



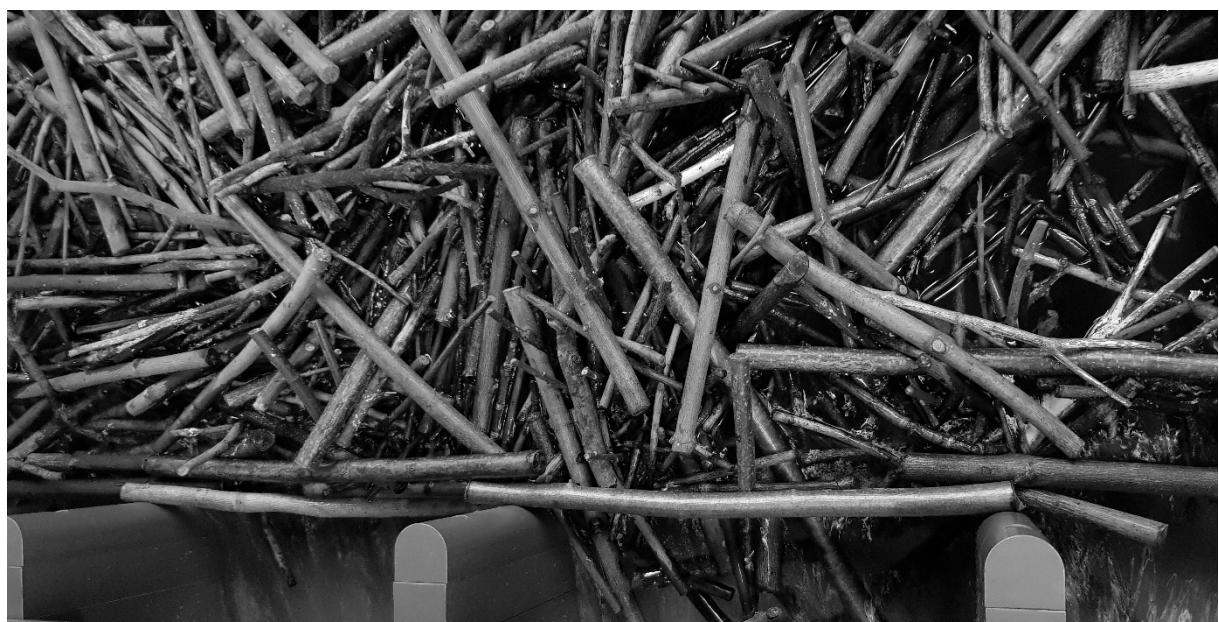
Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et
de la communication DETEC

Office fédéral de l'énergie OFEN
Recherche énergétique et cleantech

Rapport final du 22.11.2019

Effet des bois flottants bloquant un évacuateur de crue sous des conditions extrêmes



Source: HEIA-FR (HES-SO) et EPFL/PL-LCH, photo Loïc Bénet (test 60)



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

EPFL

Date: 22.11.2019

Lieu: Fribourg et Lausanne

Prestataire de subventions:

Office fédéral de l'énergie OFEN
Section Recherche énergétique et cleantech
CH-3003 Berne
www.ofen.admin.ch

Bénéficiaires de la subvention :

HES-SO HEIA-FR iTEC
Bd de Pérolles 80
CH-1700 Fribourg
www.heia-fr.ch

EPFL ENAC IIC PL-LCH
Station 18
CH-1015 Lausanne
www.epfl.ch

Auteurs:

Michael Pfister, HEIA-FR (HES-SO), michael.pfister@hefr.ch
Giovanni De Cesare, EPFL, giovanni.decesare@epfl.ch
Loïc Bénet, HEIA-FR (HES-SO)

Suivi du projet à l'OFEN:

BFE-Bereichsleitung: Michael Moser, michael.moser@bfe.admin.ch
BFE-Programmleitung: Klaus Jorde, klaus.jorde@kjconsult.ch

Numéro du contrat de l'OFEN: SI/501740-01



Zusammenfassung

Hochwasserentlastungsanlagen von Talsperren müssen selbst bei einem extremen Zufluss eine ausreichende Abflusskapazität gewährleisten. Mit geführtes Schwemmgut kann bei Hochwasser gefährliche Verklausungen auf Überfallbauwerken verursachen und deren Funktionalität und Abflussfähigkeit einschränken. Solche Verklausungen reduzieren u.U. die Abflusskapazität und erzeugen dadurch einen Überstau im Reservoir. Trotzdem dürfen Verklausungen die Wahrscheinlichkeit eines Versagens der Talsperre nicht erhöhen.

Dieser Bericht fasst eine physikalische Modellstudie zusammen, welche die Wirkung von Schwemmgut auf die Überfallhöhe eines Standardüberfalls mit Drucksegmenten (hier vollständig geöffnet) untersucht. Abgesehen vom Fall ohne Massnahmen werden drei konstruktive Ansätze vorgestellt, um den negativen Einfluss von Holz auf die Pegel-Abfluss-Beziehung zu verringern oder zu beseitigen. Folgende Beobachtungen wurden im Rahmen der Modellversuche gemacht:

- Ein extremes und konzentriertes Auftreten von Schwemmgut blockiert einen Standardüberfall mit Pfeilern. Godtland und Tesaker (1994) geben an, dass die Verklausung auftritt, sofern $b/L_M < 0.80$ ist, d.h. wenn die Breite des Wehrfeldes b weniger als 80% der längsten ankommenden Baumstämme L_M beträgt.
- Das Kriterium von Godtland und Tesaker (1994) wurde hier nicht getestet, aber die Tests bestätigten eine vollständige Verklausung sofern $b/L_M < 0.77$ ist.
- Der Überstau im Reservoir infolge einer Verklausung (ohne Gegenmassnahmen) wurde mithilfe eines reduzierten Überfallkoeffizient C_D ausgedrückt (verglichen mit einem "freien" Überfall ohne Verklausung).
- Ohne Gegenmassnahmen und bei einer vollständigen Verklausung wurde im Modell ein Mittelwert des Überfallkoeffizienten von $C_D = 0.373$ beobachtet. Letzterer war unabhängig vom Abfluss (bis zum Bemessungsabfluss), der relativen Breite der Wehrfelder (solange $b/L_M \leq 0.77$) und dem Volumen des Schwemmholzes (solange das Volumen "extrem" gross bleibt, Erklärungen dazu im Bericht). Mit Bezug auf die Streuung der gemessenen Werte, welche typisch für Schwemmholz ist, wird für die Praxis ein Koeffizient von $C_{DD} = 0.352$ empfohlen (nach Abzug der Standardabweichung vom Mittelwert).
- Ins Reservoir überhängende Pfeiler verringern den negativen Effekt von Schwemmholz auf die Pegel-Abfluss-Beziehung. Die Wirkung einer vollständigen Verklausung auf C_D ist vernachlässigbar, sofern der Pfeilerüberhang p ins Reservoir ungefähr 0.30 bis 0.35H (H ohne Schwemmholz) überschreitet.
- In Abwesenheit der Pfeiler (b/L_M ist "gross") wurde keine Auswirkung des Schwemmholzes auf C_D beobachtet, sofern der maximale Stammdurchmesser D_M weniger als 0.35H betrug (H ohne Schwemmholz). Eine teilweise Verklausung wurde für Stammdurchmesser von 0.35H bis 0.60H beobachtet, und eine vollständige Verklausung für Durchmesser über 0.60H.
- Ein "vollständiger" Grobholzrechen (ein Stab vor jedem Wehrpfeiler, das Godtland und Tesaker (1994) Kriterium wird erfüllt), der im Abstand von 0.5b oberstrom der Wehrfront positioniert ist, beseitigt den Effekt einer Verklausung beim Wehr. Der Überfall bleibt voll leistungsfähig, wie bereits bei den überhängenden Pfeilern.
- Ein "aufgelöster" Grobholzrechen mit einem Stab bei jedem zweiten Pfeiler erfüllt das Kriterium von Godtland und Tesaker (1994) nicht. Infolgedessen dringt das Schwemmholz bis zum Überfall vor und stört dort teilweise die Abflusskapazität.



- Bei den hier vorgestellten Modellversuchen wurde nur ein extremes Schwemmhholzaufkommen untersucht, welches als kompakter Teppich zum Überfall gelangt, was einem extremen Szenario entspricht. Kleine Gruppen von Schwemmhölzern, die kontinuierlich eintreffen, können sich anders verhalten. Darüber hinaus beziehen sich die hier vorgestellten Ergebnisse nur auf den Fall eines Reservoirs vor einem Standardüberfall.

Résumé

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. Mais, ils ne doivent pas augmenter la probabilité de rupture du barrage.

Une étude sur modèle réduit est présente dans ce rapport afin de tester l'effet des bois flottants sur la charge en amont d'un déversoir standard équipé avec des vannes (ici complètement ouvertes). Mise à part l'étude de cas sans mesures, trois approches constructives sont présentes afin de réduire ou éliminer l'effet négatif des bois flottants sur la courbe de tarage. Les observations suivantes ont été faites dans le cadre des essais sur modèle :

- Une occurrence extrême et instantanée de bois flottants a bloqué un déversoir standard avec des piliers. Godtland et Tesaker (1994) affirment que le blocage apparaît si $b/L_M < 0.80$, c'est-à-dire si la largeur de la passe b est inférieure à 80% des troncs les plus longs L_M arrivant.
- Le critère de Godtland et Tesaker (1994) n'a pas été testé ici, mais les tests ont confirmé un blocage si $b/L_M < 0.77$.
- Sans contre-mesures, l'élévation supplémentaire de la charge du déversoir a été exprimée au moyen du coefficient du déversoir C_D réduit sous un blocage de bois flottants (et comparé par rapport à un déversement « libre »).
- Sans contre-mesures et pour un blocage complet une valeur moyenne de $C_D = 0.373$ a été observée dans le modèle. Cette dernière était indépendante 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 reste « extrême », voir explications dans le rapport). En ce qui concerne la variation des données, étant typique pour les bois flottants, un coefficient du côté de la sécurité de $C_{DD} = 0.352$ est recommandé pour la pratique (en soustrayant l'écart type des données de leur moyenne).
- Les piliers avec une tête prolongée ont réduit l'effet négatif des bois flottants sur la courbe de tarage. L'effet d'un déversoir complètement bloqué sur C_D est absent si le prolongement des piliers p dans le réservoir dépasse environ 0.30 à 0.35H (H sans bois flottants).
- En l'absence de piliers (b/L_M est « grand »), aucun effet d'un blocage des bois flottants sur C_D n'a été observé si le diamètre maximal du tronc D_M était inférieur à 0.35H (charge de référence H sans bois flottants). Un blocage partiel a été observé pour les diamètres de troncs de 0.35H à 0.60H, et un blocage complet pour les diamètres supérieurs à 0.60H.
- Un râtelier « complet » (une barre par pilier, respectant le critère Godtland et Tesaker, 1994) positionné à 0.5b en amont de la crête du déversoir, a éliminé tout effet des bois flottants bloqués sur le râtelier. Le déversoir fonctionne à pleine capacité, tout comme l'installation avec les piliers dont la tête était prolongée dans le réservoir.



- Le râtelier « partiel » testé ici, avec une barre sur deux piliers, ne respectait pas le critère de Godtland et Tesaker (1994). Par conséquent, les bois flottants ont pénétré jusqu'à la crête du déversoir et a partiellement perturbé la capacité de déversement.
- Dans ces essais, seul un volume extrême de bois flottants arrivant instantanément au déversoir a été testé, présentant un scénario extrême. Les petits lots qui arrivent en continu peuvent se comporter différemment. De plus, les résultats présentés ici sont reliés à une approche réservoir et à une crête de déversoir standard seulement.

Summary

Dam spillways must guarantee a sufficient discharge capacity even during extreme floods. Driftwood can induce dangerous obstructions to spillways during floods and limit their functionality and discharge capacity. Blockages can increase the reservoir level in an uncontrolled manner and thereby cause dam submersion. Nevertheless, driftwood must not increase the probability of dam failure.

A physical model study is presented in this report focusing on the effect of driftwood on the head upstream of a standard weir equipped with piers and segments (here completely opened). Apart from test series without countermeasures, three constructive approaches are presented to reduce or eliminate the negative effect of driftwood on the rating curve. The following observations were made in the context of the model tests:

- An extreme and instant occurrence of driftwood blocked a standard weir with piers. Godtland and Tesaker (1994) state that the blockage appears if $b/L_M < 0.80$, that is, if the width of the pass b is less than 80% of the longest trunks L_M arriving.
- The criterion of Godtland and Tesaker (1994) has not been tested herein, but the tests confirmed a driftwood blockage if $b/L_M < 0.77$.
- Without countermeasures, the weir head rise under driftwood blockage could be expressed with a reduced weir discharge coefficient C_D (as compared to a "free" overflow).
- Without countermeasures and for a complete blocking an average value of $C_D = 0.373$ was observed in the model. The latter was independent of the discharge (up to the design flow), the relative width of the passes (as long as $b/L_M \leq 0.77$) and the driftwood volume (as long as the volume remains "extreme", see explanations in the report). With respect to data variation, being typical for driftwood problems, a conservative coefficient of $C_{DD} = 0.352$ is recommended for practice (subtracting the standard deviation of the average value).
- Piers with an overhanging nose (protruding into the reservoir) reduced the negative effect of driftwood on the rating curve. The effect of a completely blocked weir on C_D is absent if the overhang of the piers p into the reservoir exceeds approximately 0.30 to 0.35H (reference head H without driftwood).
- In the absence of piers (b/L_M is "large"), no effect of the driftwood on C_D was observed if the maximum trunk diameter D_M was less than 0.35H (reference head H without driftwood). Partial blockage was observed for trunk diameters from 0.35 to 0.60H, and complete blockage for diameters exceeding 0.60H.
- A "complete" rack (one bar per pier, meeting the Godtland and Tesaker (1994) criteria), positioned 0.5b upstream of the vertical weir front, eliminated any effect of driftwood being stuck on the rack. The spillway operated at full capacity, as did the installation with the overhanging piers.



- A "partial" rack was also tested herein, with one bar every second pier only. The latter did not meet the Godtland and Tesaker (1994) criteria. As a result, the driftwood penetrated to the crest of the spillway and partially disturbed the spilling capacity.
- In the conducted experiments, only an extreme volume of driftwood arriving instantly at the spillway was tested, presenting an extreme scenario. Small batches that arrive continuously may behave differently. In addition, the results presented here are related to a reservoir approach and a standard weir crest only.

Take-home messages

- Schwemmgut wird in Schweizer Fliessgewässern während extremen Hochwässern häufig transportiert. Trifft es auf den Einlauf einer Hochwasserentlastungsanlage einer Talsperre, kann es diesen verstopfen. Als Konsequenz steigt der Wasserspiegel in der Stauhaltung unkontrolliert an und kann zu einem Überströmen der Talsperre führen, was eventuell deren Sicherheit gefährdet.
- Die reduzierte Abflusskapazität eines Standardüberfalls mit Wehrpfeilern, welcher vollständig verklaut ist, kann mittels einem reduzierten Überfallkoeffizienten von $C_{DD}=0.352$ berücksichtigt werden. Dieser Wert folgt aus umfangreichen Modellversuchen, und hängt weder vom Abfluss (bis zum Bemessungsabfluss), der Wehrfeldbreite (sofern diese nicht zu gross ist und das Schwemmholt durchleitet), noch den Schwemmholtvolumen (sofern diese sehr gross ist) ab.
- Der negative Einfluss einer Verklausung kann vermieden werden, sofern genügend weit überhängende Pfeiler vorgesehen werden, die Pfeiler entfernt werden und damit das Schwemmholt durchgeleitet wird, oder sofern ein dichter Rechen genügend weit vor dem Überfall vorgesehen wird.



