équation 3) sans bois flottants y est représentée. L'efficacité η versus le débit relatif χ est décrit à la Figure 52b.

Le blocage d'un volume extrême de bois flottants perturbe l'écoulement aux évacuateurs de crue selon Pfister et al. (2019) et Bénét et al. (2021). Le coefficient du déversoir C_d est réduit par rapport à une situation sans bois flottants (Figure 52a). L'efficacité η est également moindre et tend vers une constante (Figure 52b). La variation de la largeur relative b/L_M semble avoir peu d'effet sur les résultats.

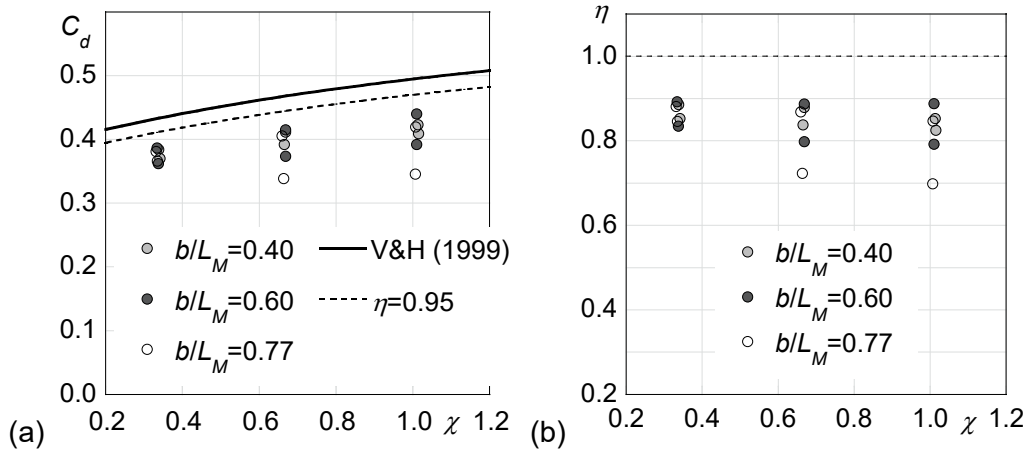


Figure 52. Sans râtelier (Position 4) et une extrême apparition de bois flottants : (a) Coefficient du déversoir C_d versus débit relatif χ , et (b) efficacité η versus débit relatif χ .

4.4 PERFORMANCE TRANSVERSALE DU RÂTELIER PARTIEL

La performance des râteliers partiels est analysée en parallèle avec deux indicateurs clés, le passage (respectivement le blocage) des bois et l'efficacité hydraulique résiduelle des évacuateurs de crue. Il est important de connaître la position a (Figure 8) du râtelier la plus optimale qui répond aux deux critères précédemment cités.

Pfister et al. (2019) et Bénét et al. (2021) ont montré que l'avancement du râtelier en amont de la crête du déversoir a (équations 1 à 4) est un paramètre caractéristique, s'il est normalisé avec la charge de référence H_R sans bois (selon Vischer et Hager 1999).

Cette étude a testé quatre positions de râtelier différentes pour en connaître l'influence :

- Position 1 : râtelier distant (équation 1)
- Position 2 : râtelier intermédiaire (équation 2)
- Position 3 : râtelier proche (équation 3)
- Position 4 : sans râtelier (équation 4)

4.4.1 Faible apparition de bois flottants

La Figure 53a (ensemble des valeurs) et Figure 53b (valeurs moyennes) montre la probabilité de blocage P en fonction de a/H_R pour les quatre positions de râtelier partiels testées. La Figure 53c (ensemble des valeurs) et d (valeurs moyennes) illustre l'efficacité relative η versus a/H_R pour les quatre positions de râtelier partiels testées.

L'ensemble des valeurs (Figure 53a) indique une grande dispersion, comme attendu dans la thématique des bois flottants, mais montre une tendance. Un effet favorable pour le passage des bois flottants est visible (réduction de P). La mise en place d'un râtelier favorise le passage des bois flottants pour $a/H_R \leq 6$. Au-delà de $a/H_R \geq 6$, la probabilité de blocage P augmente à nouveau avec la disposition d'un râtelier partiel. En moyenne (Figure 53b), la probabilité de blocage P diminue avec un râtelier partiel (pour $a/H_R < 6$).

En parallèle, l'efficacité relative η (Figure 53c et d) est maintenue avec la mise en place d'un râtelier partiel comparé à une situation sans râtelier. En moyenne, l'efficacité est supérieure à $\eta \geq 0.9$ avec un râtelier (sans râtelier : $0.75 < \eta < 1$). Le positionnement du râtelier a n'a pas de grandes influences sur les résultats.

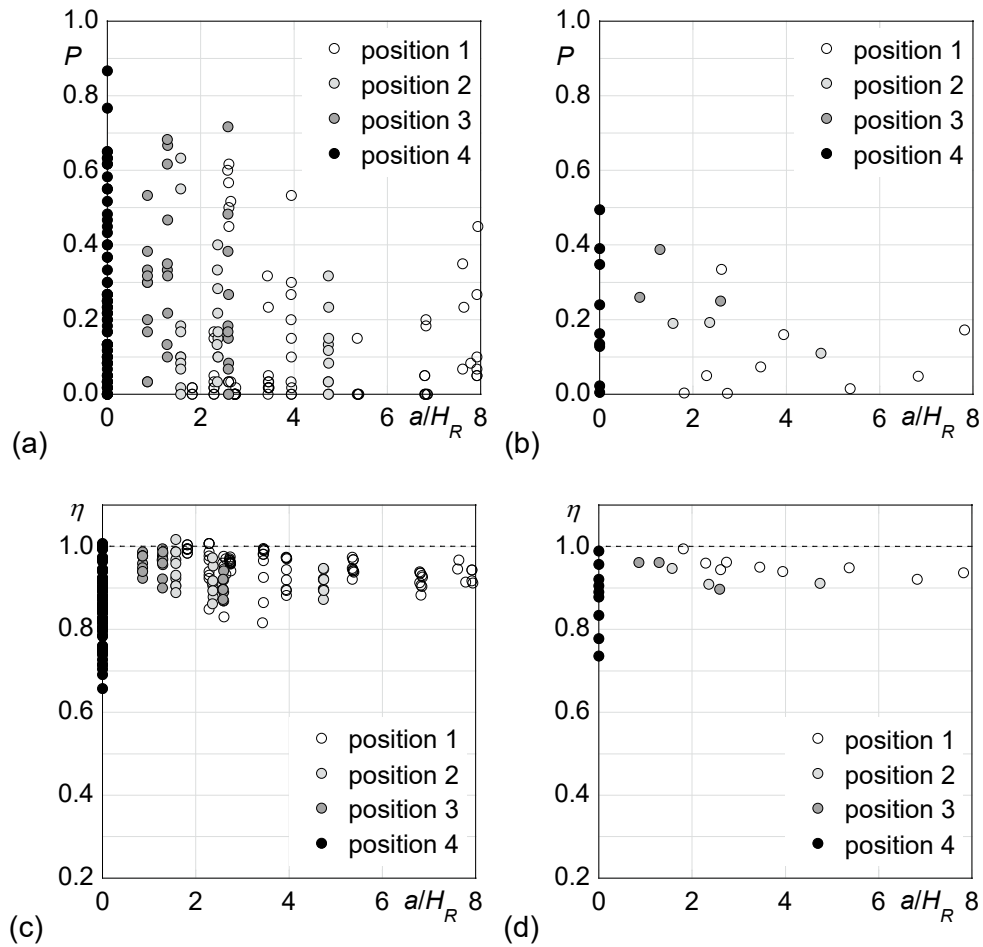


Figure 53. Pour une faible apparition de bois et un râtelier partiel : P versus a/H_R avec (a) tous les tests, et (b) moyenne des répétitions, et η versus a/H_R avec (c) tous les tests, et (d) moyenne des répétitions.

Comme déjà mentionné au Chapitre 4.1, la probabilité de blocage P est plus faible avec un rapport b/L_M élevé sous une faible apparition de bois flottants.

En principe, le râtelier partiel fonctionne assez bien sous une telle accumulation de bois flottants, par rapport à la situation sans râtelier. Beaucoup de bois flottants ont franchi le déversoir et les performances hydrauliques de l'évacuateur de crue sont largement maintenues

Le Tableau 7 résume les taux d'efficacité η moyens (équation 8) et les probabilités de blocage P moyennes par géométrie (largeur relative des passes b/L_M et position 1 à 4 du râtelier, chapitre 3.1.1). Les valeurs de η et de P des trois débits ($\chi=0.33$, 0.67 et 1) testés par géométrie ont également été moyennées, à la suite du fait qu'un évacuateur de crue subit potentiellement toute la gamme des débits. Le tableau donne pareillement le nombre de tests effectués par géométrie, se basant sur la recommandation de Furlan (2019, chapitre 3.3.2).

Tableau 7. Récapitulation de l'efficacité η (équation 8) et de la probabilité de blocage P pour une faible apparition de bois flottants et pour toutes les conditions testées.

	Pos.	$b/L_M [-]$			Moyenne	Nombre de tests
		0.40	0.60	0.77		
η	1	0.94	0.94	0.97	0.95	90
	2		0.92		0.92	30
	3		0.94		0.94	30
	4	0.80	0.88	0.95	0.88	90
P	1	0.22	0.06	0.01	0.10	90
	2		0.16		0.16	30
	3		0.30		0.30	30
	4	0.41	0.18	0.05	0.21	90

Le Tableau 7 montre, pour une faible apparition des bois uniquement, que :

- des passes larges ($b/L_M=0.77$) montrent la meilleure performance relative en ce qui concerne l'efficacité $\eta=0.97$ et 0.95 (valeur maximale) et la meilleure probabilité de blocage $P=0.01$ et 0.05 (valeur minimale), indépendamment de la position du râtelier partiel (même sans râtelier, position 4).
- si l'installation d'un râtelier est nécessaire (p.ex. pour éviter une surélévation de la retenue lors de l'apparition de volumes extrêmes) ou si les passes sont étroites ($b/L_M<0.77$), celui-ci doit être « distant » des piliers (idéalement sur la position 1, alternativement sur la 2). L'efficacité reste ainsi haute et la probabilité de blocage faible, comme voulu pour le râtelier distant.
- l'installation du râtelier sur la position 1 ou 2 augmente le passage des bois, par rapport à l'absence de râtelier (position 4). Globalement, un facteur de 2.1-fois est visible (de $P=0.21$ à 0.10) si le râtelier est distant (position 1) et de 1.3-fois pour la position 2 (de $P=0.21$ à 0.16), comparé à la situation sans râtelier (position 4).
- Un râtelier proche (position 3) maintient une grande capacité $\eta=0.94$ (sans râtelier $\eta=0.88$), mais génère un blocage plus élevé ($P=0.30$, comparé à $P=0.21$ sans râtelier).

4.4.2 Moyenne apparition de bois flottants

La Figure 54a (ensemble des valeurs) et b (valeurs moyennes) montre la probabilité de blocage P en fonction de a/H_R pour les quatre positions de râtelier partiels testées. La Figure 54c (ensemble des valeurs) et d (valeurs moyennes) illustre l'efficacité relative η versus a/H_R pour les quatre positions de râtelier partiels testées. La position 1 correspond à un râtelier distant, la position 2 à un râtelier intermédiaire, la position 3 à un râtelier proche et la position 4 est sans râtelier.

Concernant la probabilité de blocage P , une grande dispersion des valeurs est visible (Figure 54a). Une grande quantité de bois flottants reste accumulée au râtelier lui-même. Cette situation est à déplorer d'un côté pour l'écologie (passage des bois). D'un autre côté, les bois flottants retenus au râtelier sont bénéfiques pour la sécurité du barrage.