Table des matières

1	Introduction.....	9
1.1	Motivation	9
1.2	Questions clés	9
2	Etat de l'art	11
2.1	Littérature.....	11
2.1.1	Etudes de référence	11
2.1.2	Caractéristique des bois flottants	12
2.1.3	Probabilité de blocage	12
2.1.4	Conséquences aux évacuateurs de crue.....	14
2.1.5	Répétitions des tests	15
2.1.6	Recommandations.....	16
2.2	Observations in situ.....	20
2.2.1	Barrage de Palagnedra	20
2.2.2	Barrage de Schlattli	22
2.2.3	Barrage de Montsalvens.....	22
2.2.4	Barrage du Käppelistutz	23
2.2.5	Barrage de Thurnberg	23
2.2.6	Barrage de Gtins.....	24
2.2.7	Barrage de Yazagyo.....	25
2.3	Conclusions	25
3	Méthode	26
3.1	Modèle réduit.....	26
3.2	Bois flottants	28
3.3	Fiabilité des résultats.....	31
3.3.1	Validation du modèle	31
3.3.2	Effets de modèle.....	32
3.3.3	Effets d'échelle	33
3.4	Méthodologie	34
3.4.1	Variation des paramètres	34
3.4.2	Programme de tests	37
3.4.3	Fiche de test	42
3.4.4	Procédure de test	42
3.4.5	Nombre de répétitions des tests.....	44
4	Résultats.....	46
4.1	Observations générales.....	46
4.2	Essais sans mesures au déversoir.....	47



4.2.1	Effet du débit	47
4.2.2	Effet du volume de bois flottants	49
4.2.3	Effet de la largeur des passes	56
4.2.4	Effets combinés	60
4.2.5	Dimensions du tapis	62
4.3	Essais avec mesures au déversoir.....	65
4.3.1	Têtes des piliers prolongés dans le réservoir.....	65
4.3.2	Déversoir sans piliers	71
4.3.3	Mise en place d'un râtelier.....	75
5	Application au cas de Palagnedra	79
5.1	Hypothèses.....	79
5.2	Charges	79
5.3	Interprétation	79
6	Conclusions	81
6.1	Contexte	81
6.2	Modèle physique	81
6.3	Essais sans mesures au déversoir.....	81
6.4	Essais avec mesures au déversoir.....	82
7	Publications	84
8	Notation	84
9	Bibliographie.....	85



1 Introduction

1.1 Motivation

Le bois dans les cours d'eau a des effets positifs sur la richesse de la faune et la complexité morphologique et hydraulique des cours d'eau. Dans les bassins versants forestiers, des crues peuvent transporter de grandes quantités de matériaux flottants vers les réservoirs. L'accumulation de ces bois flottants aux ouvrages de sécurité peut avoir d'importantes répercussions négatives sur le fonctionnement des barrages.

Les barrages sont des structures indispensables à la civilisation moderne, car ils fournissent entre autres de l'eau pour l'irrigation et la production d'électricité. Cependant, ils peuvent constituer une menace s'ils ne sont pas conformément dimensionnés et opérés. Une des menaces est le blocage de l'entrée de l'évacuateur de crue par des bois flottants. Près des structures, les bois flottants peuvent bloquer et ainsi réduire la zone d'écoulement libre de l'eau, ce qui entraîne une réduction de la capacité de décharge et une augmentation incontrôlée du niveau de la retenue.

Les évacuateurs de crue des barrages doivent garantir une capacité suffisante de débit en cas de crue extrême, sans de dépasser le niveau de sécurité dans la retenue. Plusieurs événements qui se sont déroulés en Suisse ou à l'étranger démontrent qu'il est nécessaire d'analyser ces phénomènes de blocage, tels le barrage de Palagnedra (TI) en 1978 (Figure 1a), celui de Schlatti (SZ) en 2010 (Figure 1b) ou encore le cas de Montsalvens (FR) en 2015. Une étude de plusieurs observations in situ est disponible au chapitre 2.2.

Bien que les connaissances sur le comportement des bois flottants aient augmenté ces dernières années, le risque engendré par un blocage complet d'une structure hydraulique sous une crue extrême étant combinée avec une apparition d'un volume de bois flottants extraordinaire n'a guère été approfondi. La présente étude examine exactement des tels cas extrêmes pour l'entrée standard d'un évacuateur de crue équipé avec des piliers (comme fixation des vannes).

1.2 Questions clés

Le but de cette présente étude est d'ajouter des connaissances générales applicables, qui aident les maîtres d'ouvrage à évaluer la surélévation du plan d'eau dans la retenue suite à un blocage complet de bois flottants.

Afin d'évaluer l'effet des bois flottants bloquant un évacuateur de crue, une observation approfondie du phénomène est nécessaire. Définir les paramètres-clés qui influencent l'effet de blocage est essentiel. Plusieurs questions peuvent être formulées dans ce sens :

- Quel est l'effet du blocage d'un volume de bois flottants sur les caractéristiques hydrauliques des évacuateurs de crue (modification de la courbe de tarage) ?
- Quelles largeurs des passes entre les piliers peuvent être considérées comme sensibles ?
- Quelle est l'influence de différents volumes de bois flottants arrivant contre un évacuateur de crue ?
- Comment le volume de bois flottants se dispose en amont de l'ouvrage de retenue ?
- Quelles mesures, mises en œuvre près de l'entrée du déversoir (déjà construit, par exemple), sont efficaces pour réduire l'impact de bois flottants, et donc pour maintenir la courbe de tarage libre ?



Le blocage d'un déversoir peut être dangereux et hasardeux. Le caractère aléatoire du phénomène a été reconnu comme un aspect crucial. Une amélioration du savoir permettrait une meilleure évaluation des risques et d'améliorer la conception hydraulique des structures.

Peu d'études se sont concentrées sur le fait que les bois flottants peuvent obstruer complètement les évacuateurs de crue. Le focus des tests documentés dans la littérature est plutôt mis sur la probabilité de blocage pour une arrivée successive des bois flottants.

La présente étude se concentre donc sur une occurrence extrême de bois flottants, étant déjà proche du déversoir lors de sa mise en œuvre. En parallèle, des débits extrêmes – incluant le débit de dimensionnement du déversoir – sont considérés. L'augmentation de la charge, étant identique avec le niveau d'eau dans la retenue, est prise en compte, quand un blocage complet et total peut être supposé.

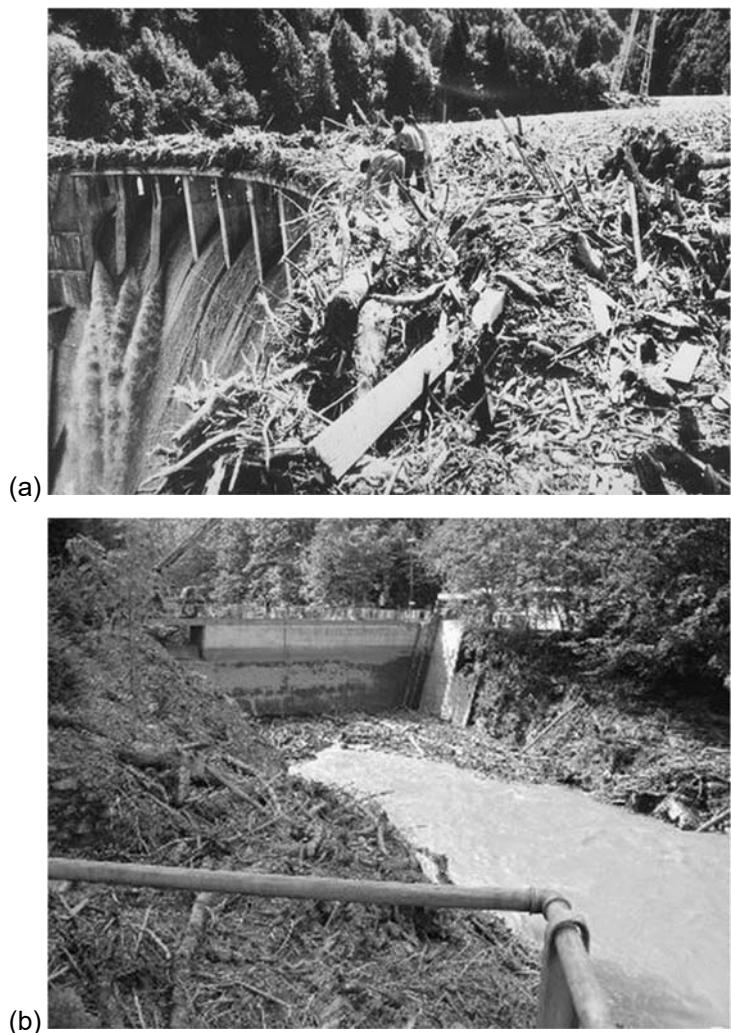


Figure 1. Obstruction de l'évacuateur de crue du barrage de (a) Palagnedra (Ofima), et (b) Schlattli (ebs Energie AG).



2 Etat de l'art

2.1 Littérature

De nombreuses publications sont à disposition sur les bois flottants. Elles traitent un large horizon allant de leurs formations en passant par leurs rôles sur la diversité, leurs transports et leurs blocages jusqu'à leurs destructions.

2.1.1 Etudes de référence

Quelques auteurs ont publié des articles sur les bois flottants aux évacuateurs de crue :

- 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.
- 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 un modèle d'étude physique lié aux déversoirs à touches de Piano (PKW). 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 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.
- Schmocke 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.

D'autres auteurs ont publié des mesures d'atténuation des bois flottants :

- Perham (1986) discute des mesures à prendre pour maintenir les grilles libres aux entrées des évacuateurs de crue.
- Schmocke et Hager (2013) présentent une étude de modèle physique sur l'accumulation de bois flottants sur les râteliers. Les bois flottants n'ont qu'un effet mineur sur l'augmentation du niveau d'eau résultant.
- 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.

2.1.2 Caractéristique des bois flottants

Selon Furlan (2019), un bois appelé « grand » a été défini 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., 2016b et Wohl et al., 2016). La Figure 2 montre, à titre d'exemple, les fractions de bois flottants qui peuvent constituer un volume.

La taille et la forme des éléments en bois 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 (Pfister et al., 2013). 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. Ces caractéristiques sont considérées pour la production des bois flottants utilisés dans l'étude présente.



Figure 2. Exemple de bois flottants, barrage de Yarzagyo au Myanmar en 2015 (Irrigation Department, Myanmar).

2.1.3 Probabilité de blocage

Des publications concernant la probabilité de blocage d'un seul tronc ou d'une série de troncs aux déversoirs sont résumées par Furlan (2019) :

- 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 pont. 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, Schmocke 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) elle-même 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.

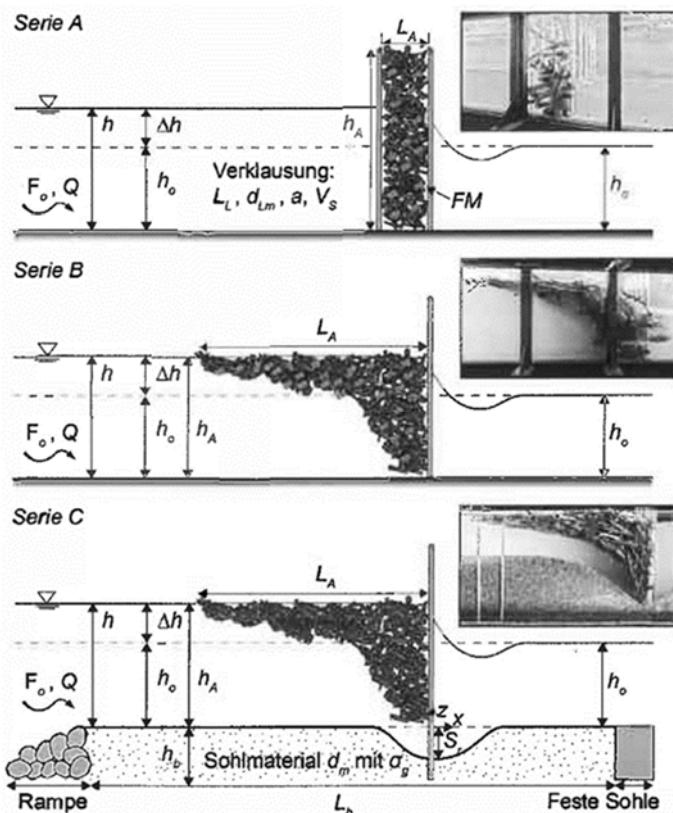


Figure 3. Extrait des configurations testées par Schalko et al. (2019).



- Schalko et al. (2019) ont réalisé des essais sur modèle réduit pour des blocages de bois flottants en rivière. Trois configurations ont été testées : (A) blocage de bois flottants prédefini, (B) blocage naturel avec lit du canal fixe et (C) lit du canal mobile. Les conditions d'entrée, les bois flottants et les caractéristiques de déversement ont été systématiquement variés dans toutes les séries d'essais. La Figure 3 explique schématiquement les configurations des essais. Selon les résultats obtenus, le barrage créé 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 nouvelle équation d'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. Les équations d'estimation améliorent le dimensionnement des râteliers et facilitent l'évaluation des risques dus à la congestion aux points étroits

2.1.4 Conséquences aux évacuateurs de crue

Le transport de bois flottants peut induire des obstructions dangereuses aux ouvrages hydrauliques pendant les inondations, comme illustré à la Figure 4, 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.



Figure 4. 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).

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.

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 5) entre la crête et le pont doit être au moins de 15% de cette longueur.

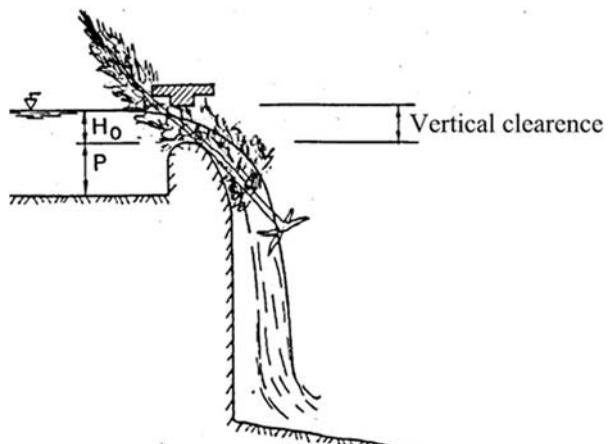


Figure 5. Représentation schématique de la hauteur libre (Godtland et Tesaker, 1994).

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.

2.1.5 Répétitions des tests

Furlan (2019) relate que Schalko et al. (2018) a proposé une limite maximale d'écart-type de 0.10 sur la probabilité de blocage pour définir le nombre nécessaire de répétitions expérimentales. Schalko et al. (2018) a effectué 300 répétitions d'une seule expérience pour déterminer un nombre statistiquement fiable de répétitions.



Dans les conditions d'essai, il a été observé qu'après 40 répétitions, l'écart-type calculé est inférieur à 0.10. D'autres combinaisons de paramètres testés ont nécessité 60 répétitions pour atteindre l'objectif du l'écart type désiré. Pour l'augmentation de la charge (Schmocke et Hager, 2013 ; Schalko et al., 2018), en répétant trois fois chaque expérience, des erreurs-types dans les estimations inférieures à 10% ont été obtenues.

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.

Les essais sur les bois flottants doivent être répétés au moins 30 fois pour des troncs individuels afin d'obtenir des erreurs inférieures à 10%, selon Furlan (2019). Pour des groupes de 32 troncs, 10 répétitions d'essai ont généré la même précision.

2.1.6 Recommandations

Généralités

Des recommandations concernant des dimensions minimales à respecter pour les déversoirs sont résumés dans Boes et al. (2017). Ils sont fondés sur des expériences avec des modèles réduits et des expériences in situ. Les évacuateurs et les ouvertures de décharge devraient être suffisamment larges pour que les obstructions de déversoirs dues aux bois flottants puissent être évitées.

Boes et al. (2017) résume les points principaux :

- Selon les expériences, une largeur des passes de 10 m peut, dans la mesure où les conditions topographiques et spatiales le permettent, être jugée suffisante pour faire passer des bois flottants. Des observations ont révélé que les troncs dans les rivières de montagne transportés par des crues sont rapidement réduits à des longueurs maximales d'environ 10 m.
- Pour les barrages situés dans les rivières principales et en plaine, la largeur de l'évacuateur de crue devrait être supérieure à 10 m.
- Lors de la conception des évacuateurs de barrages, un dégagement suffisant de 1.5 à 2 m au moins doit être disponible sous un pont de déversoir ou autre superstructure. Si nécessaire, un pont de déversoir devrait être conçu de manière à pouvoir être enlevé ou emporté en cas de crues exceptionnelles.
- Les recommandations, basées sur l'étude de Godtlund et Tesaker (1994), pour la largeur minimale L_p et la hauteur de dégagement minimale H_b des ouvertures de l'évacuateur de crue du barrage en fonction de la longueur probable des troncs H_t sont les suivantes :
 - $L_p \geq 0.80H_t$ (Figure 6a)
 - $H_b \geq 0.15H_t$ pour $L_p > 1.1H_t$ (Figure 6b)
 - $H_b \geq 0.20H_t$ pour $L_p \leq 1.1H_t$ (Figure 6b)

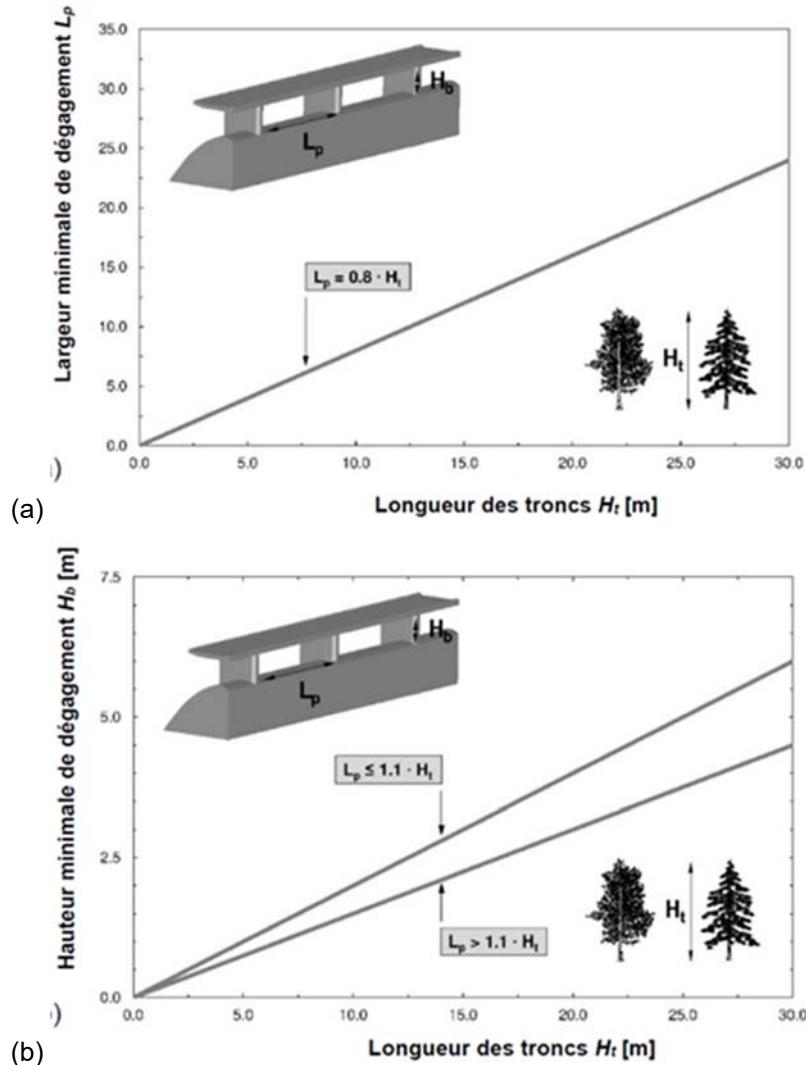


Figure 6. Représentation schématique de la hauteur libre (Godtland et Tesaker, 1994).

Furlan (2019) recommande des piliers qui possèdent une tête entrant dans le bassin de rétention. La distance requise entre la tête du pilier et la crête du déversoir devrait être évaluée au cas par cas. Lorsqu'un tapis de bois flottants est bloqué en amont sans toucher la crête du déversoir, la capacité d'évacuation de l'eau de l'ouvrage n'est généralement peu affectée.

Le type de structure de régulation a également une influence sur le risque d'obstruction (Boes et al., 2017). Un évacuateur de crue non régulé présente un risque moins élevé d'obstruction qu'un évacuateur régulé dans des conditions identiques. Bien que des bois flottants puissent être déposés sur la crête du déversoir à faible profondeur d'écoulement, ils sont généralement éliminés lors d'une augmentation de débit (pour des passes larges).

Le PKW a tendance à être moins sensibles aux obstructions (Pfister et al. 2015).

Des clapets sont avantageux pour produire des profondeurs d'écoulement localement plus grandes ce qui a pour effet de réduire le risque de blocage.

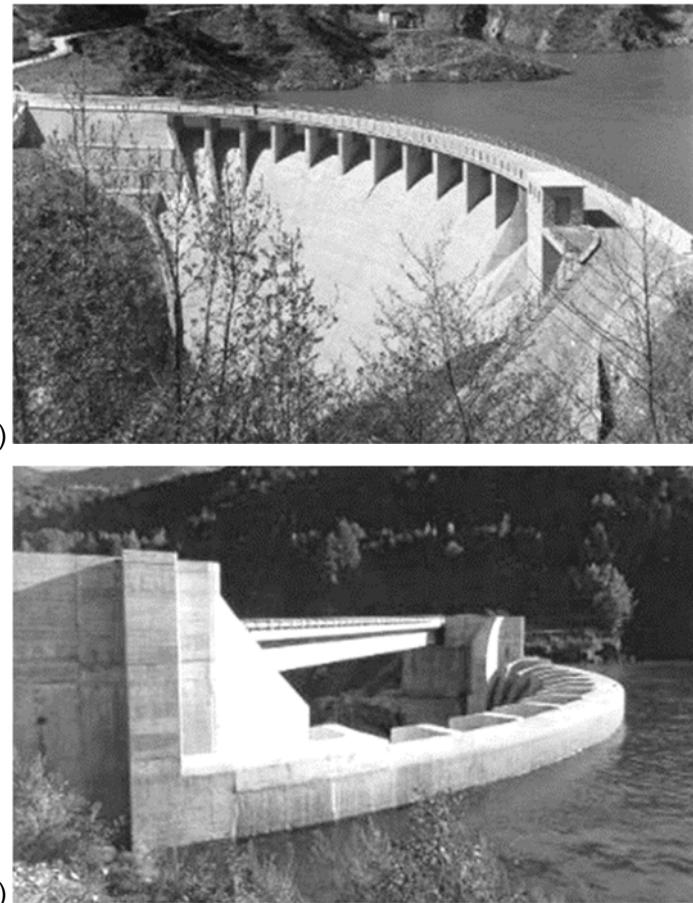


Figure 7. Evacuateur de crue du barrage de Palagnedra, (a) ancien évacuateur, et (b) nouvel évacuateur (Ofima).

Boes et al. (2017) résument quelques adaptations recommandées des dimensions des ouvertures de déversoir :

- Enlèvement des piliers pour augmenter la largeur des ouvertures (Figure 7). Selon Rickenmann (1997), les déversoirs doivent être dimensionnés avec des largeurs de dégagement de déversoir d'au moins 10 m ou mieux 15 m.
- Retirer ou déplacer le pont de déversoir pour augmenter la hauteur de dégagement. Les ponts et les passerelles pour piétons devraient avoir un dégagement minimal de 1.5 à 2 m par rapport au niveau d'eau d'une crue potentielle selon l'OFEN (2008). Les passerelles devraient être construites de manière à pouvoir être rapidement enlevées ou emportées.
- Enlèvement des structures de régulation mobiles et remplacement par une crête à déversement fixe mais plus longue.
- Surfaces des déversoirs aussi lisses que possible, arrondis et construits sans autres installations.
- Concentration de l'écoulement au centre pour les ouvertures de déversoir avec vannes.
- Têtes de piliers arrondies généralement moins vulnérables aux obstructions que les piliers rectangulaires ou les piliers avec des bords angulaires.



- Guidage pour aider à l'alignement longitudinal des bois flottants afin de faciliter leur évacuation par le déversoir. Les guidages doivent être construits à une distance suffisante de l'évacuateur de crue du barrage.

Rétention des bois flottants

Si l'évacuateur de crue apparaît sensible au blocage des bois flottants, des râteliers grossiers (Figure 8) peuvent être installés en amont du déversoir. L'obstruction complète du déversoir est ainsi empêchée. Les râteliers doivent être placés assez en amont du barrage (Boes et al., 2017). L'espacement des barres du râtelier doit être suffisamment petit pour retenir les grands troncs. Les petits bois et les matériaux fins ne sont normalement peu critiques.

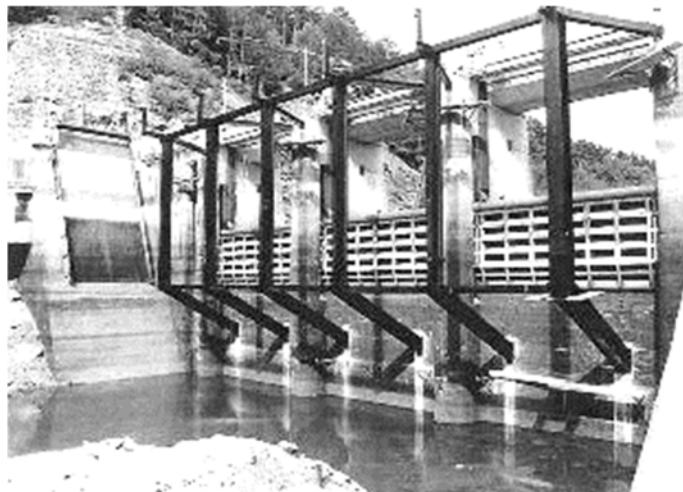


Figure 8. Râtelier au barrage de Thurnberg en Autriche (Figure 4, Ministère Fédéral de l'Agriculture, des Forêts, de l'Environnement et de la Gestion des Eaux, Autriche).



Figure 9. Barrières flottantes sur le lac de Brienz (OFEV).



Figure 10. Ouvertures des passes asymétriques (Hartlieb, 2012a).

Si la mise en place de râteliers n'est pas suffisante, des barrières flottantes (Figure 9) peuvent être utilisées pour retenir les bois flottants dans la retenue ou les dévier dans une certaine direction. Elles conviennent pour des bois flottants de dimensions et de volumes faibles et moyens (Boes et al., 2017). Une rupture de la barrière flottante entraînerait l'apparition soudaine d'un volume important et compact de bois flottants, ce qui est un scénario critique pour l'obstruction du déversoir d'un évacuateur de crue. De plus, une barrière flottante rompue constituée de longs cylindres attachés pourrait elle-même causer une obstruction initiale et ainsi aggraver la situation.

Mesure opérationnelle

L'écoulement peut être concentré au centre des ouvertures des déversoirs afin de réduire la probabilité d'obstruction aux piliers, pour les déversoirs avec des vannes. Une autre option est de créer un écoulement asymétrique (Figure 10), c'est-à-dire que seules les ouvertures de déversoirs qui ne sont pas adjacentes sont ouvertes aussi longtemps que le débit de crue le permet. Les troncs s'aligneraient ainsi plus facilement dans le sens de l'écoulement et passent les ouvertures (Boes et al., 2017).

Dans les cas extrêmes, la plupart des ouvertures de déversoir seraient généralement nécessaires et une opération asymétrique du système n'est donc plus possible. Furlan (2019) souligne que – dans son cas – cinq passes ouvertes ont généralement une probabilité de blocage plus faible qu'une seule passe ouverte, selon les essais pour un petit nombre de troncs en approche.

2.2 Observations *in situ*

2.2.1 Barrage de Palagnedra

Le barrage de Palagnedra se trouve au canton du Tessin. Le 7 août 1978, la région a été frappée par un orage extrême. Il a été enregistré 118 mm de pluie en 3 heures seulement (Bruschin et al., 1981).

Au moment des événements relatés, l'évacuateur de crue (Figure 7a) est un déversoir frontal fixe. Il se compose de 13 ouvertures de 5.40 m de large et 3.00 m de haut, séparés par des piliers, d'une épaisseur de 0.80 m, soutenant un pont routier qui traverse le barrage.

Environ 52% du bassin versant est boisé, tandis que le reste est constitué de roches plates (Bruschin et al., 1981). Il était prévu que les bois flottants qui surviennent à cette installation ne soient pas enlevés mais déchargés par l'évacuateur de crue du barrage (Boes et al., 2017). La capacité de décharge de l'ouvrage était de $450 \text{ m}^3/\text{s}$.

Environ $25'000 \text{ m}^3$ de bois et de rondins, provenant des forêts des zones supérieures, ont trouvé leur chemin dans le réservoir. De plus, environ $1.8 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ de sable et de gravier provenant de l'érosion du bassin versant ont été déposés dans le réservoir (Bruschin et al., 1981).

La surface du lac était complètement recouverte de bois flottants, comme la Figure 1a et la Figure 11 l'illustrent. Les troncs se sont coincés dans les ouvertures étroites du déversoir et ont créé une obstruction.

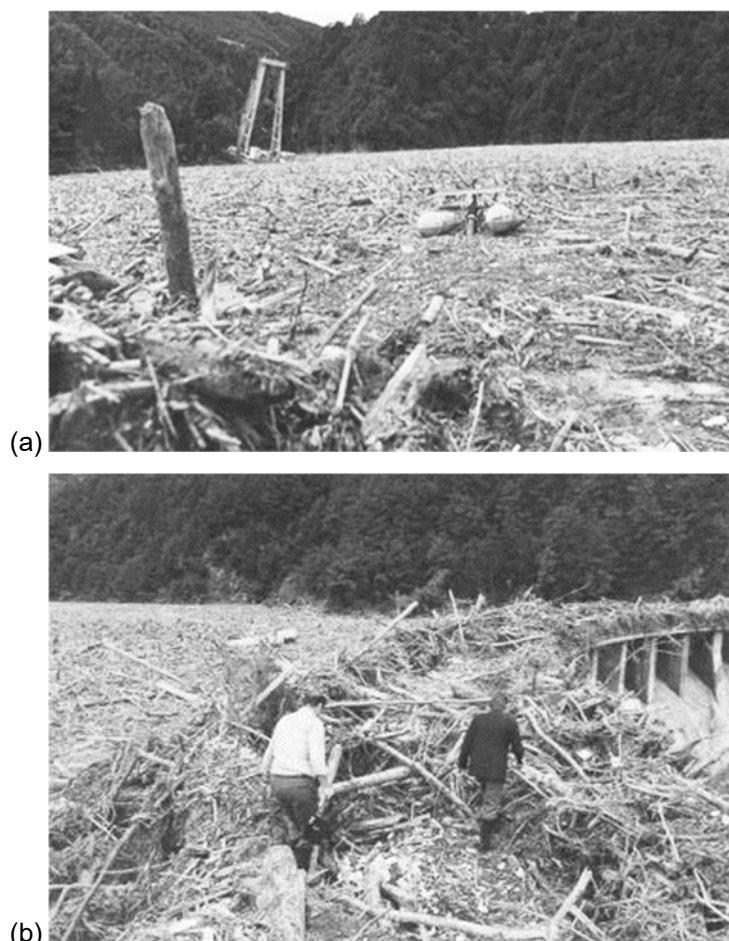


Figure 11. (a) Les bois flottants forment un tapis sur la surface du réservoir du barrage de Palagnedra, et (b) obstruction par les bois flottants des ouvertures de l'évacuateur de crue (Ofima).

Bruschin et al. (1981) ont réalisé après la crue un modèle physique pour analyser le phénomène. Le projet de reconstruction du déversoir du barrage en novembre 1978 reposait sur l'hypothèse d'une crue de $2'200 \text{ m}^3/\text{s}$. Le nouveau niveau maximum de stockage a nécessité une modification du niveau du pont routier. Afin de maintenir le débit de crue souhaité, l'ouverture de la structure d'évacuation devait être élargi et surtout, construit de manière à ne pas être obstrué par des bois flottants. La



Figure 7b met en évidence les modifications apportées au barrage. Ces deux conditions ont conduit à la démolition du pont routier existant et de ses piliers jusqu'à la hauteur de la crête de déversement. Le nouveau pont se situe en aval de l'ancien pont.

2.2.2 Barrage de Schlattli

Le 12 juillet 2010, la Suisse a été frappée par de violents orages. Le canton de Schwyz, où se trouve le barrage de Schlattli, a été particulièrement touché. L'orage qui est survenu sur une courte période dans le bassin versant a entraîné une augmentation très rapide du ruissellement.

Le déversoir de Schlattli est équipé d'un total de trois éléments de décharge qui sont régulés : une vidange de fond qui mesure 7.00 m de large pour 6.00 m de haut, un déversement frontal de 6.00 m de long et un tunnel de contournement en rive gauche (4.00 m par 4.50 m). Il est prévu que les bois flottants qui surviennent à cette installation ne soient enlevés que pendant ou après les crues extrêmes (Boes et al., 2017).