Malgré la grande dispersion des valeurs, il est constaté que pour $a/H_R \geq 4$, la probabilité reste supérieure à $P \geq 0.80$, ce qui n'est pas souhaitable pour le passage des bois flottants, indépendamment de la position a du râtelier. En moyenne (Figure 54b), le râtelier distant (Position 1) montre la plus faible probabilité de blocage $0.40 < P < 0.70$ pour $a/H_R < 4$, en comparaison des autres positions testées.

En parallèle, l'efficacité relative η (Figure 54d) est supérieure à $\eta \geq 0.85$ en moyenne avec la présence d'un râtelier partiel. La position a du râtelier n'a peu d'effet sur cette efficacité. Sans râtelier, l'efficacité est réduite entre $0.70 < \eta < 0.90$.

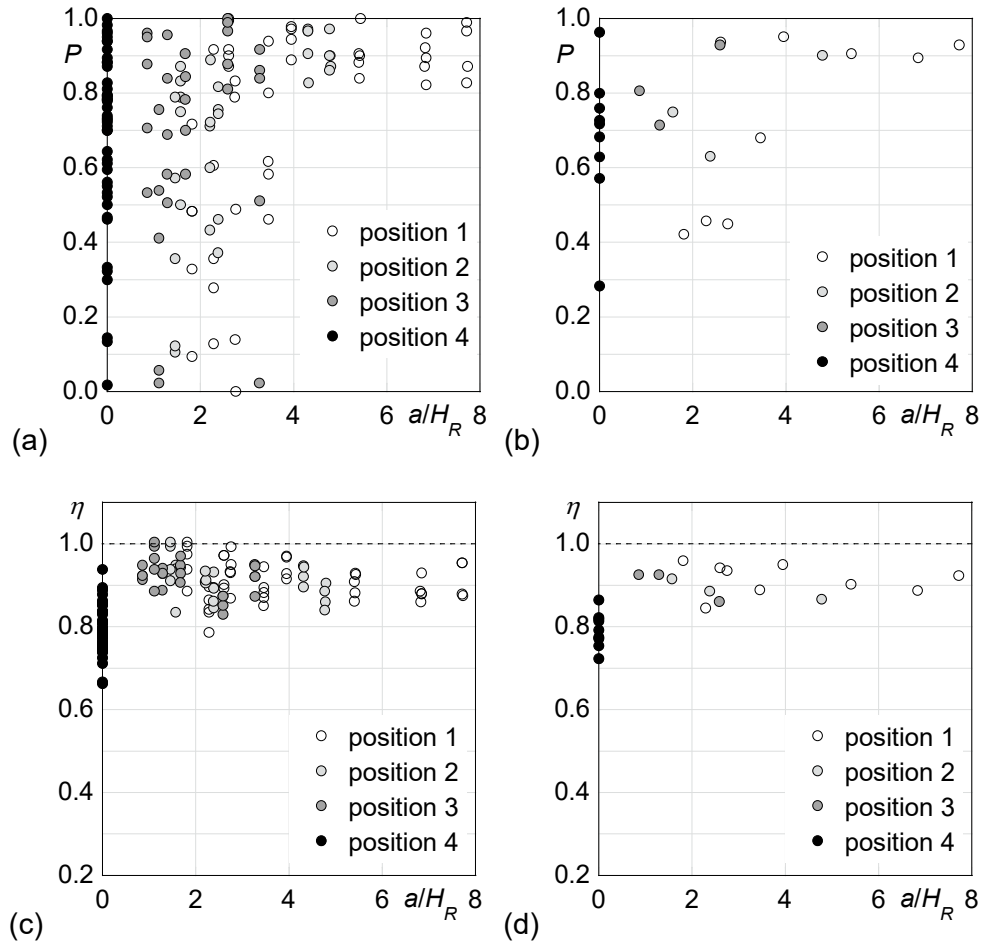


Figure 54. Pour une moyenne apparition de bois et un râtelier partiel : P versus a/H_R avec (a) tous les tests, et (b) moyenne des répétitions, et η versus a/H_R avec (c) tous les tests, et (d) moyenne des répétitions.

Le râtelier partiel ne provoque donc pas de passage supplémentaire de bois flottants pour une moyenne apparition, mais il maintient une performance hydraulique assez élevée à l'évacuateur de crue.

Le Tableau 8 résume les taux d'efficacité η moyens (équation 8) et les probabilités de blocage P moyennes par géométrie (largeur relative des passes b/L_M et position 1 à 4 du râtelier, chapitre 3.1.1). Les valeurs de η et de P des trois débits ($\chi=0.33$, 0.67 et 1) testés par géométrie ont également été moyennées. Le tableau donne pareillement le nombre de tests effectués par géométrie, se basant sur la recommandation de Furlan (2019, chapitre 3.3.2).

Tableau 8. Récapitulation de l'efficacité η (équation 8) et de la probabilité de blocage P pour une moyenne apparition de bois flottants et pour toutes les conditions testées.

	Pos.	b/L_M [-]			Moyenne	Nombre de tests
		0.40	0.60	0.77		
η	1	0.94	0.87	0.93	0.91	45
	2		0.89		0.89	15
	3		0.90		0.90	15
	4	0.79	0.77	0.83	0.79	45
P	1	0.94	0.68	0.59	0.74	45
	2		0.76		0.76	15
	3		0.82		0.82	15
	4	0.80	0.72	0.52	0.68	45

Le Tableau 8 montre, pour une moyenne apparition des bois uniquement, que :

- des passes larges ($b/L_M=0.77$) montrent une capacité η quasiment similaire aux passes étroites. En revanche, la probabilité de blocage P est clairement réduite aux passes larges.
- la capacité moyenne est de $\eta=0.79$ sans râtelier, et de $0.89 \leq \eta \leq 0.91$ avec un râtelier. La position du râtelier semble être secondaire, avec une légère préférence pour le râtelier distant (position 1).
- Tous les râteliers, indépendamment de leur position, augmentent la probabilité de blocage P , par rapport à la situation sans râtelier. La position distante (1) est celle avec une augmentation minimale (facteur 1.09) et donc la meilleure. La position 2 montre une probabilité de blocage que légèrement augmentée et reste par conséquent attractive.
- Un râtelier proche (position 3) maintient une grande capacité $\eta=0.90$ (sans râtelier $\eta=0.79$), mais génère un blocage plus élevé ($P=0.82$, comparé à $P=0.68$ sans râtelier).

4.4.3 Extrême apparition de bois flottants

L'apparition extrême de bois flottants est considérée comme un test pour les performances hydrauliques de l'évacuateur de crue. L'accent n'est donc plus mis sur le passage des bois flottants. Il est même probablement souhaitable de retenir les bois flottants dans un tel cas, afin qu'ils ne puissent pas provoquer de blocages dans la suite du cours d'eau. Dans le modèle, seule une très petite quantité de bois flottants a pu passer à travers le râtelier partiel sous une quantité extrême de bois flottants et elle n'a été ajoutée que manuellement à l'amont du modèle. Il n'y a donc aucune probabilité de blocage analysée dans ce chapitre ($P=1$, maintenue de manière artificielle si nécessaire).

La Figure 55a (ensemble des valeurs) illustre l'efficacité relative η versus a/H_R pour les deux positions de râtelier partiels testées. La mise en place d'un râtelier partiel (Position 1) a un effet bénéfique sur l'efficacité relative $\eta > 0.90$. Il est souligné que pour $a/H_R \geq 4$, l'efficacité relative diminue légèrement. Sans râtelier (Position 4), l'efficacité hydraulique est fortement diminuée et oscille autour de $0.70 < \eta < 0.90$.

La performance hydraulique se comporte pour une apparition extrême de bois flottants et un râtelier partiel exactement comme prévu par Pfister et al. (2019) et Bénet et al. (2021). Ce comportement a déjà fait l'objet d'une première étude. La Figure 55b montre, en plus des valeurs moyennes de l'efficacité relative η versus a/H_R pour les deux positions de râtelier partiels testées, les données de la première étude. Dès qu'un élément en amont (râtelier partiel

ou complet, ou piliers en surplomb) est présent pour $a/H_R > 0.35$, l'efficacité se situe autour de $\eta < 0.9$ à 0.95 , comparé à une situation sans éléments. En général, les râteliers semblent être légèrement plus efficaces que les piliers en surplomb, et les râteliers complets légèrement plus efficaces que les partiels. Il est à noter qu'autour de $a/H_R > 4$, les râteliers semblent à nouveau moins efficaces sur le plan hydraulique. Cela est probablement dû au fait que les bois flottants passent à travers le râtelier, mais ils se bloquent à l'évacuateur de crue, où ils perturbent l'écoulement.

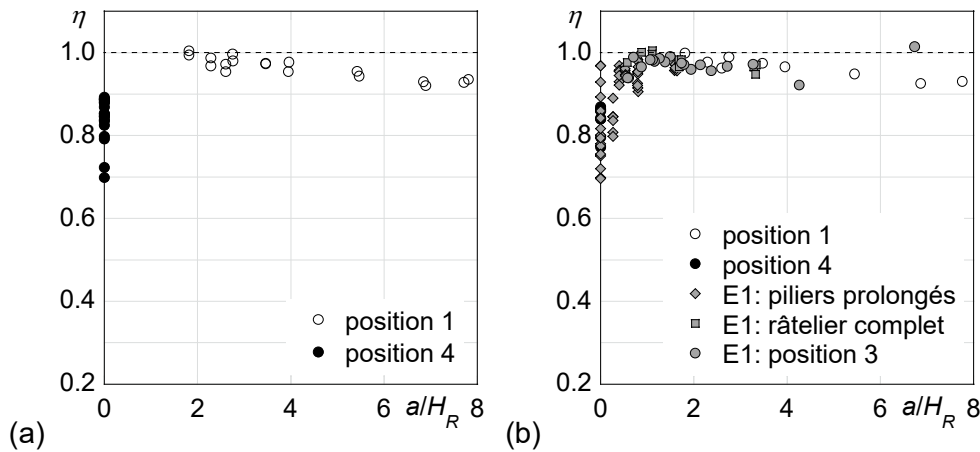


Figure 55. Pour une extrême apparition de bois et un râtelier partiel : η versus a/H_R avec (a) tous les tests (présents), et (b) moyenne des répétitions (complétée avec les points E1 de l'étude de Pfister et al. 2019 et Bénét et al. 2021).

Ainsi, le râtelier partiel ne provoque qu'une légère réduction des performances hydrauliques de l'évacuateur de crue pour une apparition extrême de bois flottants. En moyenne, 95% de la capacité est maintenue tant que $0.35 < a/H_R < 4$.

Le Tableau 9 résume les taux d'efficacité η moyens (équation 8) et les probabilités de blocage P moyennes par géométrie (largeur relative des passes b/L_M et position 1 à 4 du râtelier, chapitre 3.1.1). Les valeurs de η et de P des trois débits ($\chi=0.33$, 0.67 et 1) testés par géométrie ont également été moyennées. Le tableau donne aussi le nombre de tests effectués par géométrie, se basant sur la recommandation de Furlan (2019, chapitre 3.3.2).

Le Tableau 9 montre, pour une extrême apparition des bois uniquement, que :

- des passes larges ($b/L_M=0.77$) montrent une capacité η étant proche à celle des passes étroites. La probabilité de blocage $P=1$ a été provoquée pour tous les tests d'une apparition extrême, et se soustraient de ce fait à une interprétation.
- la capacité moyenne est de $\eta=0.84$ sans râtelier et de $0.96 \leq \eta \leq 0.97$ avec un râtelier. La position du râtelier semble d'être secondaire.
- pour toutes les largeurs de passes et positions du râtelier testées, un blocage complet ($P=1$) a pu être provoqué et apparaît ainsi après un certain temps aussi sur un prototype. Néanmoins, le blocage complet s'est installé plus facilement pour des passes étroites.