L'augmentation rapide du ruissellement a entraîné un volume inhabituellement de bois flottants (Figure 12). Cet écoulement a produit une obstruction de la vanne de régulation du déversoir et le niveau d'eau dans le réservoir a augmenté. La vanne du tunnel de contournement n'a pas pu être ouverte. Ainsi, l'eau s'écoulant dans le réservoir n'était détournée que par les structures d'évacuation de fond et le déversement. En conséquence, presque tous les bois flottants ont été retenus dans le réservoir (Boes et al., 2017).



Figure 12. Tapis de bois flottants dans le réservoir de Schlattli (ebs Energie AG).

2.2.3 Barrage de Montsalvens

Le barrage de Montsalvens est équipé de plusieurs systèmes d'évacuation de crue, dont une vidange de fond et un tunnel de contournement régulé de 5.05 m de large et de 4.42 m de haut. Le tunnel était protégé par une barrière flottante (Boes et al., 2017).

En mai 2015, une crue s'est produite. La vanne de déversement a été ouverte. Avec l'augmentation soudaine du débit, les éléments qui tenaient la barrière flottante se sont rompus. Des bois flottants se sont retrouvés bloquer et ont provoqué une obstruction (Figure 13).



Figure 13. Blocage des bois flottants à Montsalvens (Boes et al. 2017).

2.2.4 Barrage du Käppelistutz

Le système de décharge de crue consiste en un déversement frontal et fixe de trois ouvertures de 8.25 m de large et 1.9 m de haut. La hauteur de dégagement est limitée en raison du pont sur le déversoir. Les bois flottants qui surviennent à cette installation ne seront enlevés que pendant ou après les crues extrêmes. En cas de crue, les bois flottants sont déversés via l'évacuateur de crue du barrage (Boes et al., 2017).

À la suite des glissements de terrain et de l'érosion des berges lors des crues de 2005, de grandes quantités de sédiments et de bois flottants ont été entraînés dans le réservoir, environ 60'000 m³ de débris et 300 m³ de bois flottants. Avec ce volume, il y a eu des obstructions dans les ouvertures du déversoir (Figure 14). En conséquence, les débits sortants étaient relativement faibles (Boes et al., 2017)

Les bois flottants ont été enlevés mécaniquement après la crue. La vidange du réservoir et l'élimination mécanique supplémentaire des sédiments ont permis de restaurer une partie du volume du réservoir.



Figure 14. Accumulation de bois flottants dans le réservoir de Käppelistutz (EW Nidwalden).

2.2.5 Barrage de Thurnberg

Sur la rivière Kamp en Autriche, des barrages créent des réservoirs. La crue d'août 2002 a entraîné un volume considérable de bois flottants. Certains barrages n'ont pas connu de problème, grâce aux grandes largeurs des évacuateurs de crue. Cependant, le barrage de Thurnberg a connu une accumulation des bois flottants. Un râtelier grossier (Figure 4 et Figure 8) avait été installé auparavant,



devant les ouvertures étroites du déversoir, et a empêché leur obstruction, qui aurait pu conduire à un débordement du barrage. Le rôle joué par le râtelier est visible sur la Figure 15. Avec cette expérience, des râteliers grossiers ont été installés sur d'autres barrages à ouvertures étroites. (Boes et al., 2017)



Figure 15. Râtelier grossier qui empêche les bois flottants d'obstruer le déversoir, sur la rivière Kamp (Boes et al. 2017).

2.2.6 Barrage de Gstins

Également en Autriche, le réservoir de Gstins qui est situé sur le fleuve Lutz possède un bassin versant principalement boisé. Le système d'évacuateur de crue se compose de deux ouvertures de déversoir, chacune avec des clapets d'une largeur de 10 m. Un pilier central sépare deux passes. La crue d'août 2005 a transporté environ 3'000 m³ de bois vers le réservoir. En conséquence, les deux ouvertures du déversoir ont été complètement obstruées, comme la Figure 16 le démontre (Boes et al., 2017).



Figure 16. Obstruction du barrage de Gstins lors de la crue de 2005 (Vorarlberger Illwerke AG).



2.2.7 Barrage de Yazagyo

En Birmanie, le barrage de Yazagyo a subi un blocage de son évacuateur de crue, lors de fortes pluies en août 2015. De nombreux bois flottants sont entrés dans le réservoir (Figure 2). Ils ont été enlevés à l'aide de machinerie lourde et des éléphants. Dans cet exemple, il n'y a pas eu de dommages importants sur l'ouvrage et dans les environs (Furlan, 2019).

2.3 Conclusions

Des situations d'obstruction se sont produites lorsque les passes des déversoirs étaient « étroites ». Un volume considérable de bois flottants est resté bloqué à l'amont du déversoir. Quand les passes sont « larges », les cas de blocage par des bois flottants est moins fréquent.

Le blocage a provoqué une surélévation du plan d'eau suite à une diminution de la capacité de décharge des déversoirs.

Les bois flottants ont formé, dans les cas extrêmes présentés, un « tapis » en l'amont de l'ouvrage. La disposition des bois flottants dans le réservoir est très aléatoire.

Sur la base des observations in situ et de la littérature, deux paramètres apparaissent fréquemment : la largeur des passes des évacuateurs de crue et le volume de bois flottants.



3 Méthode

3.1 Modèle réduit

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. Le déversoir et les piliers ont été fabriqués de PVC et ont donc été considérés comme lisses.

La Figure 17 montre un schéma du déversoir et de ces éléments, et donne la nomenclature appliquée dans cette étude. La Figure 18 montre le canal et le déversoir.

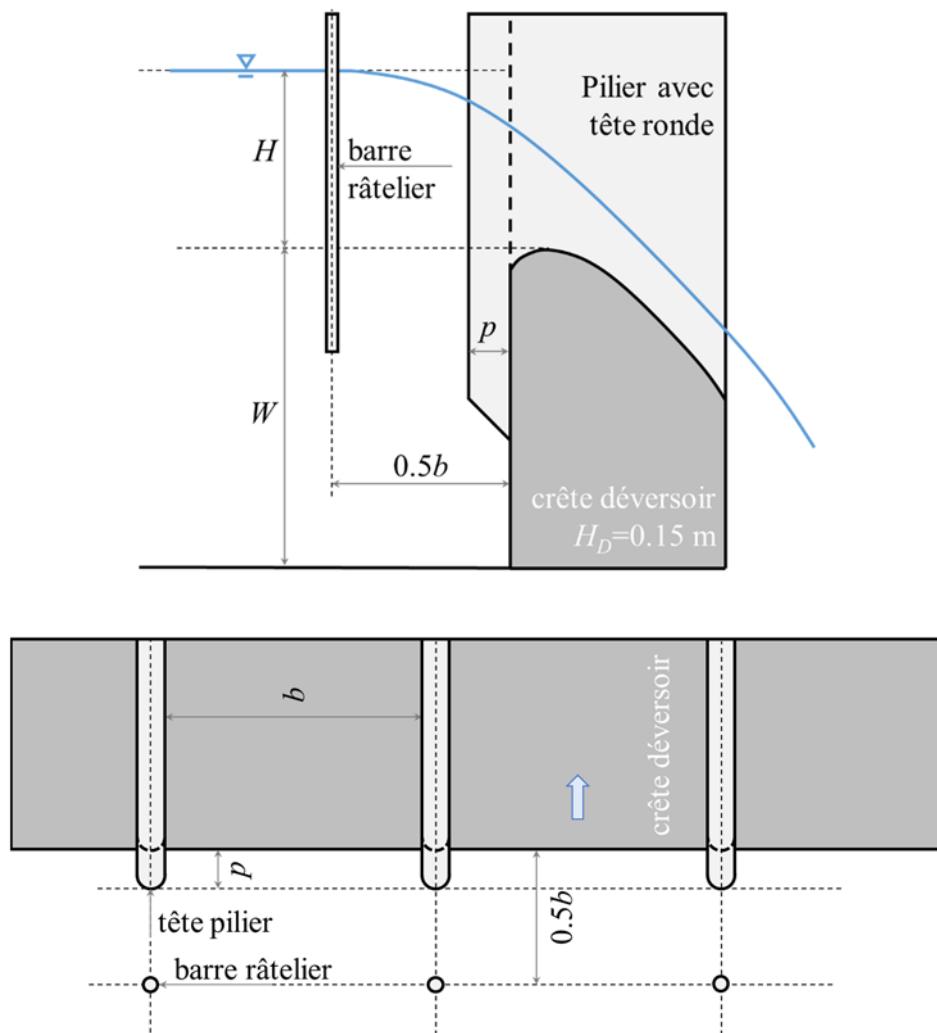


Figure 17. Schéma du déversoir et nomenclature, (a) coupe, et (b) vue en plan.

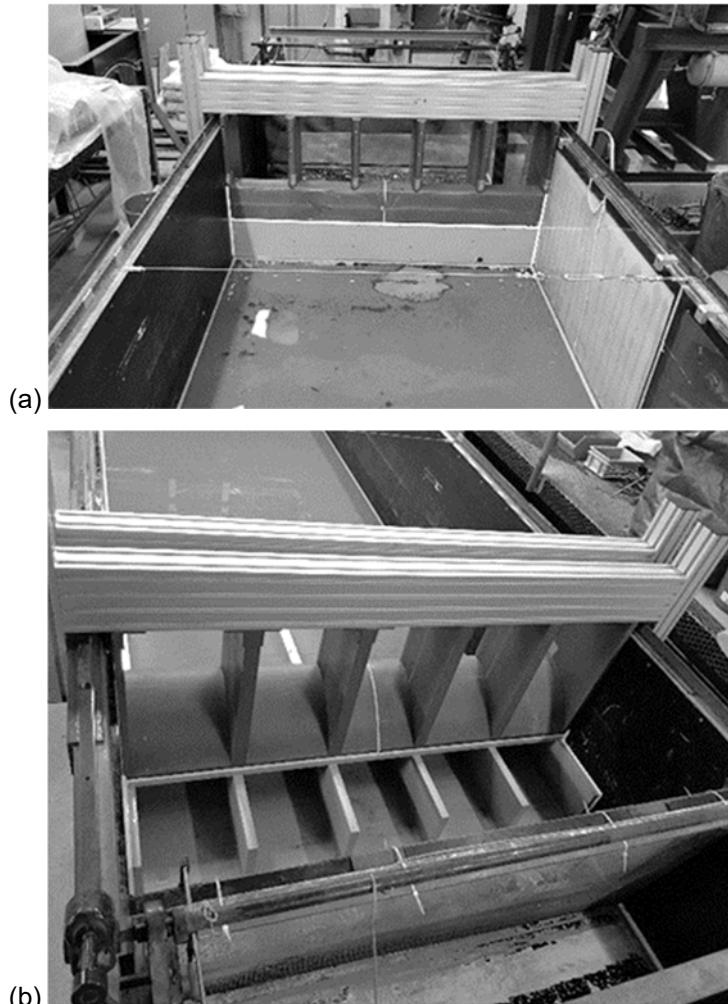


Figure 18. Vues depuis (a) l'amont et (b) l'aval du canal avec le déversoir à l'extrémité aval.

Le nombre de passes ouvertes peut être modifié grâce à des portes verticales amovibles qui peuvent être fixées à une poutre métallique de support. Cette poutre métallique est utilisée pour soutenir les piliers au-dessus de l'évacuateur de crues et est fixée à l'extérieur du canal.

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 éventuels bois flottants qui auraient franchi le déversoir.

Le modèle permet d'avoir des configurations de têtes de piliers différentes : à fleur de l'arête déversant ($p=0$ m), avancé de $p=0.04$ m ou de $p=0.08$ m dans le réservoir (Figure 17)

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 17), a été mesuré à 1.20 m en amont du déversoir à l'aide d'un limnimètre (Figure 19), gradué



au millimètre (précision de mesure ± 1 mm). Le débit franchissant le déversoir est mesuré par un débitmètre magnétique inductif (précision de mesure $\pm 0.5\%$) se situant sur le circuit général de la pompe qui fournit le débit.

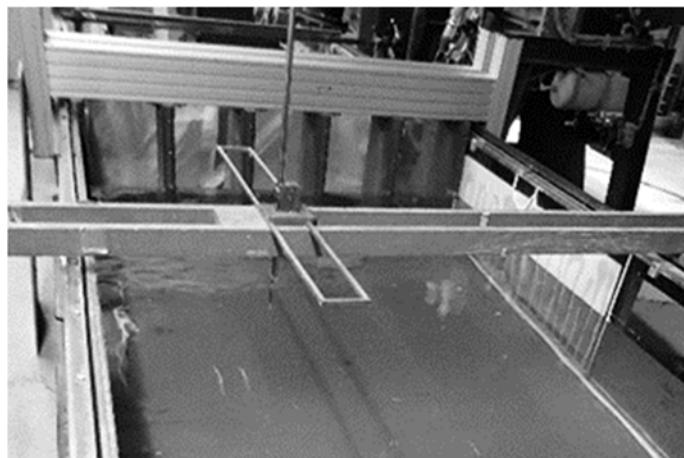


Figure 19. Positionnement du limnimètre, vue depuis l'amont.

3.2 Bois flottants

Une estimation du volume de bois flottants transporté est importante pour l'évaluation des dangers, mais difficile à effectuer. Afin de contourner cette incertitude, la présente étude se concentre uniquement sur des volumes extrêmes, comme ils peuvent apparaître lors des crues exceptionnelles.

La composition des volumes 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 20a).
- 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 20b).

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. Dans la Figure 21, la courbe représentant tous les degrés d'altération a été prise en compte. La répartition des différentes longueurs de bois flottants présente dans nos essais sur modèle se rapproche des relevés de Rickli et Hess (2009).

Dans nos expériences effectuées, des bois plutôt longs sont considérés. Cela est du côté extrême, suivant la l'approche de l'étude.

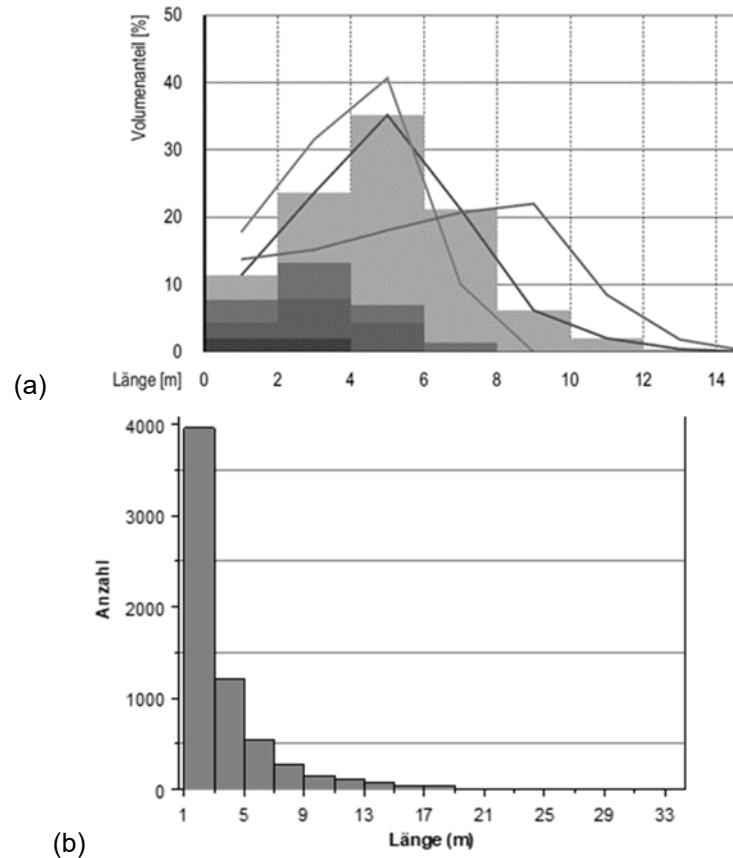


Figure 20. Fractions (a) volumiques selon Bezzola et Hegg (2007), et (b) en nombre de troncs selon Rickli et Hess (2009).

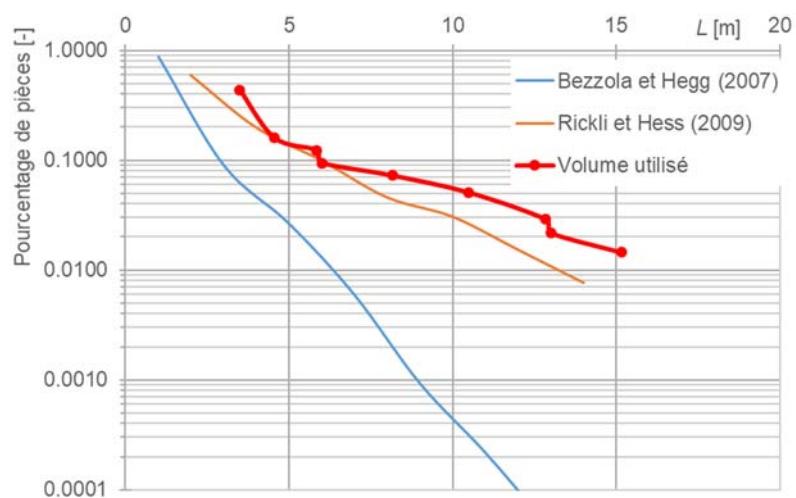


Figure 21. Comparaison entre la courbe des bois flottants utilisés dans cette étude et les relevés in situ.

Pour une utilisation pratique les troncs ont été classés en neuf classes de taille (classes « A » à « I » selon le Tableau 1, Figure 22). Les bois flottants ont été fournis par lots de volumes V , résultant dans



des volumes testés de 1V, 2V et 4V. Le volume de référence V (1V, Tableau 1) a été choisi de manière arbitraire, sans oublier l'idée de représenter un événement extrême. Le même lot a été utilisé pour toutes les expériences.

Une échelle géométrique typique du modèle pourrait être défini comme 1:35. Ainsi, 1V représente un volume de bois (bois massif) de 410 m^3 , $2V=820 \text{ m}^3$ et $4V=1'640 \text{ m}^3$ de bois. Un groupe de 1V est composé de 690 troncs et 20 souches. Les lots de 2V et 4V sont les multiples correspondants. Dans le modèle réduit, la longueur des troncs varie entre $L=0.100 \text{ m}$ et $L_M=0.433 \text{ m}$ (Tableau 1), 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.

Tableau 1. Caractéristique des bois flottants utilisés, nombre de troncs par classe et volume dans les dimensions du modèle (Figure 21).

Classes de taille	Longueur des troncs L [m]	Diamètre des troncs D [m]	Nombre de troncs 1V [-]	Nombre de troncs 2V [-]	Nombre de troncs 4V [-]
A	0.100	0.005	300	600	1200
B	0.130	0.006	110	220	440
C	0.167	0.008	85	170	340
D	0.172	0.008	65	130	260
E	0.233	0.012	50	100	200
F	0.300	0.015	35	70	140
G	0.367	0.018	20	40	80
H	0.372	0.010	15	30	60
I	0.433 (= L_M)	0.022	10	20	40
		Troncs	690	1'380	2'760
		Souches	20	40	80
		Total	710	1'420	2'840

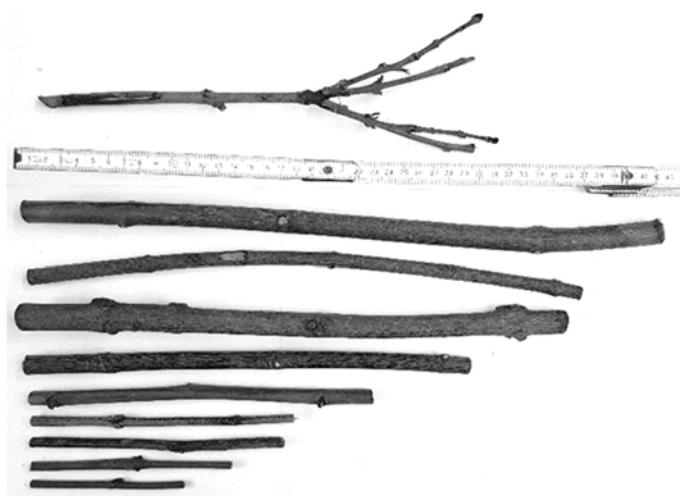


Figure 22. Illustration des troncs de chaque classe (Tableau 1).



3.3 Fiabilité des résultats

3.3.1 Validation du modèle

L'équation du déversoir donne la courbe de tarage (débit Q vs. charge H , Figure 17) comme suit (Vischer et Hager, 1999)

$$Q = C_D n b \sqrt{2 g H^3} \quad (1)$$

où C_D est le coefficient du déversoir, n est le nombre de passes ouvertes, b est la largeur individuelle d'une passe ouverte, et g est l'accélération de la gravité.

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

$$\chi = \frac{H}{H_D} \quad (2)$$

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) comme

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

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 (Figure 23).

Cette validation implicite des paramètres mesurés est exprimée en comparant la courbe de tarage calculée sur la base de C_D selon l'équation (3) (Vischer et Hager, 1999) en fonction de χ . Pour connaître les valeurs mesurées de C_D , l'équation (1) est transformée en

$$C_D = \frac{Q}{nb\sqrt{2gH^3}} \quad (4)$$

La Figure 23 démontre que les points des tests (Q et H sont mesurés, Equation 4) sont relativement voisins de la courbe calculée du déversoir (Equation 3). Une faible sous-estimation du coefficient C_D pour des faibles débits (faibles 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 cas extrêmes, aussi en termes de débits. Le débit de dimensionnement avec $H_D=0.15$ m étant $\chi=1$ n'est pas affecté, comme le montre la Figure 23.

La conclusion est donc faite que la performance du modèle est en accord avec la littérature, ce qui exclut des effets de modèle ou d'échelle majeurs, ainsi que des imprécisions de mesure. Le modèle est considéré comme fiable.

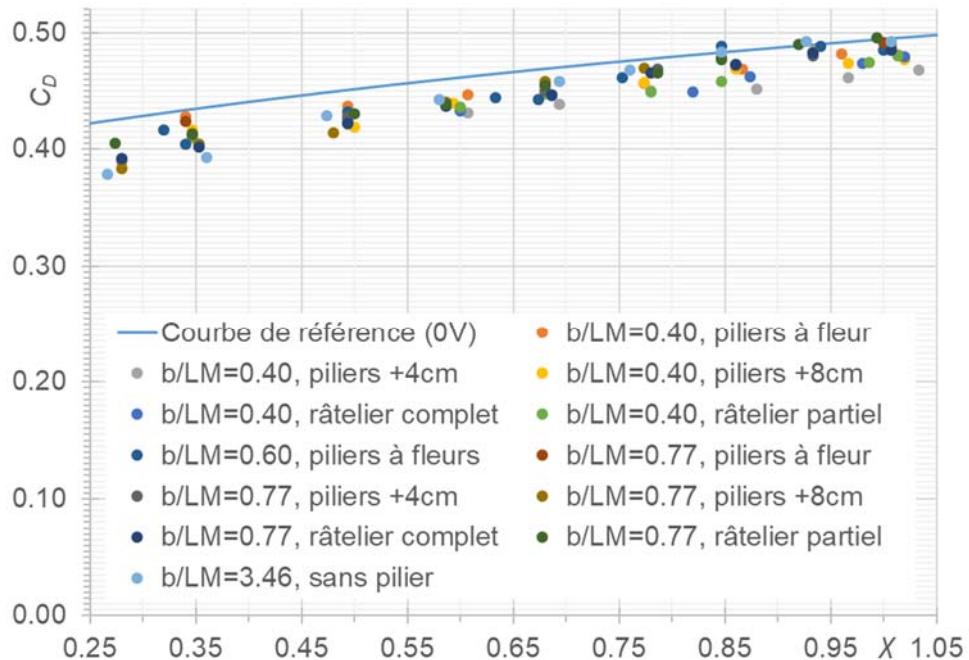


Figure 23. Courbe de tarage mesurée sans bois flottants (points), et valeurs calculées selon Vischer et Hager (1999, ligne) comme validation du modèle.

3.3.2 Effets de modèle

Même que les essais de validation ont démontrés la fiabilité hydraulique du modèle, quelques effets de modèle potentiels doivent être discutées. 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 24 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 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, les troncs présentent des irrégularités à la surface de l'écorce) comme en réalité. Cependant, la surface et la forme des troncs restent naturelles (Figure 22). 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) 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 17) 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 25) 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 24. Alignement des bois flottants à proximité de la paroi.

3.3.3 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 Ribi, 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 23 pour des débits faibles. Néanmoins, cette étude implique des événements extrêmes au niveau des crues et des bois flottants, et produit donc aucun effet de modèle.



3.4 Méthodologie

3.4.1 Variation des paramètres

Les paramètres clés ont fait l'objet d'une variation systématique ; un seul paramètre est varié à la fois et 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 et des observations in situ (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.
- La variation du volume de bois flottants est décrite dans le chapitre 3.2. Il reste à noter qu'un volume extrême a été ajouté au modèle réduit, étant si grand qu'un effet de la variation du volume (1V, 2V, 4V) n'a pas influencé les résultats de manière significative. Le volume compact de bois flottants testé et mise à l'échelle de 35 est de 1V (410 m^3), 2V (820 m^3) et 4V ($1'640\text{ m}^3$).
- Quatre largeurs des passes ont été testées, notamment $b=0.175$ m, $b=0.260$ m, et $b=0.335$ m comme largeurs standards (Figure 25), et $B=b=1.500$ m comme exception dans le contexte du déversoir sans piliers. 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.

Pour ce qui concerne les mesures contre un effet dominant d'un blocage, les installations suivantes ont été testées :

- La position des piliers dans le réservoir est modifiée : $p=0.00$ m (les têtes des piliers sont alignées avec la crête du déversoir), $p=0.04$ m (les piliers sont prolongés de 0.04 m dans le réservoir), et $p=0.08$ m (prolongés de 0.08 m dans le réservoir). La Figure 26 montre pour une largeur de passes constante ($b/L_M=0.77$) la variation de la position de la tête des piliers : $p=0.00$ m (Figure 26a), $p=0.04$ m (Figure 26b), et $p=0.08$ m (Figure 26c).
- Une variante sans piliers, la largeur du déversoir correspond à la largeur du canal ($B=1.50$ m), tous les piliers sont supprimés.
- La mise en place d'un râtelier complet ou partiel à l'amont du réservoir. Pour une largeur de passes constante ($b/L_M=0.77$), la Figure 27a représente un râtelier complet et la Figure 27b un râtelier partiel

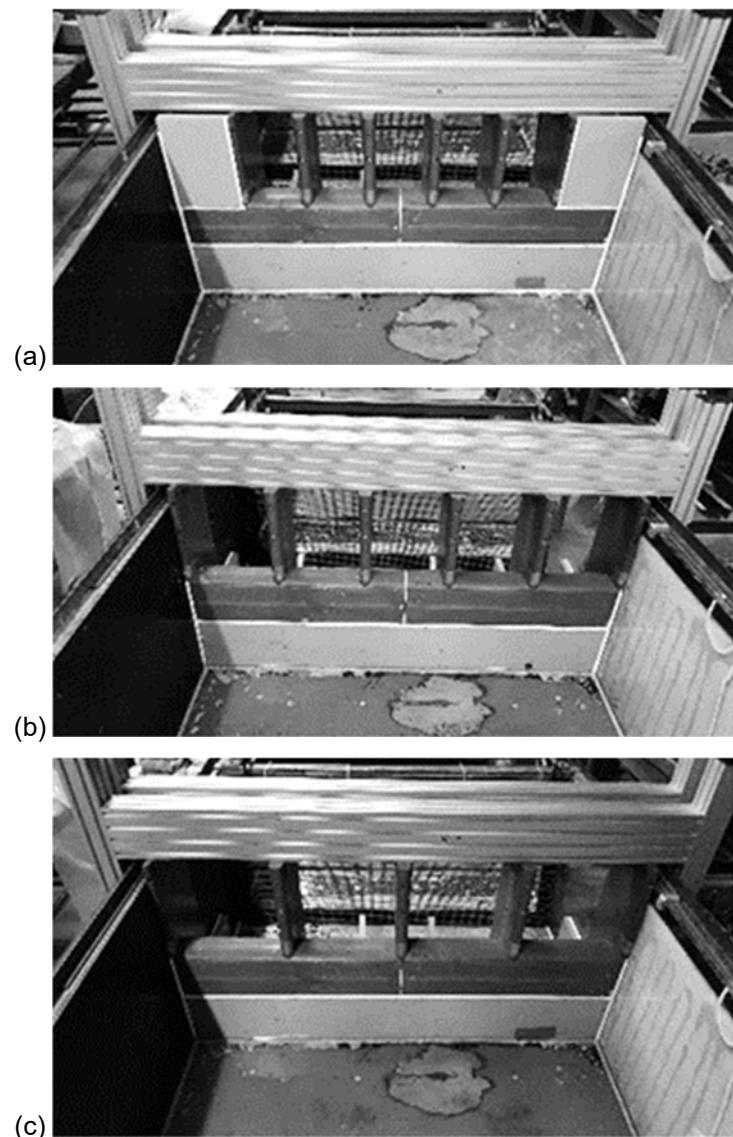


Figure 25. Différence de largeur de passes, b = (a) 0.175 m, (b) 0.260 m, et (c) 0.335 m (Tableau 2).

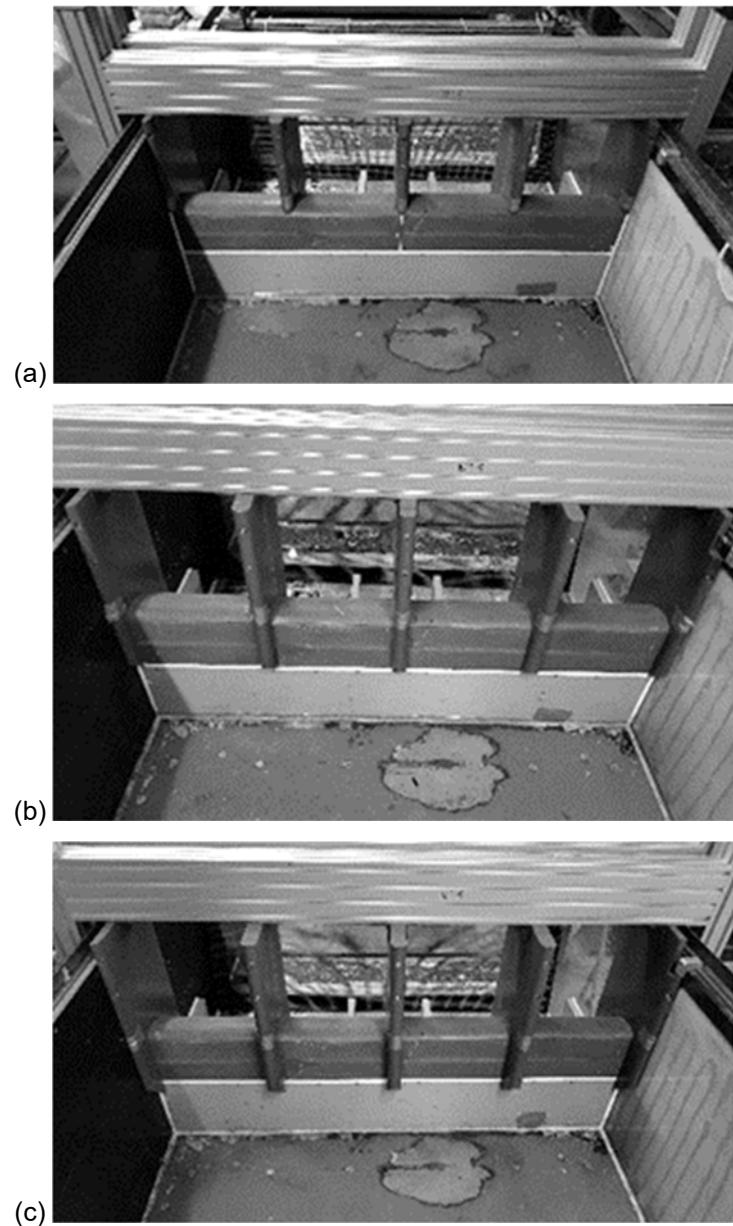


Figure 26. Différence de tête de piliers $p=$ (a) 0 m, (b) 0.04 m, et (c) 0.08 m (Tableau 3).