Tableau 9. Récapitulation de l'efficacité η (équation 8) et de la probabilité de blocage P pour une extrême apparition de bois flottants et pour toutes les conditions testées.

	Pos.	$b/L_M [-]$			Moyenne	Nombre de tests
		0.40	0.60	0.77		
η	1	0.95	0.96	0.98	0.96	18
	2					
	3	0.97		0.97	0.97	12
	4	0.86	0.85	0.81	0.84	18
P	1	1.00	1.00	1.00	1.00	18
	2					
	3	1.00		1.00	1.00	12
	4	1.00	1.00	1.00	1.00	18

4.4.4 Discussion

Les résultats des tests effectués jusqu'à présent (Tableaux 6 à 8) montrent les aspects suivants :

- En cohérence avec le critère de Godtland et Tesaker (1994) les passes larges ($b/L_M=0.77$) bloquent potentiellement moins sous l'arrivée des troncs individuels et de petits tas, comparé à des passes plus étroites. Pour une arrivée de volumes extrêmes, cette particularité disparaît.
- La capacité η résiduelle du débit sous un blocage ne semble pas être une fonction de la largeur relative des passes. Même si la probabilité de blocage est plus faible (voir point précédent), cela n'a pas d'influence majeure sur la capacité. Les quelques troncs bloqués proche du déversoir génèrent la réduction de capacité, et pas ceux qui sont potentiellement stockés dans le réservoir.
- L'absence d'un râtelier partiel (position 4) génère une réduction prononcée de la capacité relative du débit, avec des valeurs moyennes de $0.79 \leq \eta \leq 0.88$. La présence d'un râtelier partiel augmente la capacité moyenne à $0.89 \leq \eta \leq 0.97$, indépendamment de la position du râtelier.
- Les positions 1 et 2 (distant et intermédiaire) ont prouvé un meilleur fonctionnement que la position 3 (proche). Concrètement, la capacité η est similaire, mais la probabilité de blocage est réduite (passage du bois plus fréquent). Cette observation est fréquente pour l'arrivée individuelle ou en petits groupes de troncs, rare pour des grands groupes, et quasiment absente pour une arrivée extrême.
- Le régime d'arrivée de bois n'influence que légèrement la capacité résiduelle en présence d'un râtelier, mais fortement le passage des bois. Pour une arrivée individuelle ou en petits groupes (« un-congested » ou « congested », chapitre 2.1.4), le passage est prononcé (particulièrement avec un râtelier partiel sur la position 1 ou 2). Pour une arrivée extrême, le passage des bois reste l'exception.

De passes larges mais sans râtelier (avec $b/L_M=0.77$ légèrement plus étroites que Godtland et Tesaker recommandent) réduisent la probabilité de blocage (et augmentent le passage des bois comme le but de cette étude), mais elles n'accroissent pas la capacité résiduelle du débit, comparé à des passes étroites ($b/L_M=0.40$ et 0.60). La capacité est uniquement maintenue et tous les bois passent, si toutes piliers sont supprimés (et les passes deviennent exceptionnellement larges, selon les résultats de Bénet et al. 2021). Pour des constructions existantes avec

des passes « étroites » (les piliers ne peuvent pas être supprimée), l'installation d'un râtelier est ainsi inévitable.

Cette étude prouve qu'un râtelier partiel présent en amont d'un évacuateur de crue améliore le passage des bois flottants et la capacité résiduelle en termes de débit, comparé à une situation sans râtelier et pour des passe « étroites ». La position du râtelier est à choisir « distant » ou « intermédiaire » (chapitre 3.1.1). Les buts principaux de cette étude sont alors atteints (chapitre 2.4).

Néanmoins, l'étude précédente (Pfister et al. 2019, Bénet et al. 2021) qui propose des mesures constructives « durs » (sans passage des bois, surplomb des piliers, suppression des piliers, ou râtelier « complet ») arrive à mieux limiter l'atténuation de la capacité du débit. La capacité avec un blocage complet et sous une arrivée de bois extrême a pu être maintenue à une moyenne de $\eta > 0.96$ (pour un surplomb de $p = 0.08$ m dans le modèle réduit, Tableau 10). Cependant, pour la présente étude avec un râtelier partiel elle n'est que $\eta > 0.89$ (pour une apparition moyenne de bois, Tableau 8).

Une combinaison de mesures paraît par conséquent prometteuse, concrètement il s'agit d'un grand surplomb p des piliers avec un râtelier partiel « intermédiaire » ou « distant ». La présente étude a donc été élargie par les tests résumés dans le Tableau 6 (chapitre 4.5).

4.5 RÂTELIER PARTIEL COMBINÉ AVEC SURPLOMB DES PILIERS

Le Tableau 6 donne le programme de tests pour les essais supplémentaires dans le contexte du surplomb de pilier combiné avec le râtelier partiel. Toutes les apparitions de bois ont été testées (faible, moyenne et extrême) pour une largeur des passes relatives de $b/L_M = 0.60$. Le surplomb a été installé comme $p = 0.08$ m (Pfister et al. 2019, Bénet et al. 2021), car un surplomb prononcé a été identifié comme le plus efficient.

Les positions 1, 2 et 4 du râtelier ont été installées, car elles sont qualifiées de prometteuses par les travaux précédents (chapitre 4.4.4). Il faut préciser également qu'un surplomb prononcé des piliers requiert un râtelier éloigné du déversoir, autrement le surplomb et le râtelier interfèrent entre eux. Le surplomb p et l'avancement du râtelier a (équations 1 à 4) sont définis à partir du front vertical du déversoir (Figure 8). Afin de comparer l'effet de cette combinaison, la variante sans râtelier (position 4) est aussi incluse dans le programme de tests.

L'étude du comportement des corps flottants procure un résultat inhomogène pour chaque test effectué. Quelques observations qui sont apparues relativement fréquemment pour une configuration d'essai peuvent être relevées.

4.5.1 Faible apparition de bois flottants

Sous une faible arrivée de bois flottants, les troncs arrivent souvent à franchir le déversoir par petits groupes (avec des interactions entre eux et la structure en place, c'est-à-dire râtelier et piliers). Il se peut tout de même que les troncs se bloquent contre les piliers (blocage généralement perpendiculaire, Figure 56) ou contre le râtelier. Dans ce cas, une petite accumulation de bois flottants (en fonction de quand le blocage se crée) se forme. Ce petit amas de troncs a l'air peu stable et peut (en laissant avec un certain laps de temps) se débloquent et franchir le déversoir.



Figure 56. Blocage de troncs perpendiculaires aux piliers avec petite accumulation en amont (Test 488, vue depuis l'aval).

4.5.2 Moyenne apparition de bois flottants

Sous une arrivée moyenne de bois flottants, les troncs sont généralement retenus contre le râtelier et les piliers (Figure 57), dès les premières arrivées des groupes. Toutefois, quelques éléments arrivent à se détacher des groupes et à franchir le déversoir. Avec cette accumulation de bois flottants à l'amont, le tapis de troncs formé est plutôt stable. Il est rare que le tapis se débloque (partiellement ou entièrement) après un certain laps de temps.



Figure 57. Blocage de bois flottants contre le râtelier et les piliers avec un tapis retenu à l'amont (Test 509).

4.5.3 Extrême apparition de bois flottants

Sous une arrivée extrême de bois flottants, les volumes sont directement bloqués contre le râtelier (si mis en place position 1 et 2, sinon contre les piliers position 4). Quelques troncs se détachent et franchissent le déversoir, cela reste toutefois une quantité faible par rapport à la

taille total du volume de troncs. Le tapis constitué est stable et un déblocage de ce dernier n'a pas été observé.



Figure 58. Tapis de bois flottants retenu contre le râtelier (Test 473).

4.5.4 Discussion

La Figure 59 montre la probabilité de blocage P en fonction du débit relatif χ pour $b/L_M=0.60$ et avec $p=0.08$ m (râtelier partiel combiné avec surplomb des piliers).

La mise en place d'un râtelier partiel (position 1 et 2, Figure 59a et c) réduit la probabilité de blocage P avec une *faible apparition* de bois flottants comparé à une situation sans râtelier (position 4 avec surplomb, Figure 59e). La dispersion des valeurs (répétition des tests) est considérable en utilisant la position 2 (Figure 59c) au lieu de la position 1 (Figure 59a).

Dans le cadre d'une *moyenne apparition* de bois flottants, la mise en place d'un râtelier partiel (position 1 et 2, Figure 59b et d) n'aide que faiblement ou pas à la diminution de la probabilité de blocage P comparé à une situation sans râtelier (position 4, Figure 59f). La position 2 présente la plus faible dispersion dans les résultats (Figure 59d).

La Figure 60a présente le coefficient de déversoir C_d en fonction du débit relatif χ pour la configuration des têtes de piliers prolongées ($p=0.08$ m) et une largeur de passes $b/L_M=0.60$, sauf pour l'apparition extrême avec la position 4 où $b/L_M=0.40$ et $b/L_M=0.77$. La position du râtelier partiel est variée (position 1, 2 ou 4), ainsi que l'apparition des bois flottants (faible, moyenne ou extrême). La Figure 60b montre l'efficacité relative η (Eq. 8) en fonction du débit relatif χ , avec les mêmes remarques que pour la Figure 60a.

À la Figure 60, il est observé que pour un débit relatif $\chi > 0.66$, la combinaison des mesures (râtelier partiel et têtes des piliers) permet de conserver un coefficient de déversoir C_d avec une efficacité relative η d'au moins 95%. Pour les plus petits débits ($\chi=0.33$), la combinaison des mesures est moins efficace. Ceci n'est pas limitant car charge est relativement faible pour ce débit (comparé avec $\chi > 1$) et la surélévation du réservoir conséquemment aussi.

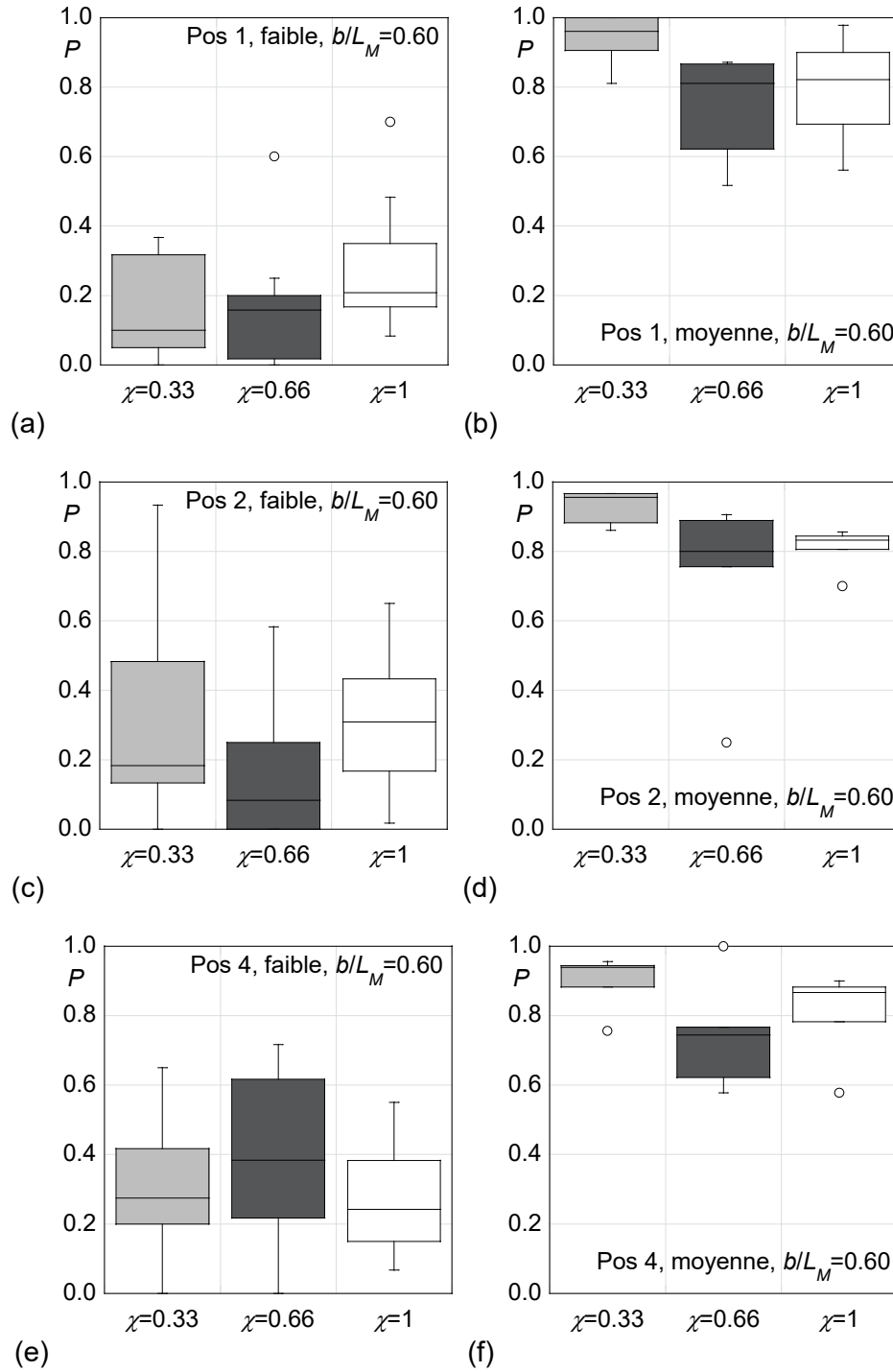


Figure 59. Probabilité de blocage P versus débit relatif χ pour $p=0.08$ m et $b/L_M=0.60$, mesuré lors de la combinaison du surplomb des piliers avec le râtelier partiel. Gauche : faible apparition de bois ; droite : moyenne apparition. (a) et (b) position 1, (c) et (d) position 2, et (e) et (f) position 4.

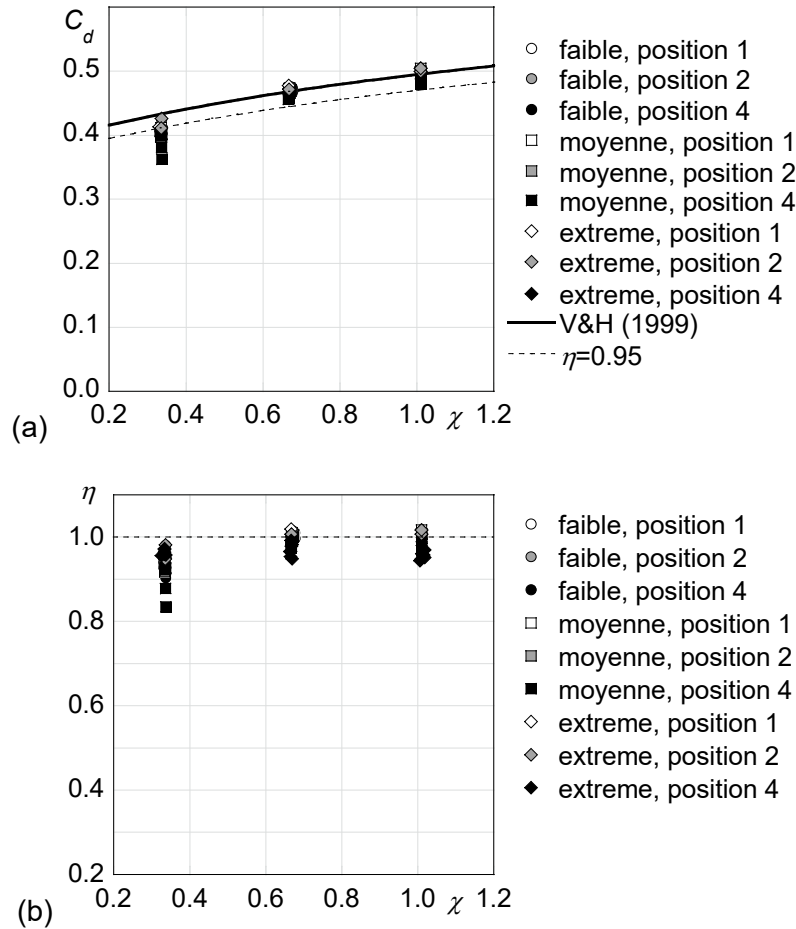


Figure 60. Pour le râtelier partiel combiné avec un surplomb des piliers ($p=0.08$ m et $b/L_M=0.60$) : (a) Coefficient du déversoir C_d versus débit relatif χ , et (b) efficacité η versus débit relatif χ .

La Figure 61 exprime la capacité relative η en fonction de la probabilité de blocage P , dans le cadre de la combinaison des mesures avec une largeur relative de passes de $b/L_M=0.60$. La position du râtelier partiel est variée (position 1, 2 ou 4), ainsi que l'apparition des bois flottants (faible ou moyenne). Sur cette figure, l'apparition de volume extrême n'est pas représentée, car le blocage est supposé total et complet, ainsi $P=1$. Les capacités relatives η sont par tendance plus faibles quand la probabilité de blocage P est proche de 1. Les capacités relatives η les plus faibles sont issues des petits débits relatifs ($\chi=0.33$). De manière générale, il est constaté que l'apparition moyenne de bois flottants a tendance à générer des probabilités de blocage P plus élevées que la faible apparition de bois flottants, indépendamment de la position du râtelier partiel.

La Figure 62a montre la probabilité de blocage P et la Figure 62b la capacité relative η en fonction de a/H_R . Les valeurs moyennes des tests effectuées sont représentées pour $b/L_M=0.60$. La position du râtelier partiel est variée (position 1, 2 ou 4), ainsi que l'apparition des bois flottants (faible ou moyenne). À la Figure 62a, la probabilité de blocage P est plus élevée pour une moyenne apparition de bois flottants quand environ $a/H_R \geq 4$. Cet effet n'est pas visible pour une faible apparition. À la Figure 62b, la capacité relative η est diminuée lorsque que $a/H_R \geq 4$. Ce constat est valable pour une faible et une moyenne apparition de bois flottants et est indépendant de la position du râtelier partiel.

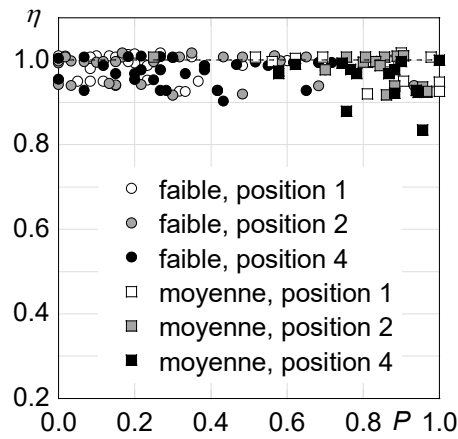
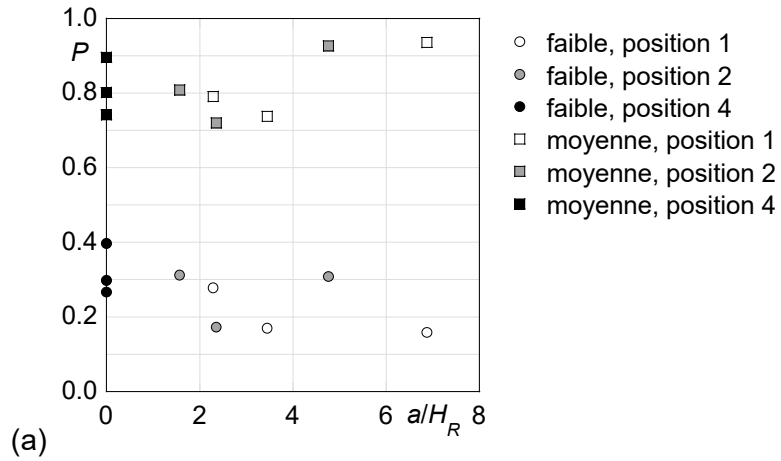
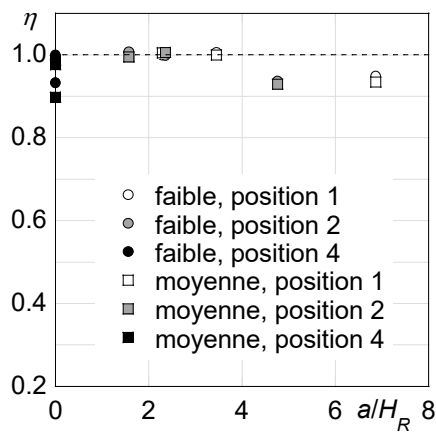


Figure 61. Pour le râtelier partiel combiné avec un surplomb des piliers ($p=0.08$ m et $b/L_M=0.60$) : Capacité relative η versus probabilité de blocage P .



(a)



(b)

Figure 62. Pour le râtelier partiel combiné avec un surplomb des piliers ($p=0.08$ m et $b/L_M=0.60$) : (a) P et (b) η versus a/H_R avec la moyenne des répétitions.

Le Tableau 10 montre les valeurs moyennes des tests réalisés dans le cadre de la combinaison des mesures.

Tableau 10. Récapitulation de l'efficacité relative moyenne η (équation 8, avec (*) de Pfister et al. 2019) et de la probabilité de blocage moyenne P pour toutes les apparitions de bois flottants testées, avec une combinaison de râtelier partiel et un surplomb des piliers.

	$\frac{b}{L_M}$	$b/L_M [-]$			Apparition des bois	Nombre de tests
		0.40	0.60	0.77		
η	1		0.99		Faible	30
	2		0.98		Faible	30
	4		0.97		Faible	30
	1		0.98		Moyenne	15
	2		0.98		Moyenne	15
	4		0.95		Moyenne	15
	1		0.99		Extrême	6
	2		0.99		Extrême	6
	4	0.97 (*)		0.96 (*)	Extrême	18 (*)
P	1		0.20		Faible	30
	2		0.26		Faible	30
	4		0.32		Faible	30
	1		0.82		Moyenne	15
	2		0.82		Moyenne	15
	4		0.81		Moyenne	15
	1		1.00		Extrême	6
	2		1.00		Extrême	6
	4	1.00 (*)		1.00 (*)	Extrême	18 (*)

5 RECOMMANDATION

Les tests réalisés mènent à des observations et recommandations complexes, un phénomène typique pour le comportement des corps flottants en interaction avec une structure. Néanmoins, à la suite d'un grand nombre de tests effectués (573 !), des recommandations sont possibles et dépendent des priorités du maître d'ouvrage.

Le récapitulatif global (moyennes sur les débits testés par géométrie et apparition des bois flottants) de tous les tests comparables (I) sans râtelier partiel (sans surplomb, position 4), (II) avec râtelier partiel (sans surplomb, positions 1, 2 et 3) et (III) pour la combinaison râtelier et surplomb (positions 1 à 4) est donné dans le Tableau 11 et le Tableau 12, sur la base des valeurs des Tableaux 7 à 10. Les tableaux incluent toutes les largeurs relatives des passes b/L_M et toutes les apparitions de bois testé (faible, moyenne et extrême). Les tests avec le râtelier partiel ont été effectués sur les positions 1 à 3, caractérisant la distance entre le râtelier et le front amont du déversoir (Eqs. 1 à 4, a dans la Figure 8).

Les deux buts principaux ont été le maintien de la sécurité du barrage en lien avec la capacité de déversement de l'évacuateur de crue, qualifié par le rendement du débit η selon l'équation (8), ainsi que la diminution de la probabilité de blocage P des bois flottants (ou l'augmentation de son passage étant $1-P$). Ces deux paramètres sont analysés dans la suite.