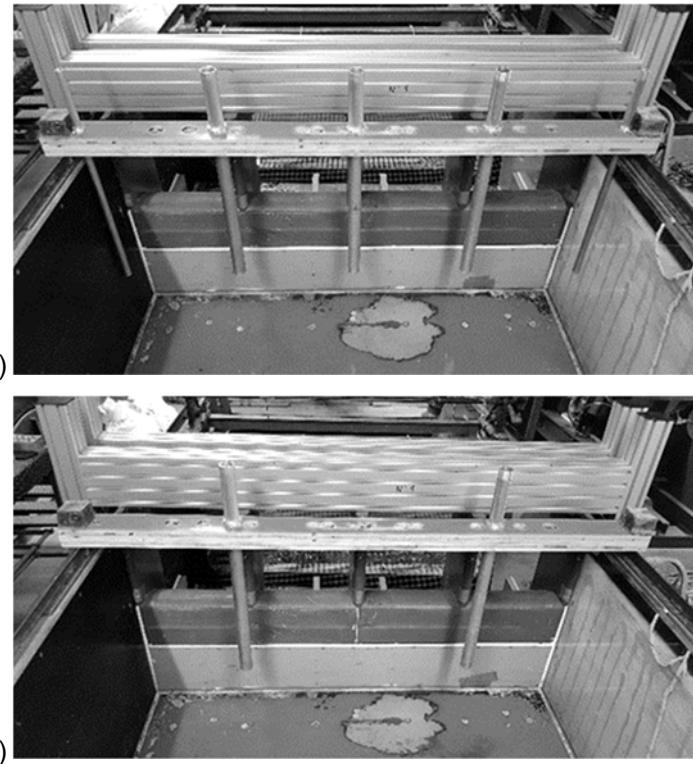


Figure 27. Râtelier (a) complet et (b) partiel (Tableau 5).

3.4.2 Programme de tests

Les tableaux suivants donnent les tests effectués avec les paramètres variés et les valeurs mesurées clés. Le programme d'expérience donne la priorité à un paramètre par temps afin d'en comprendre l'effet des bois flottants sur l'augmentation de la charge.

Sans mesures au déversoir (Tableau 2) :

1 – 9	tests de répétition avec $\chi=1/3, 2/3$ ou $3/3$; $1V$; $b/L_M=0.60$
10 – 16	$\chi=1/3, 2/3$ ou $3/3$; $2V$ ou $4V$; $b/L_M=0.60$
17 – 24	$\chi=1/3, 2/3$ ou $3/3$; $1V, 2V$ ou $4V$; $b/L_M=0.77$
25 – 33	$\chi=1/3, 2/3$ ou $3/3$; $1V, 2V$ ou $4V$; $b/L_M=0.40$

Avec mesures au déversoir :

Têtes de piliers dans le réservoir (Tableau 3, Figure 26)

34 – 42	$\chi=1/3, 2/3$ ou $3/3$; $1V, 2V$ ou $4V$; $b/L_M=0.40$; $p=0.04$ m
43 – 51	$\chi=1/3, 2/3$ ou $3/3$; $1V, 2V$ ou $4V$; $b/L_M=0.40$; $p=0.08$ m
52 – 60	$\chi=1/3, 2/3$ ou $3/3$; $1V, 2V$ ou $4V$; $b/L_M=0.77$; $p=0.04$ m
61 – 69	$\chi=1/3, 2/3$ ou $3/3$; $1V, 2V$ ou $4V$; $b/L_M=0.77$; $p=0.08$ m



Sans pilier (Tableau 4)

70 – 74 χ augmenté progressivement ; 1V ; $b/L_M=3.46$

75 – 81 χ augmenté progressivement ; 2V ; $b/L_M=3.46$

82 – 89 χ augmenté progressivement ; 4V ; $b/L_M=3.46$

Râtelier (Tableau 5, Figure 27)

90 – 98 $\chi=1/3, 2/3$ ou $3/3$; 1V, 2V ou 4V ; $b/L_M=0.77$; râtelier complet

99 – 111 χ augmenté progressivement ; 4V ; $b/L_M=0.77$; râtelier partiel

112 – 117 χ augmenté progressivement ; 4V ; $b/L_M=0.40$; râtelier partiel

118 – 120 $\chi=1/3, 2/3$ ou $3/3$; 4V ; $b/L_M=0.40$; râtelier complet

Tableau 2. Programme de tests des essais sans mesures.

Test	Débit	Débit unitaire	Charge relative (sans bois)	Vol. bois	Larg. passe	Nombre passes ouvertes	Charge (avec bois)	Coeff. déversoir (avec bois)	Têtes de pilier	Larg. relative	Volume bois unitaire
-	Q	$q=Q/nb$	χ	#V	b	n	H	C_d	p	b/L_M	$v=\sum V/nb$
[-]	[m ³ /s]	[m ² /s]	[-]	[-]	[m]	[-]	[m]	[-]	[m]	[-]	[m ³ /m]
1	0.028	0.022	0.331	1	0.260	5	0.055	0.377	0	0.60	0.029
2	0.085	0.066	0.665	1	0.260	5	0.115	0.380	0	0.60	0.029
3				1	0.260	5			0	0.60	0.029
1a	0.028	0.022	0.331	1	0.260	5	0.055	0.378	0	0.60	0.029
2a	0.085	0.065	0.663	1	0.260	5	0.116	0.374	0	0.60	0.029
3a	0.164	0.126	1.001	1	0.260	5	0.177	0.383	0	0.60	0.029
4	0.028	0.022	0.333	1	0.260	5	0.054	0.392	0	0.60	0.029
5	0.085	0.065	0.663	1	0.260	5	0.114	0.384	0	0.60	0.029
6	0.165	0.127	1.003	1	0.260	5	0.178	0.381	0	0.60	0.029
7	0.028	0.022	0.333	1	0.260	5	0.056	0.371	0	0.60	0.029
8	0.085	0.065	0.662	1	0.260	5	0.118	0.363	0	0.60	0.029
9	0.164	0.126	1.001	1	0.260	5	0.181	0.371	0	0.60	0.029
10	0.028	0.022	0.331	2	0.260	5	0.057	0.359	0	0.60	0.059
11	0.085	0.065	0.663	2	0.260	5	0.122	0.347	0	0.60	0.059
12	0.165	0.127	1.002	2	0.260	5	0.170	0.408	0	0.60	0.059
13	0.028	0.022	0.331	4	0.260	5	0.056	0.368	0	0.60	0.118
14	0.085	0.066	0.664	4	0.260	5	0.119	0.360	0	0.60	0.118
15	0.165	0.127	1.003	4	0.260	5	0.177	0.385	0	0.60	0.118
16	0.028	0.021	0.324	1	0.335	4	0.056	0.366	0	0.77	0.029
17	0.085	0.064	0.652	1	0.335	4	0.118	0.360	0	0.77	0.029
18	0.166	0.124	0.987	1	0.335	4	0.189	0.342	0	0.77	0.029



19	0.030	0.022	0.340	2	0.335	4	0.057	0.383	0	0.77	0.057
20	0.088	0.066	0.666	2	0.335	4	0.121	0.358	0	0.77	0.057
21	0.170	0.127	1.005	2	0.335	4	0.183	0.370	0	0.77	0.057
22	0.029	0.022	0.332	4	0.335	4	0.058	0.360	0	0.77	0.114
23	0.087	0.065	0.661	4	0.335	4	0.126	0.332	0	0.77	0.114
24	0.170	0.127	1.002	4	0.335	4	0.192	0.343	0	0.77	0.114
25	0.019	0.021	0.331	1	0.175	5	0.052	0.409	0	0.40	0.044
26	0.057	0.065	0.658	1	0.175	5	0.117	0.365	0	0.40	0.044
27	0.111	0.127	1.005	1	0.175	5	0.176	0.388	0	0.40	0.044
28	0.019	0.021	0.330	2	0.175	5	0.052	0.408	0	0.40	0.087
29	0.057	0.065	0.661	2	0.175	5	0.116	0.372	0	0.40	0.087
30	0.114	0.130	1.022	2	0.175	5	0.185	0.370	0	0.40	0.087
31	0.019	0.022	0.334	4	0.175	5	0.054	0.393	0	0.40	0.175
32	0.057	0.065	0.660	4	0.175	5	0.112	0.391	0	0.40	0.175
33	0.112	0.128	1.009	4	0.175	5	0.170	0.412	0	0.40	0.175

Tableau 3. Programme de tests des essais avec la tête des piliers entrant dans la retenue (variation de p).

Test	Débit	Débit unitaire	Charge relative (sans bois)	Vol. bois	Larg. passe	Nombre passes ouvertes	Charge (avec bois)	Coeff. déversoir (avec bois)	Têtes de pilier	Larg. relative	Volume bois unitaire
-	Q	$q=Q/nb$	χ	#V	b	n	H	C_d	p	b/L_M	$v=\sum V/nb$
[-]	[m ³ /s]	[m ² /s]	[-]	[-]	[m]	[-]	[m]	[-]	[m]	[-]	[m ³ /m]
34	0.019	0.022	0.334	1	0.175	5	0.052	0.416	0.04	0.40	0.044
35	0.057	0.065	0.658	1	0.175	5	0.103	0.441	0.04	0.40	0.044
36	0.111	0.127	1.005	1	0.175	5	0.174	0.395	0.04	0.40	0.044
37	0.019	0.021	0.328	2	0.175	5	0.054	0.382	0.04	0.40	0.087
38	0.057	0.065	0.659	2	0.175	5	0.104	0.436	0.04	0.40	0.087
39	0.110	0.126	1.000	2	0.175	5	0.168	0.413	0.04	0.40	0.087
40	0.019	0.022	0.333	4	0.175	5	0.053	0.403	0.04	0.40	0.175
41	0.057	0.066	0.664	4	0.175	5	0.105	0.435	0.04	0.40	0.175
42	0.111	0.127	1.006	4	0.175	5	0.169	0.413	0.04	0.40	0.175
43	0.019	0.022	0.334	1	0.175	5	0.053	0.405	0.08	0.40	0.044
44	0.057	0.066	0.664	1	0.175	5	0.103	0.448	0.08	0.40	0.044
45	0.112	0.128	1.011	1	0.175	5	0.157	0.466	0.08	0.40	0.044
46	0.019	0.022	0.331	2	0.175	5	0.052	0.410	0.08	0.40	0.087
47	0.057	0.065	0.662	2	0.175	5	0.102	0.452	0.08	0.40	0.087
48	0.112	0.128	1.009	2	0.175	5	0.156	0.468	0.08	0.40	0.087
49	0.019	0.022	0.331	4	0.175	5	0.052	0.411	0.08	0.40	0.175



50	0.057	0.065	0.662	4	0.175	5	0.103	0.446	0.08	0.40	0.175
51	0.112	0.128	1.011	4	0.175	5	0.155	0.474	0.08	0.40	0.175
52	0.029	0.022	0.333	1	0.335	4	0.054	0.391	0.04	0.77	0.029
53	0.088	0.066	0.664	1	0.335	4	0.106	0.429	0.04	0.77	0.029
54	0.169	0.126	1.000	1	0.335	4	0.174	0.393	0.04	0.77	0.029
55	0.030	0.022	0.335	2	0.335	4	0.054	0.396	0.04	0.77	0.057
56	0.087	0.065	0.660	2	0.335	4	0.106	0.426	0.04	0.77	0.057
57	0.170	0.127	1.002	2	0.335	4	0.169	0.411	0.04	0.77	0.057
58	0.029	0.022	0.334	4	0.335	4	0.054	0.394	0.04	0.77	0.114
59	0.088	0.066	0.665	4	0.335	4	0.105	0.437	0.04	0.77	0.114
60	0.169	0.126	1.001	4	0.335	4	0.162	0.438	0.04	0.77	0.114
61	0.028	0.021	0.325	1	0.335	4	0.052	0.398	0.08	0.77	0.029
62	0.087	0.065	0.662	1	0.335	4	0.103	0.446	0.08	0.77	0.029
63	0.171	0.128	1.008	1	0.335	4	0.155	0.473	0.08	0.77	0.029
64	0.029	0.022	0.332	2	0.335	4	0.053	0.400	0.08	0.77	0.057
65	0.089	0.066	0.667	2	0.335	4	0.105	0.438	0.08	0.77	0.057
66	0.170	0.127	1.005	2	0.335	4	0.156	0.466	0.08	0.77	0.057
67	0.029	0.022	0.333	4	0.335	4	0.053	0.403	0.08	0.77	0.114
68	0.088	0.065	0.663	4	0.335	4	0.104	0.440	0.08	0.77	0.114
69	0.170	0.127	1.002	4	0.335	4	0.156	0.464	0.08	0.77	0.114

Tableau 4. Programme de tests des essais sans piliers.

Test	Débit	Débit unitaire	Charge relative (sans bois)	Vol. bois	Larg. passe	Nombre passes ouvertes	Charge (avec bois)	Coeff. déversoir (avec bois)	Têtes de pilier	Larg. relative	Volume bois unitaire
-	Q	$q=Q/nb$	X	#V	b	n	H	C_d	p	b/L_M	$v=\sum V/nb$
[-]	[m ³ /s]	[m ² /s]	[-]	[-]	[m]	[-]	[m]	[-]	[m]	[-]	[m ³ /m]
70	0.005	0.003	0.158	1	1.500	1	0.018	0.295	0	3.46	0.025
71	0.010	0.007	0.203	1	1.500	1	0.028	0.319	0	3.46	0.025
72	0.015	0.010	0.244	1	1.500	1	0.036	0.327	0	3.46	0.025
73	0.020	0.013	0.284	1	1.500	1	0.041	0.360	0	3.46	0.025
74	0.025	0.017	0.099	1	1.500	1	0.05	0.342	0	3.46	0.025
75	0.005	0.003	0.163	2	1.500	1	0.018	0.296	0	3.46	0.051
76	0.010	0.007	0.203	2	1.500	1	0.028	0.335	0	3.46	0.051
77	0.015	0.010	0.244	2	1.500	1	0.034	0.356	0	3.46	0.051
78	0.020	0.013	0.282	2	1.500	1	0.043	0.337	0	3.46	0.051
79	0.025	0.017	0.321	2	1.500	1	0.051	0.328	0	3.46	0.051
80	0.031	0.021	0.353	2	1.500	1	0.057	0.342	0	3.46	0.051
81	0.036	0.024	0.098	2	1.500	1	0.058	0.387	0	3.46	0.051



82	0.005	0.003	0.160	4	1.500	1	0.017	0.313	0	3.46	0.102
83	0.010	0.007	0.207	4	1.500	1	0.029	0.311	0	3.46	0.102
84	0.015	0.010	0.246	4	1.500	1	0.037	0.324	0	3.46	0.102
85	0.020	0.013	0.284	4	1.500	1	0.042	0.353	0	3.46	0.102
86	0.025	0.017	0.318	4	1.500	1	0.048	0.364	0	3.46	0.102
87	0.030	0.020	0.355	4	1.500	1	0.058	0.327	0	3.46	0.102
88	0.036	0.024	0.382	4	1.500	1	0.061	0.363	0	3.46	0.102
89	0.041	0.027	0.158	4	1.500	1	-	-	0	3.46	0.102

Tableau 5. Programme de tests des essais avec un râtelier.