5.1 EFFICACITÉ HYDRAULIQUE DU DÉVERSOIR

5.1.1 Observations

En ce qui concerne l'efficacité hydraulique du déversoir exprimée par η (pourcentage de la réduction de la capacité du débit, comparé avec la capacité non-perturbée par des corps flottants, Eq. 8), le Tableau 11 et sa visualisation dans la Figure 63 montrent les aspects suivants :

Largeur relative des passes

- Des passes relativement larges ($b/L_M=0.77$) ont par tendance une efficacité plus élevée que des passes étroites ($b/L_M=0.40$), avec et sans râtelier et particulièrement pour une faible apparition de bois. Pour une apparition extrême, les différences sont négligeables (ou même légèrement inversées).
- Une passe étroite sans râtelier (position 4) et sans surplomb dispose seulement d'une efficacité de $\eta \approx 0.79$ à 0.88 (Bénet et al. 2021 observent des valeurs encore plus faibles pour une extrême apparition de bois), et une passe large de $\eta \approx 0.81$ à 0.95.

Effet du râtelier partiel et du surplomb

- L'installation du râtelier partiel en amont du déversoir augmente crucialement et en tout cas l'efficacité du déversoir, indépendamment de la position du râtelier, de la largeur des passes ou de l'apparition des bois.
- L'augmentation est particulièrement prononcée pour des passes étroites ($b/L_M=0.40$) et un déversoir sans surplomb des piliers.
- Un surplomb augmente en tout cas la performance du déversoir, même en absence du râtelier. Le surplomb paraît être même plus efficace en termes de capacité que le râtelier partiel.

- La combinaison d'un surplomb et d'un râtelier partiel augmente l'efficacité à des valeurs de quasiment 100%. Le râtelier partiel combiné avec un surplomb assure une capacité hydraulique quasi non-perturbée.

Position (avancement) du râtelier partiel

- La distance $a=0$ m (position 4, éq. 4) est équivalent à l'absence du râtelier. Comme discuté sous le point précédent « effet du râtelier partiel et du surplomb », la position 4 est défavorable.
- La présence d'un râtelier ($a>0$ m) est favorable (Figure 8). L'avancement a a été varié sur la base des réflexions décrites dans le chapitre 3.1.1. La position a a été définie en fonction de l'espace « ouvert » entre barre du râtelier et le pilier (distant = position 1, intermédiaire = 2 et proche = 3).
- Globalement, la capacité ne dépend que peu de l'avancement $a>0$ m (de la position du râtelier). Pour la capacité, il ne paraît pas décisif si le râtelier est positionné « raisonnablement » proche ou loin du déversoir.
- Un emplacement du râtelier partiel à environs $a/H_R<4$ semble favorable lors des débits déterminants afin de motiver le passage des bois. Un emplacement plus distant augmente par tendance le blocage (directement au déversoir) pour des faibles et moyennes apparitions de bois.

Apparition des bois flottants

- Le râtelier (avec ou sans surplomb) génère une capacité hydraulique haute pour tout type d'apparition de bois.
- Globalement, une apparition de bois moyenne (6 groupes à 30 troncs chacun dans le cas présent) semble être le plus limitant en termes de capacité. Une apparition faible ou extrême réduit le débit de manière moins prononcée (η plus élevé). Le petit nombre de bois pour une apparition faible ne suffit pas pour un blocage complet, et l'arrivée en tas compact de l'apparition extrême isole que rarement des bois individuels qui se mettent dans la section critique du déversoir.
- La capacité du déversoir est particulièrement amplifiée en présence d'un râtelier (et d'un surplomb) pour des apparitions moyennes et extrêmes.

5.1.2 Recommandation

Si la capacité d'un déversoir est sensible ou une surélévation de la retenue dangereuse lors d'une forte crue avec une apparition de bois flottants, des mesures sont recommandées. Ces mesures peuvent inclure (Tableau 11) :

- Une suppression des piliers si le déversoir n'est pas équipé de vannes ou de pont (Bénet et al. 2021).
- Un surplomb prononcé des piliers générant typiquement une capacité résiduelle aux alentours de $\eta\approx 0.95$ selon Bénet et al. (2021) pour une apparition de bois extrême.
- Un râtelier complet générant typiquement une capacité résiduelle aux alentours de $\eta\approx 0.95$ selon Bénet et al. (2021) pour une apparition de bois extrême.
- Un râtelier partiel (une barre devant chaque deuxième pilier seulement) générant typiquement une capacité résiduelle aux alentours de $\eta>0.90$ selon Bénet et al. (2021) pour une apparition de bois extrême. Les résultats présents sont basés sur des données significativement plus nombreuses et démontrent plutôt $\eta\approx 0.95$ pour une apparition de bois extrême. Pour une apparition des bois moyenne, un minimum (valeur moyen) aux alentours de $\eta\approx 0.87$ est atteint.

- Une combinaison de râtelier partiel et de surplomb (prononcé) des piliers générant typiquement une capacité résiduelle aux alentours de $\eta \approx 0.97$, ce qui correspond quasiment à la capacité maximale du déversoir sans bois flottants.
- L'étude de Bénét et al. 2021 montrée qu'un surplomb d'environ $p/H_R > 0.35$ est efficace en termes de η . La discussion dans le contexte de la Figure 62 limite l'avancement du râtelier partiel à environ $a/H_R < 4$.

Tableau 11. Récapitulation de l'efficacité η du râtelier partiel (moyenne des valeurs comparables par série de test, Eq. 8, Figure 63).

position râtelier	apparition des corps flottants	sans surplomb				avec sur- plomb $b/L_M [-]$
		$b/L_M [-]$	$b/L_M [-]$	$b/L_M [-]$	moyenne	0.60
1	faible	0.94	0.94	0.97	0.95	0.99
2			0.92		0.92	0.98
3			0.94		0.94	
4		0.80	0.88	0.95	0.88	0.97
1	moyenne	0.94	0.87	0.93	0.91	0.98
2			0.89		0.89	0.98
3			0.90		0.90	
4		0.79	0.77	0.83	0.79	0.95
1	extrême	0.95	0.96	0.98	0.96	0.99
2						0.99
3		0.97		0.97	0.97	
4		0.86	0.85	0.81	0.84	0.97

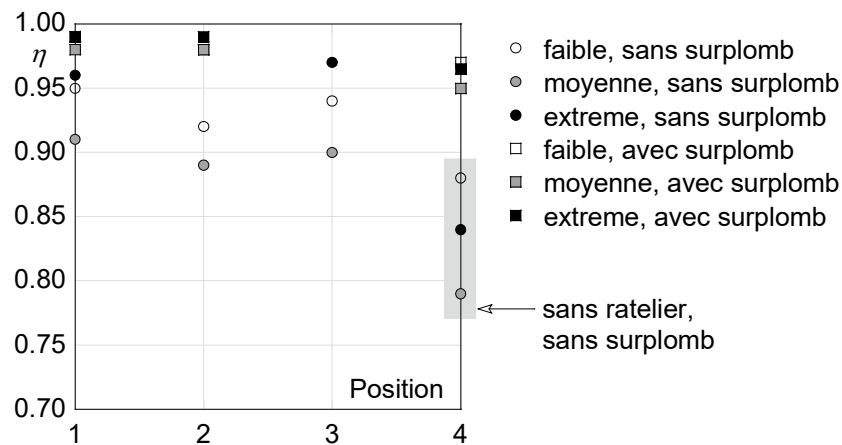


Figure 63. Visualisation de l'efficacité η du râtelier partiel selon le Tableau 11 (moyenne des valeurs comparables par série de test).

5.2 PROBABILITÉ DE BLOCAGE

5.2.1 Observations

En ce qui concerne la probabilité de blocage des bois flottants au râtelier et au déversoir (blocage des deux combiné) exprimée par P (taux de nombres de troncs bloqués relatif au nombre total inséré), le Tableau 12 et sa visualisation dans la Figure 64 montre les aspects suivants :

Largeur relative des passes

- Pour une apparition extrême, le blocage a été artificiellement maintenu comme $P=1$. Néanmoins, ce chiffre paraît justifié car seulement très peu de bois passaient le déversoir et ont dû être ajouté en amont du blocage. Ceci est cohérent avec le critère de Godtland et Tesaker (1994) qui mentionne que, pour les largeurs relatives des passes testées, un blocage devait apparaître.
- La largeur relative des passes b/L_M domine le blocage. L'augmentation de la largeur relative d'un facteur deux (de 0.40 à 0.77) réduit la probabilité de blocage d'un facteur de >8 pour une apparition de bois faible, et d'un facteur de 1.5 pour une apparition moyenne.

Effet du râtelier partiel et du surplomb

- L'installation d'un râtelier réduit significativement le blocage pour des faibles apparitions de bois et un râtelier partiel distant du déversoir (positions 1 et 2).
- L'installation d'un râtelier augmente légèrement le blocage pour des moyennes apparitions de bois indépendamment de la position du râtelier.
- La combinaison de surplomb et de râtelier partiel augmente systématiquement le blocage comparé avec la performance du râtelier uniquement.
- La combinaison de surplomb et de râtelier partiel génère un blocage quasi-similaire à celui avec l'absence de ces deux mesures.
- Pour une apparition de bois extrême, le blocage reste complet avec le râtelier partiel et le surplomb.

Position (avancement) du râtelier partiel

- Le blocage baisse si l'avancement a du râtelier augmenté (Figure 8), comparée à la situation sans râtelier (position 4). La position 1 (distant) et moindre la 2 (intermédiaire) sont favorables.
- L'avancement maximal pour un débit déterminant est aux alentours de $a/H_R < 4$. Pour une apparition des bois extrêmes, l'efficacité diminue par tendance légèrement pour des râteliers partiels plus distants.
- L'installation d'un râtelier en position 3 (proche du déversoir, environs $a/H_R \leq 0.35$, Pfister et al. 2019, Bénet et al. 2021) baisse la capacité pour toutes les apparitions de bois.

Apparition des bois flottants

- Le râtelier partiel réduit significativement le blocage pour une faible apparition, sous réserve qu'il soit installé sur la position 1 (ou 2). Il bloque que 54% des bois pour des passes étroites ($b/L_M=0.40$) et 20% pour des passes larges ($b/L_M=0.77$), comparé avec la situation sans râtelier (position 4).
- Le râtelier n'influence quasiment pas le blocage pour une apparition moyenne, même en combinaison avec un surplomb, sur les positions 1 ou 2. La tendance montre, que le râtelier retient même un peu plus de bois comparé avec la situation sans râtelier.

- Le râtelier n'influence quasiment pas le blocage pour une apparition extrême.

5.2.2 Recommandation

La capacité hydraulique d'un évacuateur de crue est à évaluer avant de discuter du blocage (ou plutôt un passage élevé) des bois flottants.

1. Si les conditions permettent une certaine réduction de la capacité hydraulique (p.ex. $\eta=0.85$ est acceptable, une surélévation limitée de la retenue reste sans conséquences), le passage supplémentaire des bois peut être envisagée à l'aide d'un râtelier partiel. La suite discute ce cas-ci.
2. Si la capacité hydraulique est critique et doit absolument être maintenue (p.ex. à $\eta>0.95$), le passage supplémentaire de bois flottants « au fil de l'eau » ne semble pas faisable (il doit se faire mécaniquement). Une mesure proposée par Bénét et al. (2021) ou mieux encore la combinaison de râtelier partiel et surplomb des piliers sont à installer.