Test	Débit	Débit unitaire	Charge relative (sans bois)	Vol. bois	Larg. passe	Nombre passes ouvertes	Charge (avec bois)	Coeff. déversoir (avec bois)	Têtes de pilier	Larg. relative	Volume bois unitaire
-	Q	$q=Q/nb$	X	#V	b	n	H	C_d	p	b/L_M	$v=\sum V/nb$
[-]	[m ³ /s]	[m ² /s]	[-]	[-]	[m]	[-]	[m]	[-]	[m]	[-]	[m ³ /m]
90	0.030	0.022	0.339	1	0.335	4	0.053	0.414	0	0.77	0.029
91	0.088	0.065	0.662	1	0.335	4	0.102	0.453	0	0.77	0.029
92	0.170	0.127	1.005	1	0.335	4	0.15	0.494	0	0.77	0.029
93	0.029	0.022	0.333	2	0.335	4	0.052	0.415	0	0.77	0.057
94	0.088	0.066	0.663	2	0.335	4	0.102	0.454	0	0.77	0.057
95	0.171	0.128	1.007	2	0.335	4	0.151	0.491	0	0.77	0.057
96	0.029	0.022	0.334	4	0.335	4	0.053	0.406	0	0.77	0.114
97	0.087	0.065	0.662	4	0.335	4	0.103	0.446	0	0.77	0.114
98	0.171	0.127	1.006	4	0.335	4	0.151	0.490	0	0.77	0.114
99	0.010	0.007	0.165	4	0.335	4	0.026	0.382	0	0.77	0.114
100	0.020	0.015	0.261	4	0.335	4	0.042	0.387	0	0.77	0.114
101	0.030	0.023	0.340	4	0.335	4	0.053	0.417	0	0.77	0.114
102	0.041	0.030	0.409	4	0.335	4	0.064	0.422	0	0.77	0.114
103	0.051	0.038	0.470	4	0.335	4	0.074	0.423	0	0.77	0.114
104	0.059	0.044	0.520	4	0.335	4	0.081	0.434	0	0.77	0.114
105	0.070	0.052	0.574	4	0.335	4	0.09	0.435	0	0.77	0.114
106	0.080	0.059	0.624	4	0.335	4	0.097	0.444	0	0.77	0.114
107	0.106	0.079	0.748	4	0.335	4	0.114	0.466	0	0.77	0.114
108	0.119	0.089	0.802	4	0.335	4	0.123	0.464	0	0.77	0.114
109	0.138	0.103	0.882	4	0.335	4	0.134	0.475	0	0.77	0.114
110	0.159	0.118	0.960	4	0.335	4	0.146	0.479	0	0.77	0.114
111	0.170	0.127	1.004	4	0.335	4	0.152	0.484	0	0.77	0.114
112	0.019	0.022	0.332	4	0.175	5	0.052	0.412	0	0.40	0.175
113	0.042	0.048	0.545	4	0.175	5	0.085	0.436	0	0.40	0.175



114	0.057	0.065	0.663	4	0.175	5	0.104	0.440	0	0.40	0.175
115	0.080	0.092	0.819	4	0.175	5	0.129	0.447	0	0.40	0.175
116	0.104	0.118	0.961	4	0.175	5	0.151	0.455	0	0.40	0.175
117	0.111	0.126	1.001	4	0.175	5	0.157	0.459	0	0.40	0.175
118	0.019	0.022	0.334	4	0.175	5	0.052	0.415	0	0.40	0.175
119	0.057	0.065	0.659	4	0.175	5	0.101	0.456	0	0.40	0.175
120	0.113	0.129	1.015	4	0.175	5	0.155	0.478	0	0.40	0.175

3.4.3 Fiche de test

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

- Débit Q [m^3/s]
- Charge H [m]
- Volume de bois flottants $\#V$ [-] (1V, 2V ou 4V)
- Nombre de passes ouvertes n [-]
- Largeur des passes b [m]
- Nombre de piliers [-]
- Épaisseur des piliers [m]
- Position des piliers [-] (à fleur ou avancé dans le réservoir)
- Hauteur maximale de blocage verticale (au-dessus de la surface du niveau d'eau du réservoir) des bois flottants à l'amont des piliers F [m]
- Extension horizontale du tapis formé par les bois flottants E [m]
- Numérotations des photos
- Croquis si nécessaire de la situation
- Nombre et type de troncs franchissant le déversoir
- Observations particulières
- Type de troncs responsables du blocage
- Nom de l'opérateur
- Date et heure
- Numéro de l'essai

3.4.4 Procédure de test

La procédure de test est la suivante :

1. Le canal est rempli avec de l'eau aux deux tiers de W (Figure 17), le débit est nul ($Q=0 \text{ m}^3/\text{s}$).
2. Le volume de bois flottants souhaité (1V, 2V ou 4V) est ajouté dans le réservoir. Les troncs sont mélangés et brassés pour qu'ils forment un tapis homogène à la surface de l'eau.



3. Quelques troncs les plus longs ($L_M=0.433$ m et $D=0.022$ m, Tableau 1) sont partiellement positionnés perpendiculairement aux piliers à l'entrée des passes pour initier le blocage (environ un gros tronc par passe ouverte Figure 28).



Figure 28. Exemple d'un tronc perpendiculaire (au déversoir) qui bloque le tapis de bois flottants.

4. Le débit est ensuite augmenté de manière prudente jusqu'au premier palier théorique correspondant à H_1 (Chapitre 3.4.1).
5. Les bois flottants qui franchissent le déversoir sont 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.
6. 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 (Chapitre 3.4.3).
7. Le premier essai est donc terminé (par exemple le test 1).
8. Pour effectuer le deuxième essai, le débit est augmenté progressivement jusqu'au deuxième palier qui correspond à H_2 .
9. Comme précédemment, les bois flottants qui passent le déversoir est ajouté dans le réservoir, à l'arrière et dix minutes sont laissées pour que l'essai stabilise.
10. Les photographies sont prises. Les diverses mesures sont effectuées et la fiche de test est remplie.
11. Le deuxième essai est donc fini (par exemple le test 2).
12. Puis, pour réaliser le troisième test, le débit est augmenté de manière progressive jusqu'à la valeur théoriquement correspondant à H_3 .



13. Les bois flottants qui franchissent le déversoir est à nouveau replacé dans le réservoir et dix minutes sont attendues pour la stabilisation.
14. Toutes les photographies et mesures sont effectuées et la fiche de test de test est complétée.
15. Le troisième test est donc terminé (par exemple le test 3).

3.4.5 Nombre de répétitions des tests

Comme détaillée dans le Chapitre 2.1.5, 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. Dans l'étude présente, des lots de troncs de 690 (1V) à 2'760 (4V), plus 20 à 80 souches, ont été testés, ce qui suggère clairement que moins de 10 répétitions de tests sont nécessaires.

Les essais 1-2-3 ont donc été réalisés quatre fois (1-2-3, 1a-2a-3a, 4-5-6, 7-8-9, tous avec des conditions identiques) pour comparer le résultat en termes de coefficient du déversoir C_D (dérivé du H mesuré) en fonction du débit (exprimé avec χ). La Figure 29 montre que les données des tests 1 à 9 sont quasiment similaires selon χ .

Une analyse statistique a montré que l'écart maximal par rapport à la valeur moyenne de toutes les mesures effectuées sur χ est inférieur à $\pm 2\%$. Deux écarts de 3.8% ensemble semblent acceptable, de sorte que tous les autres tests ne sont effectués qu'une seule fois, sans répétition (Tableau 6).

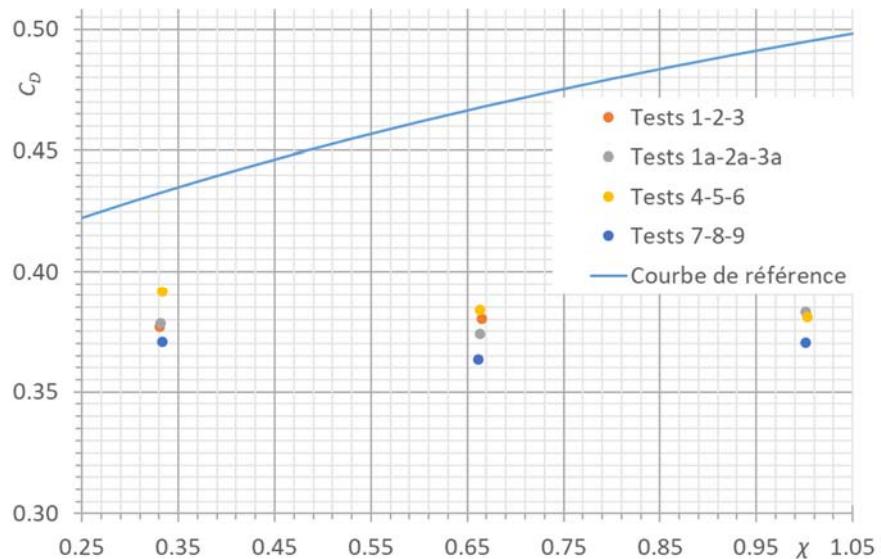


Figure 29. Comparaison des coefficients du déversoir C_D pour des essais similaires.



Tableau 6. Analyse statistique des tests répétés.

Charge <i>H</i> sans bois	Charge <i>H</i> [m] mesurée avec bois					Facteur <i>H</i> / μ			
	1-2-3	1a-2a-3a	4-5-6	7-8-9	Moyenne μ	1-2-3	1a-2a-3a	4-5-6	7-8-9
0.050	0.055	0.055	0.054	0.056	0.055	1.000	1.000	0.982	1.018
0.100	0.115	0.116	0.114	0.118	0.116	0.994	1.002	0.985	1.019
0.150	-	0.177	0.178	0.181	0.179	-	0.991	0.996	1.013
						Min.	0.982		1.8%
						Max.	1.019		1.9%
						Ecart	0.038		



4 Résultats

4.1 Observations générales

Les troncs les plus longs ($L_M=0.433$ m) définissent les conditions initiales de blocage. Ce premier tronc bloque de manière autonome, ou est positionné par l'opérateur si nécessaire. Avec la mise en place d'un débit ($Q>0$ m³/s), d'autres troncs (0.300 m≤ L ≤0.433 m) et des souches (Figure 30a) viennent de manière naturelle et aléatoire s'ajouter pour bloquer les passes.

L'eau qui franchit le déversoir passe en majeur partie en dessous des bois flottants (Figure 30a). Les troncs qui ont provoqué au départ l'obstruction se retrouvent à débit « important » quasiment voire complètement immersés. Ils subissent la pression du volume de bois flottants à l'amont et du débit contre les piliers du déversoir. Un « tapis » (Figure 30b) est formé par les bois flottants retenus à la surface de l'eau en amont de l'évacuateur de crue.

Le passage des troncs a été relevé. En effet, lors de la mise en place des troncs dans le réservoir, les troncs de petites longueurs qui se trouvent contre les piliers franchissent le déversoir dès qu'ils sont mobilisés par le débit. L'opérateur les dispose alors à l'arrière du volume et ils se bloquent contre le tapis en colmatant les plus petites ouvertures. La procédure est identique pour les troncs de grandes longueurs qui franchissent au départ le déversoir. Cette étude se concentre sur le blocage complet d'un déversoir et lors d'une obstruction totale, le passage des troncs tendrait vers zéro dans le temps, lorsque le tapis s'est complètement stabilisé.

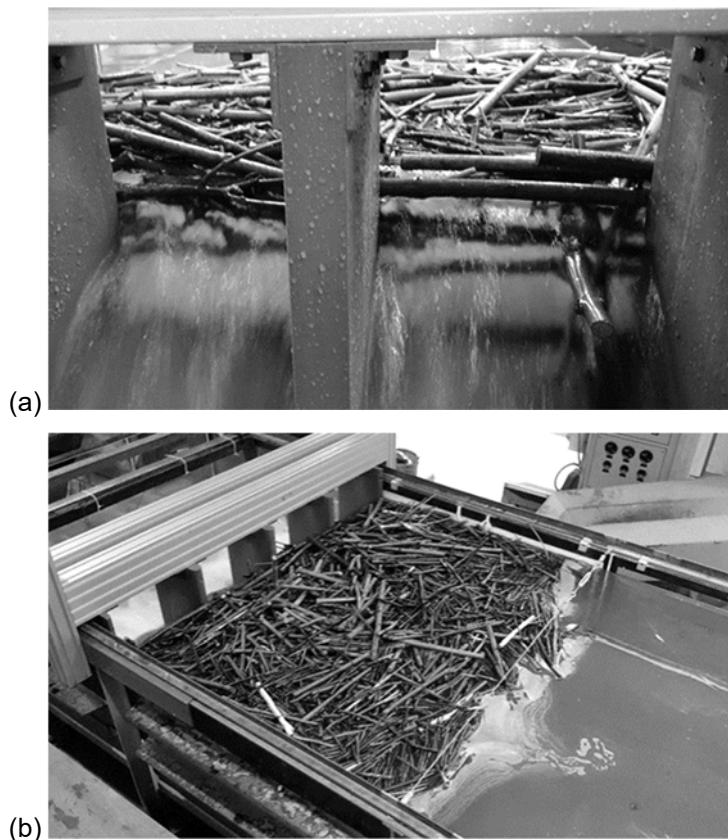


Figure 30. (a) Troncs créant le blocage (test 12), et (b) tapis formé par les troncs à l'arrière du déversoir (test 24).

4.2 Essais sans mesures au déversoir

4.2.1 Effet du débit

Condition limite

Pour évaluer l'influence du débit, les tests 1 à 9 sont considérés (Tableau 2). Il s'agit des tests de répétitions. Dans ces essais, seul le débit est varié. Le volume de bois flottants disposé dans le réservoir est constant avec $1V$. La largeur des passes est également constante avec $b/L_M=0.60$.



Figure 31. (a) Variation de la caractéristique du tapis entre (a) test 13, (b) test 14 et (c) test 15.



Le débit pour les tests 1, 1a, 4 et 7 vaut $Q=0.028 \text{ m}^3/\text{s}$, ce qui correspond à une charge hydraulique sans bois flottants $H_1=0.05 \text{ m}$ (1er palier) et $\chi \approx 0.33$. Pour les tests 2, 2a, 5 et 8, les valeurs sont les suivantes : $Q=0.085 \text{ m}^3/\text{s}$, $H_2=0.10 \text{ m}$ (2ème palier) et $\chi \approx 0.67$, et pour les tests 3a, 6 et 9 : $Q=0.165 \text{ m}^3/\text{s}$, $H_3=0.15 \text{ m}$ (3ème palier) et $\chi \approx 1$.

Observations

Pour atteindre le 1er palier de débit (tests 1, 1a, 4 et 7), peu de troncs se mettent en mouvement à proximité du déversoir. Le reste des troncs restent tranquillement en amont dans le réservoir.

En augmentant progressivement le débit (par exemple du test 1 au test 2), le nombre de troncs mobilisés augmente. Le tapis formé se rapproche ainsi du déversoir. La dimension horizontale du tapis vers l'amont est diminuée et la dimension verticale de stockage des bois flottants est augmentée. La Figure 31 montre les tests 13 (1er palier), 14 (2ème palier) et 15 (3ème palier). Le seul paramètre variable de ces trois tests est l'augmentation du débit.

Il est à noter que les tests 13 à 15 ne font pas partie des essais retenus pour l'étude de l'effet du débit. Mais ce sont des tests qui illustrent de manière claire le phénomène expliqué.

Sur la Figure 31a, il est observé que des espaces sont disponibles entre les piliers et la majeure partie du tapis pour l'écoulement de l'eau. En augmentant le débit (Figure 31b et c), cette espace diminue, voire disparaît.

Courbe de tarage

Sur la Figure 32a où la charge H est exprimée en fonction du débit Q , on remarque que la présence d'un certain volume de bois flottants provoque une surélévation du niveau d'eau. Elle montre également que la surélévation du plan d'eau (différence entre les courbes des essais et la courbe de référence sans bois flottants en bleu clair, est plus prononcé quand le débit augmente).

La Figure 32b montre la situation identique que la Figure 32a, mais exprimée de manière adimensionnelle. On constate que la tendance de C_D pour les différents essais est quasiment horizontale ; C_D n'a plus l'air d'être fonction de χ . Pour rappel, la courbe de référence (en bleu clair) correspond à la courbe de tarage du déversoir sans bois flottants.

En analysant la Figure 32b et en observant le processus de blocage dans le modèle, on peut voir les aspects suivants :

- Les petits $\chi \approx 0.33$ (petits débits, 1er palier) avec des vitesses d'écoulement relativement faibles à l'amont du déversoir (où le blocage est initié) produisent un C_D uniquement légèrement réduit, étant donné que la force transposée sur les bois flottants est encore modeste. Les bois flottants près des piliers sont distribués horizontalement en maximum une à deux couches. Les troncs gênent peu l'écoulement (espaces disponibles dans le tapis).
- Avec l'augmentation à $\chi \approx 0.67$ (débits moyens, 2ème palier), la vitesse d'écoulement augmente parallèlement à la force transposée aux bois flottants, de sorte que le blocage devient plus compact, menant à un C_D légèrement réduit. Les bois flottants sur les piliers forment une barrière plus dense. Les troncs se rapprochent de la crête du déversoir et perturbent le déversement (création d'une surélévation du plan d'eau).
- Pour les grands $\chi \approx 1$ (grands débits, 3ème palier), les forces transposées continuent d'augmenter, mais le blocage était déjà complètement établi auparavant (vers $\chi \approx 0.67$) et ne change pas sa structure. En effet, tous les troncs ne peuvent pas prendre place au déversoir. Les troncs suivants se disposent en tapis dans le réservoir et ce ne sont pas eux qui perturbent majoritairement le fonctionnement de l'évacuateur de crue.

L'augmentation de l'efficacité du déversoir non bloqué avec χ (Figure 32b, courbe de référence en bleu clair) est donc supprimée, puisque les troncs (forment une barrière contre les piliers) perturbent l'écoulement au déversoir.