L'installation d'un râtelier partiel « distant » du déversoir permet effectivement de faire passer majoritairement les bois flottants qui arrivent individuellement ou en petit groupe (apparition faible), en maintenant une capacité relativement élevée du déversoir. La faune en aval de l'évacuateur peut ainsi en profiter, au lieu qu'ils se bloquent et doivent être enlevés. Probablement, une grande partie de bois flottants arrivent en Suisse dans ce mode (« uncongested » ou « semi-congested ») lors des débits élevés ou des « faibles » crues. Cette arrivée (la plus fréquente ?) représente qu'un danger très limité pour le barrage (équipé d'un râtelier partiel) ou une autre structure sur le cours d'eau aval, et les bois peuvent rester dans les cours d'eau.

Lors des arrivées de bois dans le mode « congested » ou « hyper-congested » (apparition moyenne de 6 groupes à 30 troncs chacun, et extrême avec 2'840 éléments de bois dans le modèle), le râtelier partiel « distant » ou « intermédiaire » maintient une capacité hydraulique élevée d'environ $\eta\approx 0.87$. En revanche, il réduit très légèrement le passage des bois comparé avec la situation sans râtelier. Cette apparition est certainement réservée aux crues rares et exceptionnelles. La rétention des bois flottants au râtelier peut être interprétée comme un avantage, car la masse des bois représente un risque pour le cours d'eau aval avec des sections étroites.

Sous une faible apparition des bois, le passage des bois est amplifié pour des passes larges (ce paramètre peut être choisi lors d'une nouvelle construction) et un râtelier partiel distant du déversoir (qui tourne légèrement les troncs et laisse ouvert leur passage, Eq. 1 équivalent à la position 1). La combinaison de râtelier partiel et surplomb des piliers maintiennent un passage élevé des bois, étant plus prononcé que sans installations mais moins qu'avec un râtelier uniquement. La combinaison augmente fortement la capacité hydraulique.

Tableau 12. Récapitulation de la probabilité de blocage P du râtelier partiel (moyenne des valeurs comparables par série de test).

position râ- telier	apparition des corps flottants	sans surplomb				avec sur- plomb
		b/L_M [-]			moyenne	b/L_M [-]
		0.40	0.60	0.77		0.60
1	faible	0.22	0.06	0.01	0.10	0.20
2			0.16		0.16	0.26
3			0.30		0.30	
4		0.41	0.18	0.05	0.21	0.32
1	moyenne	0.94	0.68	0.59	0.74	0.82
2			0.76		0.76	0.82
3			0.82		0.82	
4		0.80	0.72	0.52	0.68	0.81
1	extrême	1	1	1	1	1
2						1
3		1		1	1	
4		1	1	1	1	1

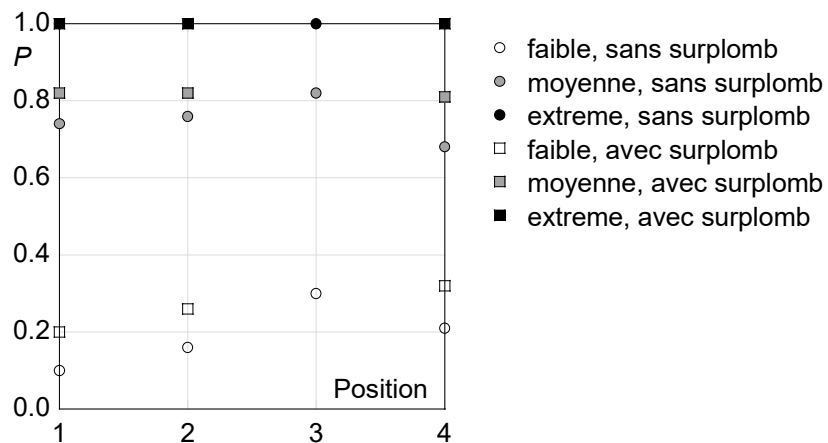


Figure 64. Visualisation de la probabilité de blocage P du râtelier partiel selon le Tableau 12 (moyenne des valeurs comparables par série de test)

6 CONCLUSIONS

6.1 CONTEXTE

Les bois flottants (grands troncs de bois morts) sont des éléments fondamentaux pour les cours d'eau. Ils participent activement au maintien et au développement des écosystèmes aquatiques. Les bois flottants façonnent les rivières de manière diverses et variées et apportent une richesse aux habitats de la faune aquatique. Ils servent également de nourriture pour une partie de la population piscicole.

La civilisation moderne a développé des structures dans les cours d'eau pour répondre aux besoins de trafic (pilier de pont) et de production d'énergie (barrage mobile, évacuateur de crue sur barrage), entre autres. Les bois flottants deviennent alors problématiques. Ils peuvent obstruer les évacuateurs pendant une crue, diminuer la capacité de décharge des ouvrages hydrauliques et provoquer une surélévation conséquente du niveau d'eau amont.

Une première étape d'étude du comportement des bois flottants a déjà été réalisée. Elle se concentrait sur l'effet des bois flottants bloquant un évacuateur de crue sous des conditions extrêmes (Pfister et al. 2019, Bénét et al. 2021). Mise à part l'étude de cas sans contre-mesures, trois approches constructives ont été présentées afin de réduire ou éliminer l'effet négatif des bois flottants sur la sécurité. Si cela fonctionnait de manière satisfaisante, néanmoins, quasiment tous les bois flottants ont été retenus en amont de l'évacuateur de crue.

Le présent projet s'intègre dans une deuxième phase d'étude cofinancée par l'HES-SO et l'OFEN. Il examine sur la base d'essais sur modèle réduit le concept de « râtelier partiel ». Un râtelier partiel consiste d'une barre de râtelier devant chaque deuxième plier seulement. Le but est que ces barres « isolées » stimulent la rotation (au moins partielle) des troncs et de les orienter dans le sens de l'écoulement, afin qu'ils puissent franchir entre les piliers plutôt que d'être bloquées. Les bois flottants sont introduits dans le modèle par groupe de taille variable en amont du déversoir de l'évacuateur de crue. La quantité de passage des bois flottants et la capacité hydraulique du déversoir sont étudiées.

Un accent particulier est mis sur la combinaison entre « la sécurité » et « l'écologie ».

6.2 MODÈLE PHYSIQUE

Les expériences ont été effectuées dans un canal expérimental qui se trouve à la PL-LCH à L'EPFL. Un déversoir standard équipé avec des piliers est situé transversalement à l'aval du canal, au vu de sa fréquente utilisation in situ comme ouvrage d'entrée d'évacuateur de crue. La maquette offre, par sa conception, une grande flexibilité dans le positionnement des piliers, du râtelier, de la régulation du débit, du volume et de la composition de bois flottants testé.

La composition du volume de bois flottants est représentative des différentes longueurs L et diamètres D des troncs lors des crues. Les caractéristiques des volumes se basent sur l'étude de Rickli et Hess (2009, Figure 16). Le rapport entre la longueur et le diamètre des troncs L/D a été choisi égale à 20. La longueur des troncs varie, dans le modèle réduit, entre 0.100 m et $L_M=0.433$ m. Le volume de bois flottants considérés comme extrême est composé de 2'840 troncs. D'autres groupes de troncs (de 3 ou 30 pièces) sont formés que par les troncs les plus longs L_M .

Un râtelier partiel est mis en place en amont de l'évacuateur de crue (Figure 11). Une barre de râtelier est positionnée seulement devant un pilier sur deux. La distance a entre le râtelier et l'évacuateur de crue fait l'objet plusieurs variations (4 positions, équations 1 à 4, Figure 8).

6.3 PARAMÈTRE-CLÉ ÉTUDIÉ

Plusieurs paramètres ont été systématiquement variés pour définir leurs effets :

- 3 paliers de débit. Le dernier palier correspond au débit de dimensionnement du déversoir ($\chi=0.33, 0.67$ et 1).
- 3 rapports de la largeur des passes b sur la longueur des troncs les plus longs L_M ($b/L_M=0.40, 0.60$ et 0.77).
- 3 apparitions de bois flottants différentes :
 - L'arrivée sporadique de petits groupes de trois troncs identiques (en total 60 troncs, 20 groupes à 3 troncs chacun, « un-congested » ou « congested », longueurs homogènes de L_M)
 - L'arrivée de groupes de trente troncs identiques (en total 180 troncs, 6 groupes à 30 troncs chacun, « congested », longueurs homogènes de L_M)
 - L'arrivée des volumes extrêmes comme ils peuvent apparaître lors des crues exceptionnelles (« hyper-congested », Pfister et al. 2019, Bénét et al. 2021).
- 4 positions de râtelier a (sans, proche, moyenne, et distant, équations 1 à 4)
- 2 prolongements de la tête des piliers dans le réservoir (tête de pilier à fleur du front du déversoir étant $p=0$ m, et tête de pilier avec $p=0.08$ m de surplomb).

6.4 FAIBLE APPARITION DE BOIS FLOTTANTS (RÂTELIER PARTIEL, SANS SURPLOMB)

En arrivant sporadiquement (groupe de 3 pièces) à l'évacuateur de crue, les troncs heurtent le râtelier partiel et s'orientent par tendance dans la direction de l'écoulement. Dans une grande majorité des observations, ils franchissent le déversoir sans créer d'obstruction. Parfois, les bois flottants interagissent avec leurs congénères et provoquent des blocages au niveau du râtelier et des piliers de l'évacuateur de crue.

La largeur des passes possède un effet sur la probabilité de blocage. De manière générale, Les passes larges ($b/L_M=0.77$) produisent une plus faible probabilité de blocage que les passes étroites ($b/L_M=0.40$). La probabilité de blocage est également influencée par le débit. Les débits moyens ($\chi=0.67$) entraînent plus difficilement le mouvement des bois flottants avec un courant plus faible que les gros débits ($\chi=1$).

La mise en place d'un râtelier partiel favorise le passage des troncs sous une faible apparition de bois flottants. Les râteliers distant et intermédiaire (positions 1 et 2, équation 1 et 2) donnent une probabilité de blocage faible, si $a/H_R < 4$. Ce type de râtelier apportent une valeur écologique supplémentaire aux bois flottants, en les conservant dans le cours d'eau (Figure 53a).

L'efficacité hydraulique η est augmentée avec la mise en place d'un râtelier partiel comparé à une situation sans râtelier. Typiquement, l'efficacité est supérieure à $\eta \approx 0.80$ à 0.90 avec un râtelier partiel (environ $\eta > 0.65$ sans râtelier, en considérant tous les débits, Figure 53c). Le positionnement du râtelier a n'a pas d'influence majeure sur les résultats.

Le fonctionnement d'un râtelier partiel reflète un comportement assez réjouissant sous une – relativement parlé – faible accumulation de bois flottants, comparé à la situation sans râtelier. Une grande quantité de bois flottants ont franchi le déversoir et la performance hydraulique de l'évacuateur de crue est largement maintenue (typiquement $\eta \approx 0.90$ pour le débit de dimensionnement).

6.5 MOYENNE APPARITION DE BOIS FLOTTANTS (RÂTELIER PARTIEL, SANS SUR- PLOMB)

Les groupes de taille moyenne (30 pièces) ont des difficultés à s'orienter au râtelier partiel dans la direction de l'écoulement. L'interaction entre les troncs est forte, ce qui freine les mouvements de rotation. La plupart des groupes de bois flottants se retrouve bloquer contre le râtelier (ou les piliers) et se dispose sous la forme d'un tapis à l'amont dans le réservoir. Des troncs peuvent rarement obstruer directement l'évacuateur de crue, s'ils franchissent le râtelier partiel.

De manière identique à une faible apparition de bois flottants, des passes larges ($b/L_M = 0.77$) favorisent le passage des troncs (probabilité de blocage plus faible) comparé à des passes étroites ($b/L_M = 0.40$). Les observations sont semblables pour tous les débits. De manière générale, le passage des bois flottants est encouragé par de grands débits ($\chi = 1$) en opposition au faibles débits ($\chi = 0.33$).

Les tests ont montré une grande dispersion de valeurs pour la probabilité de blocage P (Figure 54a). Une grande quantité de bois flottants reste accumulée au râtelier lui-même, étant similaire à la situation sans râtelier. Par tendance, le râtelier distant (position 1, équation 1) montre plutôt une probabilité de blocage relativement petite, en comparaison des autres positions testées (les différences sont faibles). Néanmoins, il est favorable de limiter l'avancement du râtelier partiel aux alentours de $a/H_R < 4$.

L'efficacité relative η est généralement maintenue supérieure à $\eta \approx 0.80$ à 0.85 avec la mise en place d'un râtelier partiel. La position a du râtelier n'a peu d'effet sur cette efficacité. À titre comparatif, l'efficacité est réduite à $\eta \approx 0.65 \dots 0.70$ sans râtelier (Figure 54c).

Le râtelier partiel ne provoque donc quasiment pas de passage supplémentaire de bois flottants sous une moyenne apparition de bois flottants. En revanche, il maintient une performance hydraulique assez élevée à l'évacuateur de crue.

6.6 EXTRÊME APPARITION DE BOIS FLOTTANTS (RÂTELIER PARTIEL, SANS SUR- PLOMB)

Lorsque les troncs se présentent au déversoir sous une forme d'apparition extrême, ils restent, dans la très grande majorité des cas, bloquer au niveau du râtelier (sans avancer aux piliers). Les interactions entre les troncs sont trop importantes pour qu'un mouvement de rotation dans le sens de l'écoulement puisse se produire. Seule la capacité hydraulique est donc étudiée, la probabilité de blocage tend vers $P = 1$.

Le râtelier partiel permet quasiment de conserver libre de tous les bois flottants la section d'écoulement au déversoir. Typiquement, une capacité à $\eta \approx 0.95$ (si $a/H_R < 4$, Figure 55b) est maintenue tant que $0.35 < a/H_R < 4$, particulièrement pour le débit de dimensionnement ($\chi = 1$). Alors que pour la situation sans râtelier, la capacité hydraulique est réduite à un minimum de $\eta \approx 0.70$ à 0.80 (Figure 55a).

Les variations de largeurs des passes et de débit n'influencent pas de manière significative les résultats. La position a du râtelier n'a également pas d'impact dominant sur la capacité hydraulique, dans les conditions testées.

La mise en place de râtelier partiel assure la sécurité de l'évacuateur de crue en conservant une bonne capacité hydraulique. Les bois flottants restent retenus contre le râtelier, ce qui n'est pas souhaitable d'un point de vue écologique mais représente probablement un avantage pour le cours d'eau aval au niveau de sa sécurité. Le passage du tapis produirait en aval du barrage certainement un blocage aux passages étroites (p.ex. piliers ponts) causant des inondations.

6.7 COMBINAISON DE RÂTELIER PARTIEL ET SURPLOMB DES PILIERS

Pour une apparition sporadique ou en petit groupes (« faible »), le râtelier partiel fait passer plus de bois flottants que la situation sans râtelier. Un des deux buts principaux de l'étude est ainsi atteint. Néanmoins, en ce qui concerne la capacité hydraulique du déversoir, les mesures constructives « durs » (sans passage de bois, étant le râtelier complet, un surplomb des piliers ou la suppression des piliers) proposées par Pfister et al. (2019) et Bénét et al. (2021) indiquent généralement une capacité hydraulique légèrement supérieur à celle du râtelier partiel, bien que celui est aussi efficace. La capacité n'est généralement pas négociable, car elle est étroitement liée à la sécurité du barrage.

Afin de combiner l'avantage du râtelier partiel, étant le passage relativement élevé de bois flottants sous une faible apparition, avec une capacité hydraulique quasi non-perturbée, deux mesures peuvent être combinées (sous l'hypothèse que les piliers doivent être conservés). Celles-ci sont le râtelier partiel motivant des bois individuels à s'orienter et franchir le déversoir, et un surplomb des piliers qui garde des troncs – néanmoins bloqués – loin du déversoir en maintenant sa capacité hydraulique.

La probabilité de blocage P de la combinaison de surplomb et râtelier partiel est inférieure à celle du surplomb uniquement (facteur 0.6 à 0.8 selon la position du râtelier, Tableau 10) pour une *faible apparition*. Le râtelier oriente partiellement les troncs et ils franchissent le déversoir. La probabilité de blocage P de la combinaison de surplomb et râtelier partiel est supérieur à celle du râtelier partiel uniquement (facteur 1.6 à 3.3 selon la position du râtelier, Tableau 12).

Les *apparitions moyenne et extrême* de bois n'indiquent aucune différence significative. Le surplomb seul ainsi que sa combinaison avec un surplomb donnent la même P (0.81 et 0.82) pour une apparition moyenne. Cependant, le râtelier seul sans surplomb produit un blocage légèrement inférieur à la combinaison (facteur 0.83 à 0.93 pour une apparition moyenne). La Figure 62 indique que l'avancement du râtelier est à limiter à environ $0.35 < a/H_R < 4$.

La capacité hydraulique pour la combinaison de râtelier et surplomb est de $\eta > 0.85$ pour les faibles débits non-décisifs ($\chi = 0.33$) au niveau de la surélévation de la retenue, et $\eta > 0.95$ pour les grands débits, y inclut $\chi = 1$ (Figure 60b). Les positions 1 et 2 du râtelier produisent quasiment un rendement de $\eta \approx 1$ pour $\chi = 1$. Le type d'apparition des bois n'intervient pas.

Une combinaison de râtelier et surplomb est nécessaire si aucune réduction est acceptée au niveau de la capacité du déversoir (impérativement $\eta \approx 1$) lors de la crue de dimensionnement. Alors, le passage des bois flottants est seulement légèrement augmenté pour une faible apparition de bois. Si plus de flexibilité au niveau de la capacité existe (p.ex. $\eta > 0.8$ est suffisant), un râtelier sans surplomb est plus efficace en ce qui concerne le passage de bois flottants.

6.8 RECOMMANDATION

Chaque disposition d'évacuateur de crue est différente en ce qui concerne son arrangement, la gestion de la retenue et l'arrivée de corps flottants. La situation mérite une analyse approfondie si l'apparition de bois flottants représente un risque potentiel.

La capacité hydraulique du déversoir à l'entrée de l'évacuateur de crue est déterminée par la section critique (située approximativement au point haut du déversoir), qui fixe la courbe de tarage. Les bois flottants doivent conséquemment rester suffisamment distant de cette section, afin de ne pas la perturber et reprendre le contrôle (moins efficace) du débit. L'accès des bois à la section critique est ainsi limité par des installations particulières, notamment un surplomb des piliers ou un râtelier. Les bois s'accumulent alors « loin » du déversoir et sont stockés dans le réservoir durant la crue. Alternativement, les piliers peuvent être supprimés si admissible.

Le râtelier partiel représente une installation alternative. Il a été testé dans le cadre de cette étude et dispose de l'avantage de ne pas seulement maintenir une « grande » capacité du déversoir, mais aussi de faire passer à travers le déversoir un certain nombre supplémentaire de bois arrivant seuls ou en petit groupe. De ce fait, la sécurité de l'évacuateur de crue est maintenue **et** les bois restent partiellement dans le cours d'eau, ou ils peuvent développer leur potentiel écologique.

Chaque cas concret qui pose des problèmes par rapport aux corps flottants doit être analysé individuellement. Les résultats de cette étude soutiennent ce processus, sur la base des connaissances générales qui ont pu être déduites concernant le fonctionnement du râtelier partiel. De manière globale, les tendances suivantes ont pu être identifiées :

1. La sensibilité de la capacité hydraulique d'un évacuateur de crue est à évaluer avant de discuter des mesures à prévoir afin de la maintenir. L'opération du réservoir (volume de réserve) ou des ouvrages dans le cours d'eau (ouvrages de rétention, p.ex. Schwemmholzrechen an der Sihl) peuvent atténuer le potentiel de risque.
2. Le moment de l'arrivée des bois au déversoir est difficile à estimer (par tendance dans la partie croissante de l'hydrogramme), ainsi leur composition. Pour le râtelier partiel, trois types d'arrivée sont testées, couvrant un grand spectre probable. Le paramètre clé dans ce contexte est la longueur maximale L_M des troncs potentiellement emportés, qui suit une étude des arbres dans le bassin versant. Les autres aspects relatifs à la caractéristique des corps flottants ne doivent pas être connus afin d'évaluer le fonctionnement du râtelier partiel.
3. Le paramètre clé en ce qui concerne le passage des bois et la capacité hydraulique est la largeur relative des passes entre les piliers b/L_M (Figure 8). La présente étude soutient implicitement le critère de Godtland et Tesaker (1994) qui dit que la problématique des corps flottants aux entrées des évacuateurs de crue est prononcée si $b/L_M < 0.80$.
4. Si la capacité hydraulique est limitante et doit absolument être maintenue (p.ex. à $\eta \approx 0.95$), le passage supplémentaire de bois flottants « au fil de l'eau » ne semble pas faisable de manière « autonome » et systématiquement (il doit se faire mécaniquement, si souhaitable). Une des mesures proposées par Bénet et al. (2021) ou mieux encore la combinaison de râtelier partiel et du surplomb des piliers sont à installer (Tableau 10). Le passage des bois flottants à travers le déversoir avec les mesures combinées (surplomb et râtelier partiel) est clairement réduit par rapport au râtelier partiel seulement (sans surplomb), mais augmenté par rapport à l'installation d'un surplomb uniquement (sans râtelier). La capacité hydraulique de la combinaison du râtelier et du surplomb est

quasiment non-perturbée (aux alentours de $\eta \approx 0.97$ pour des débits très élevées, Tableau 11). La position du râtelier partiel est à prévoir selon les remarques du prochain point 5.

5. Si les conditions permettent une certaine réduction de la capacité hydraulique (p.ex. à $\eta \approx 0.85$, une surélévation limitée de la retenue reste sans conséquence), le passage supplémentaire des bois peut être envisagé à l'aide d'un râtelier partiel (sans surplomb des piliers). Celui-ci inclut une barre devant chaque deuxième pilier, positionné à une distance a étant « distant » (équation 1, Figure 8) ou « intermédiaire » (équation 2), tout en restant dans la gamme de $0.35 < a/H_R < 4$ en amont du front vertical du déversoir standard. A noter que H_R est la charge de référence sans bois, de préférence du débit de dimensionnement. La capacité résiduelle avec des bois est (en moyenne par géométrie et gamme de débits) aux alentours de $\eta = 0.87$ à 0.98 (selon configuration, Tableau 11), et la probabilité de blocage baisse significativement pour des faibles apparitions des bois (Tableau 12). Pour des autres apparitions, elle ne change pas significativement.
6. Finalement, il faut souligner que le râtelier partiel (avec ou sans surplomb) soutient le passage des bois flottants pour des faibles apparitions (« uncongested ») de tronc individuel ou en très petit groupe (constitué de 3 éléments dans l'étude). Les troncs sont alors suffisamment libres pour pouvoir pivoter partiellement au râtelier et franchir de déversoir. Pour une apparition en tas (« congested ») ou extrême (« hyper-congested ») cette possibilité est inexistante à la suite des interactions, les troncs restent dans leur formation et se bloquent contre le râtelier. Le râtelier ne génère alors pas de passage supplémentaire.
7. Le passage des bois est soutenu pour une apparition individuelle, et bloqué pour des grands groupes de bois. L'aspect écologie est alors (partiellement) atteint (apparition « uncongested »), et le cours d'eau en aval du barrage reste protégé des très grandes quantités (apparition « congested ») de bois lors des cures.

7 NOTATION

a	avancement du râtelier (par rapport au front vertical du déversoir, équations 1 à 4) [m]
b	largeur d'une passe [m]
C_d	coefficient du déversoir, équation 6 [-]
C_{dR}	coefficient de déversoir de référence (sans bois, capacité libre) [-]
D	diamètre des troncs [m]
g	accélération de la gravité [m/s ²]
H	charge du déversoir [m]
H_D	charge de dimensionnement du déversoir (ici $H_D=0.15$ m) [m]
H_R	charge de référence (sans bois, capacité libre) [m]
L	longueur des troncs [m]
L_M	longueur des troncs les plus longs (ici $L_M=0.433$ m) [m]
n	nombre de passes ouvertes [-]
P	probabilité de blocage des troncs [-]
Q	débit [m ³ /s]
V	volume de bois flottants [m ³]
W	décalage vertical entre le fond du canal et la crête du déversoir [m]
X	charge relative, équation 7 [-]
η	taux d'efficacité du déversoir, équation 8 [-]

8 RÉFÉRENCES

- Bénet, L., De Cesare, G., Pfister, M. (2021). Reservoir level rise under extreme driftwood blockage at ogee crest. *Journal of Hydraulic Engineering* 147(1), 04020086.
- Bezzola, G.R., Hegg, C., eds. (2007). *Ereignisanalyse Hochwasser 2005*, Bundesamt für Umwelt & Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Bern.
- Bocchiola, D., Rulli, M.C., Rosso, R. (2008). A flume experiment on the formation of wood jams in rivers. *Water Resources Research*, 44(2), 1-17.
- Braudrick, C.A., Grant, G.E., Ishikawa, Y., Ikeda, H. (1997). Dynamics of Wood Transport in Streams: A Flume Experiment. *Earth Surface Processes and Landforms*, 22(7), 669-683.
- Bruschin, J., Bauer, S., Delley, P., Trucco, G. (1981). The overtopping of the Palagnedra dam. *Water Power & Dam Construction* 34(1), 13-19.
- Bulliard, J., Lauper, S. (2019). *Influence du bois mort dans les cours d'eau pour les peuplements piscicoles*. Service des forêts et de la nature SFN, Etat de Fribourg.
- De Cicco, P.N., Paris, E., Solari, L., Ruiz-Villanueva, V. (2020). Bridge pier shape influence on wood accumulation: Outcomes from flume experiments and numerical modelling. *J Flood Risk Management* 2020(13), 12599
- Fausch, K.D., Northcote, T.G. (1992). Large woody debris and salmonid habitat in a small coastal British Columbia stream. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 49(4), 682-693.
- FHWA (2005). Debris control structures, evaluation and countermeasures. *Report FHWA-IF-04-016*, US Department of Transportation.
- Furlan, P. (2019). Blocking probability of large wood and resulting head increase at ogee crest spillways. Ph.D. *Thesis* 9040, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Gafner, K., Hermund, C., Dönni, W., Mende, M. (2015). Du bois dans les cours d'eau : *Du bois mort pour des cours d'eau vivants*. Direction de l'économie publique du canton de Berne, Office de l'agriculture et de la nature (OAN), Inspection de la pêche Fonds de régénération des eaux, Berne
- Ghaffarian, H., Piégay, H., Lopez, D., Rivière, N., MacVicar, B., Antonio, A. (2020). Video-monitoring of wood discharge: first inter-basin comparison and recommendations to install video cameras. *Earth Surface Processes and Landforms* 45(10), 2219-2234.
- Godtland, K., Tesaker, E. (1994). Clogging of spillways by trash. Proc. Intl. Conf. ICOLD, Durban, Q68, R36, 543-557.
- Gschnitzer, T., Gams, B., Aufleger, M., Mazzorana, B., Comiti, F. (2015). On the evaluation and modelling of wood clogging processes in flood related hazards estimation. *Engineering Geology for Society and Territory* (3), 139-142.
- Hager, W.H., Schleiss, A.J., Boes, R.M., Pfister, M. (2020). *Hydraulic Engineering of Dams*. Taylor and Francis, London.
- Hartford, D.N.D., Baecher, G.B., Zielinski, P.A., Patev, R.C., Ascila, R., Rytters, K. (2016). *Operational Safety of Dams and Reservoirs*, Chapter 7, 173-219. ICE Publishing, London.
- Hartlieb, A. (2012a). Modellversuche zur Verklauung von Hochwasserentlastungsanlagen mit Schwemmholz. *WasserWirtschaft* 6, 15-19.
- Hartlieb, A. (2012b). Large-scale hydraulic model tests for floating debris jams at spillways, 2nd IAHR Europe Congress, Munich.
- Hartlieb, A., Bezzola, G.R. (2000). Ein Überblick zur Schwemmholzproblematik. *Wasser Energie Luft* 92(1/2), 1-5.

- Hartung, F., Knauss, J. (1976). Considerations for spillways exposed to dangerous clogging conditions. *Proc. Intl. Conf. ICOLD*, Mexico, Q47, R2, 741-749.
- Johansson, N., Cederström, M. (1995). Floating debris and spillways. *Proc. Intl. Conf. Waterpower '95*, ASCE, New York, 2106-2115.
- Kramer, N., Wohl, E. (2014). Estimating fluvial wood discharge using time-lapse photography with varying sampling intervals. *Earth Surface Processes and Landforms* 39(6), 844-852.
- Lange, D., Bezzola, G.R. (2006). Schwemmholz, Probleme und Lösungsansätze. *VAW Mitteilung* 188, ETH Zürich.
- Lassus, C., Vermeulen, J., Idelon, C., and Guyot, G. (2019). Influence of log jam visor on flow rate at a standard spillway. *Proc. 38th IAHR World Congress*, 536-546, Panama City, Panama.
- Lyn, D.A., Cooper, T., Yi, Y.K., Sinha, R.N., Rao, A.R. (2003). Debris accumulation at bridge crossings, laboratory and field studies. *Report FHWA/IN/JTRP-2003/10*, Joint Transportation Research Program, Purdue University, West Lafayette, IN.
- MacVicar, B., Piégay, H. (2012) Implementation and validation of video monitoring for wood budgeting in a wandering piedmont river, the Ain River (France). *Earth Surface Processes and Landforms* 37(12), 1272-1289.
- McFadden, T., Stallion, M. (1976). Debris at the Chena River. *CRREL Report* 76-26, USACE, Hanover.
- Mende, M. (2018). Lebendige Gewässer mit Totholz. *Ingenieurbiologie* 28(2), 1-76 (https://is-suu.com/ingenieurbiologie/docs/ingenieurbiologie_2018_2).
- Möller, G., Weitbrecht, V., Nussle, D. (2009). Matteschwelle Bern – Erkenntnisse zur Hochwassersicherheit aus hydraulischen Modellversuchen. *Wasser Energie Luft* 101(2), 83-88.
- Naiman, R.J., Balian, E.V., Bartz, K.K., Bilby, R.E., Latterell, J.J. (2002). Dead Wood Dynamics in Stream Ecosystems. *Tech. Rep. PSW-GTR-181*, USDA Forest Service Gen.
- Perham, E.R. (1986). Floating debris control system for hydroelectric plant intakes. *The REMR Bulletin* (3)2, USCE, 1-3.
- Pfister, M. (2010). Schwemmholzrückhalt beim Einlaufbauwerk zum Lyssbachstollen. *Wasser Energie Luft* 102(4), 275-280.
- Pfister, M., Capobianco, D., Tullis, B., Schleiss, A.J. (2013). Debris blocking sensitivity of Piano Key weirs under reservoir type approach flow. *Journal of Hydraulic Engineering* 139(11), 1134-1141.
- Pfister, M., De Cesare, G., Bénet, L. (2019). Effet des bois flottants bloquant un évacuateur de crue sous des conditions extrêmes. *Rapport final*, Office fédéral de l'énergie OFEN, Berne.
- Pfister, M., Ribi, J.-M. (2020). Les modèles réduits des ouvrages particuliers dans les réseaux de canalisations. *Séminaire Hydraulique des Canalisations*, VSA, HEIA-FR, Fribourg.
- Rickli, C., Hess, J. (2009). Aspects de la formation des bois flottants. *Cours de formation continue KHOS « Protection contre les crues »*, Fribourg, 1-15.
- Ruiz-Villanueva, V., Mazzorana, B., Bladé, E., Bürkli, L., Iribarren-Anacona, P., Mao, L., Nakamura, F., Ravazzolo, D., Rickenmann, D., Sanz-Ramos, M., Stoffel, M., Wohl, E. (2019). Characterization of wood-laden flows in rivers. *Earth Surface Processes and Landforms* 44(9), 1694-1709.
- Ruiz-Villanueva, V., Piégay, H., Gurnell, A. M., Marston, R. A., Stoffel, M. (2016). Recent advances quantifying the large wood dynamics in river basins: New methods and remaining challenges. *Reviews of Geophysics*, 54(3), 611-652.
- Schalko, I. (2017). Large Wood Accumulation Probability at a Single Bridge Pier. *37th IAHR World Congress*, Kuala Lumpur, Malaysia.

- Schalko, I., Schmocker, L., Weitbrecht, V., Boes, R.M. (2019). Gefahrenbeurteilung von Schwemmholtzverklausungen in Flüssen: Teil 2 - Aufstau. *Wasser Energie Luft* 111(2), 69-75
- Schalko, I., Schmocker, L., Weitbrecht, V., Boes, R.M. (2020). Risk reduction measures of large wood accumulations at bridges. *Environmental Fluid Mechanics* 2020(20), 485-502
- Schmocker, L. (2017). Floating debris retention racks at dam spillways. Proc. 37th IAHR *World Congress*, 1-8, Kuala Lumpur, Malaysia.
- Schmocker, L., Hager, W.H. (2013). Scale modelling of wooden debris accumulation at a debris rack. *Journal of Hydraulic Engineering* 139(8), 827-836.
- Schmocker, L., Weitbrecht, V. (2013). Driftwood: Risk analysis and engineering measures. *Journal of Hydraulic Engineering* 139(7), 683-695
- Shrestha, B.B., Nakagawa, H., Kawaike, K., Baba, Y., Zhang, H. (2011). Driftwood deposition from debris flows at slit-check dams and fans. *Natural Hazards* 61(2), 577-602.
- STK (2017). *Floating debris at reservoir dam spillways*. Report Swiss Committee on Dams, Lucerne, Switzerland.
- USACE (1997). Debris control at hydraulic structures in selected areas of the United States and Europe. *Contracts Report CHL-97-4*, US Army Corps of Engineers, WES.
- Vischer, D.L., Hager, W.H. (1999). *Dam Hydraulics*. John Wiley & Sons, Chichester, US.
- Walker, K., Hasenbalg, J., Monahan, S., and Sprague, N. (2018). Physical model of spillway and reservoir debris interaction. *USSD Conference & Exhibition*, 1-16, Miami, FL.
- Wallace, J.B., Webster, J., Rmeyer, J.L. (1995). Influence of log additions on physical and biotic characteristics of a mountain stream. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 52(10), 2120-2137.
- Wohl, E., Bledsoe, B.P., Fausch, K.D., Kramer, N., Bestgen, K.R., Gooseff, M.N. (2016). Management of Large Wood in Streams: An Overview and Proposed Framework for Hazard Evaluation. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 52(2), 315-335.

Responsable de l'étude	Prof. Dr. Michael Pfister, HEIA-FR
Collaborateur scientifique	Loïc Bénét, HEIA-FR
Partenaire scientifique	Dr. Giovanni de Cesare, PL-LCH, EPFL
Partenaire financier primaire	Programme interdisciplinaire du domaine I&A, HES-SO
Partenaire financier secondaire	Office fédéral de l'énergie, recherche énergétique et cleantech

Haute école d'ingénierie et d'architecture de Fribourg HEIA-FR

Institut des Technologies de l'Environnement Construit iTEC & Filière Génie Civil

Bd de Pérolles 80, CH-1705 Fribourg