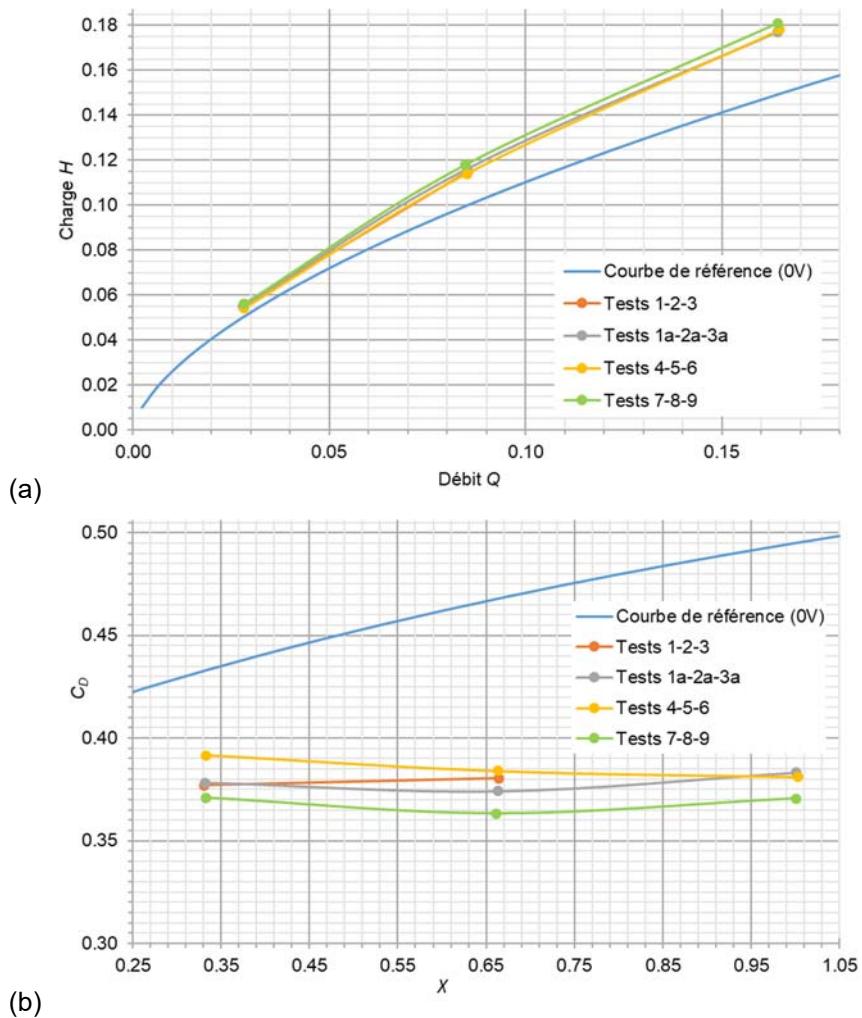


Figure 32. Surelévation du niveau d'eau, exprimé par (a) la charge H vs. le débit Q , et (b) le coefficient du déversoir C_D vs. la charge relative X .

Dans les conditions testées ici (débit varié, $1V$ et $b/L_M=0.60$), le coefficient du déversoir C_D s'approche d'une constante même avec une augmentation de débit prononcée (exprimé par χ). La variation de débit n'aurait pas significativement d'influence sur le coefficient du déversoir C_D , lorsqu'un volume de bois flottants « déterminant » est bloqué en amont du déversoir.

4.2.2 Effet du volume de bois flottants

Condition limite

Les tests avec les mêmes largeurs de passes (rapport b/L_M) et les mêmes débits sont comparés entre eux, pour connaître l'influence d'une variation de volume de bois flottants sur le blocage. Le seul paramètre qui est modifié est la taille du volume de bois flottants ($1V$, $2V$ et $4V$).



Par exemple pour $b/L_M=0.77$ et le 1er palier de débit, le test 16 (1V) est comparé au test 19 (2V) et au test 22 (4V). Pour les tests de répétitions (1, 1a, 4, 7 ; 2, 2a, 5, 8 ; 3a, 6, 9), c'est la moyenne des tests identiques qui a été prise en considération.

Observation

Une différence observée entre la variation du volume de bois flottants (de 1V à 4V) est la stabilité du tapis formé par les bois flottants à la surface de l'eau. Plus la quantité de bois flottants à disposition est grande, plus les troncs entre eux se « colmatent » et le tapis devient plus « rigide » dans son ensemble. Les troncs de plus petites dimensions ont également beaucoup plus de difficultés à se faufiler entre leurs homologues de tailles plus importantes.

La Figure 33 montre les tests 9 (1V), 12 (2V) et 15 (4V), en vue de situation. On constate que le test 9 (1V) possède une extension horizontale de tapis à l'amont plus faible que le test 12 (2V) et c'est encore plus prononcé avec le test 15 (4V). La Figure 34 illustre les mêmes essais (tests 9, 12 et 15) mais avec une vue aval du déversoir. Il est observé que la hauteur maximale de blocage des troncs contre les piliers est quasiment identique malgré une différence de volume de bois flottants entre les tests. La Figure 35 finalement montre les mêmes tests vus depuis l'amont du déversoir.

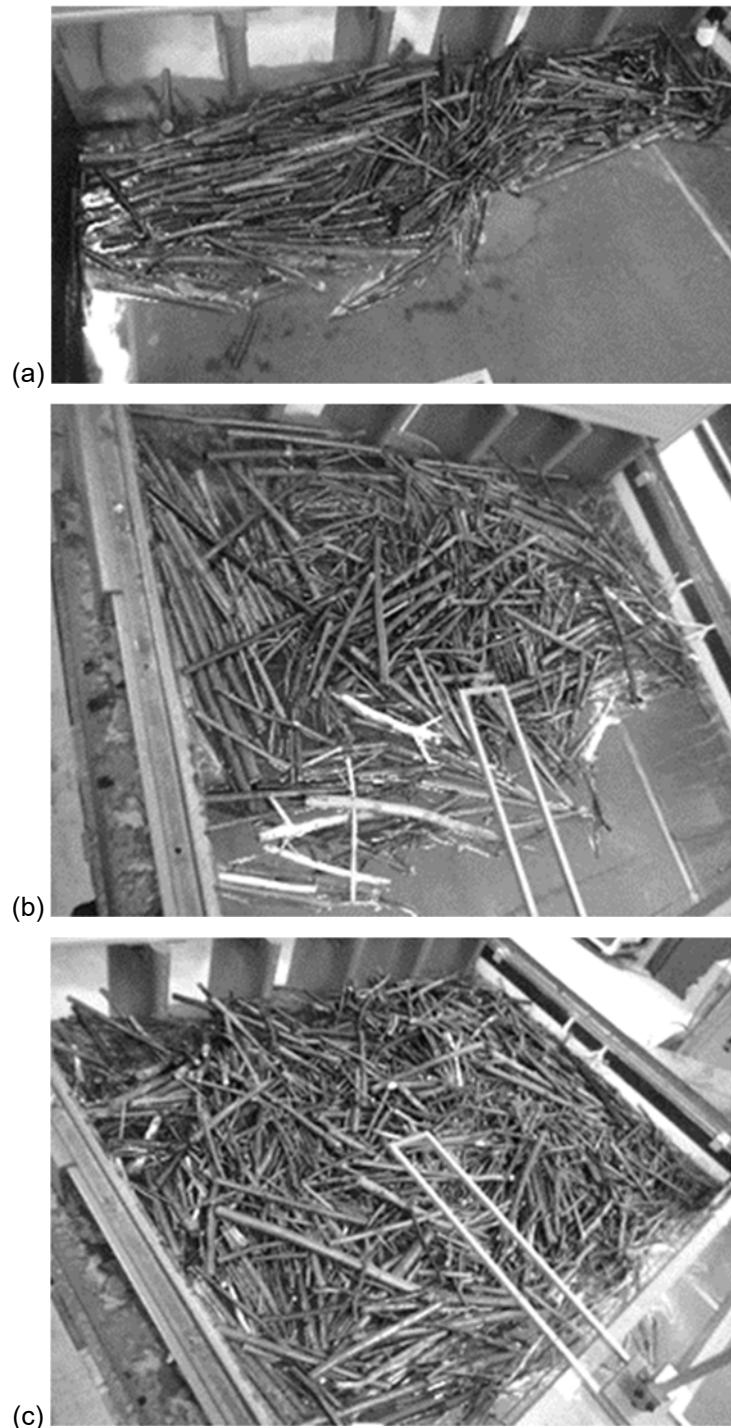


Figure 33. Effet du volume de bois flottants, vue de situation ; (a) test 9 (1V), (b) test 12 (2V) et (c) test 15 (4V).

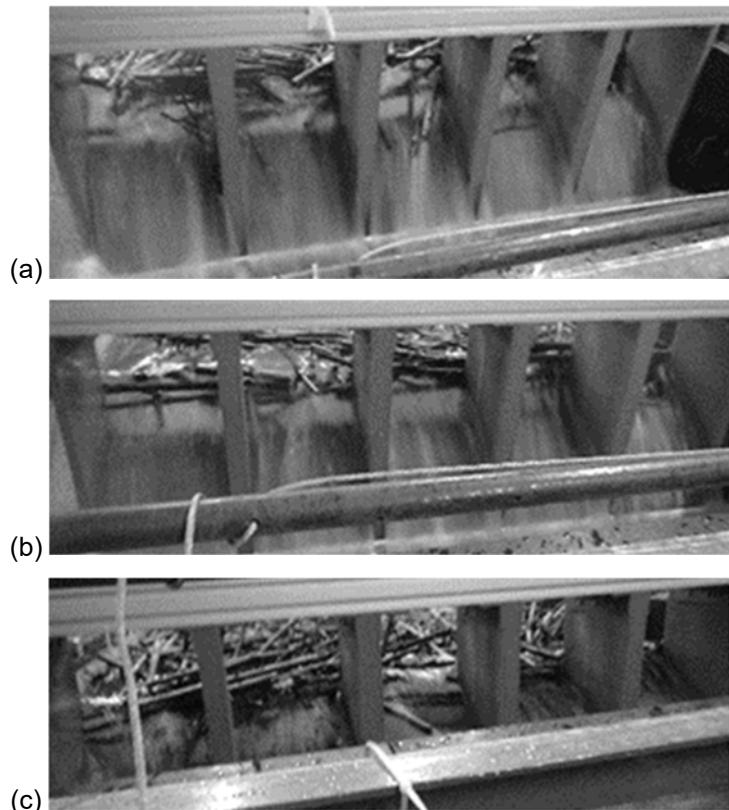


Figure 34. Effet du volume de bois flottants, vue aval au déversoir ; (a) test 9 (1V), (b) test 12 (2V) et (c) test 15 (4V).



Figure 35. Effet du volume de bois flottants, vue amont au déversoir ; (a) test 9 (1V), (b) test 12 (2V) et (c) test 15 (4V).



L'observation sur le modèle réduit a montré que lorsqu'un « faible » volume de bois flottants ($1V$) se trouve dans le réservoir, de nombreux troncs franchissent le déversoir si une passe se débloque malencontreusement (tests 6 et 17, par exemple, Tableau 2). Lorsque qu'un volume de bois flottants plus important est mis en place ($2V$, test 12, par exemple), seuls les troncs contre le déversoir se mettent en mouvement. Le solde du tapis reste en amont de la passe ouverte.

Courbe de tarage

L'influence d'une variation de volume de bois flottants sur la surélévation de la charge est montrée à la Figure 36, où la charge H est exprimée en fonction du débit Q . Chaque graphe représente une situation de paramètres identiques (rapport b/L_M semblable), le seul paramètre varié dans les graphiques est le volume de bois flottants. La courbe en bleu clair représente la situation sans bois flottants.

L'élévation du niveau d'eau dans le réservoir n'est pas fonction de l'augmentation du volume de bois flottants bloqué (de $1V$ à $4V$), car il n'y a pas de relations entre les différentes situations. La surélévation obtenue est presque identique malgré la différence de volume de bois flottants.

La Figure 37 montre le coefficient C_D en fonction de χ , avec la même méthodologie de comparaison appliquée à la Figure 36. On observe que la présence de bois flottants réduit le coefficient C_D (comparé à la courbe bleu clair qui démontre une situation sans bois flottants). On constate qu'une variation du volume de bois flottants n'a pas d'impact significatif sur le coefficient C_D qui devient quasiment constant. Cela signifie aussi que les volumes testés étaient suffisamment grands pour toujours représenter le cas d'un blocage extrême et complet.

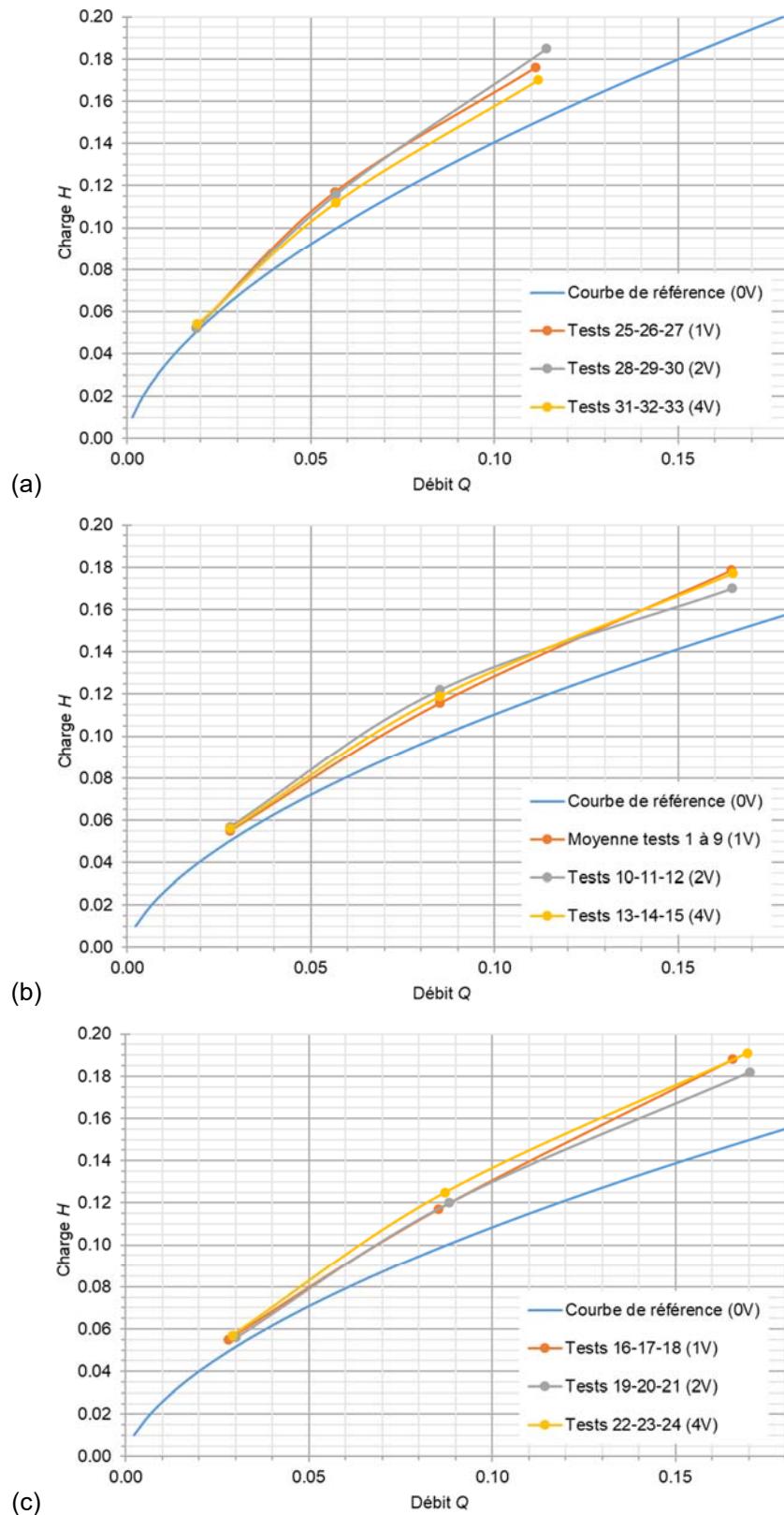


Figure 36. Courbe de tarage : débit Q vs. charge H avec variation du volume de bois flottants ; $b/L_M =$
(a) 0.40, (b) 0.60 et (c) 0.77.

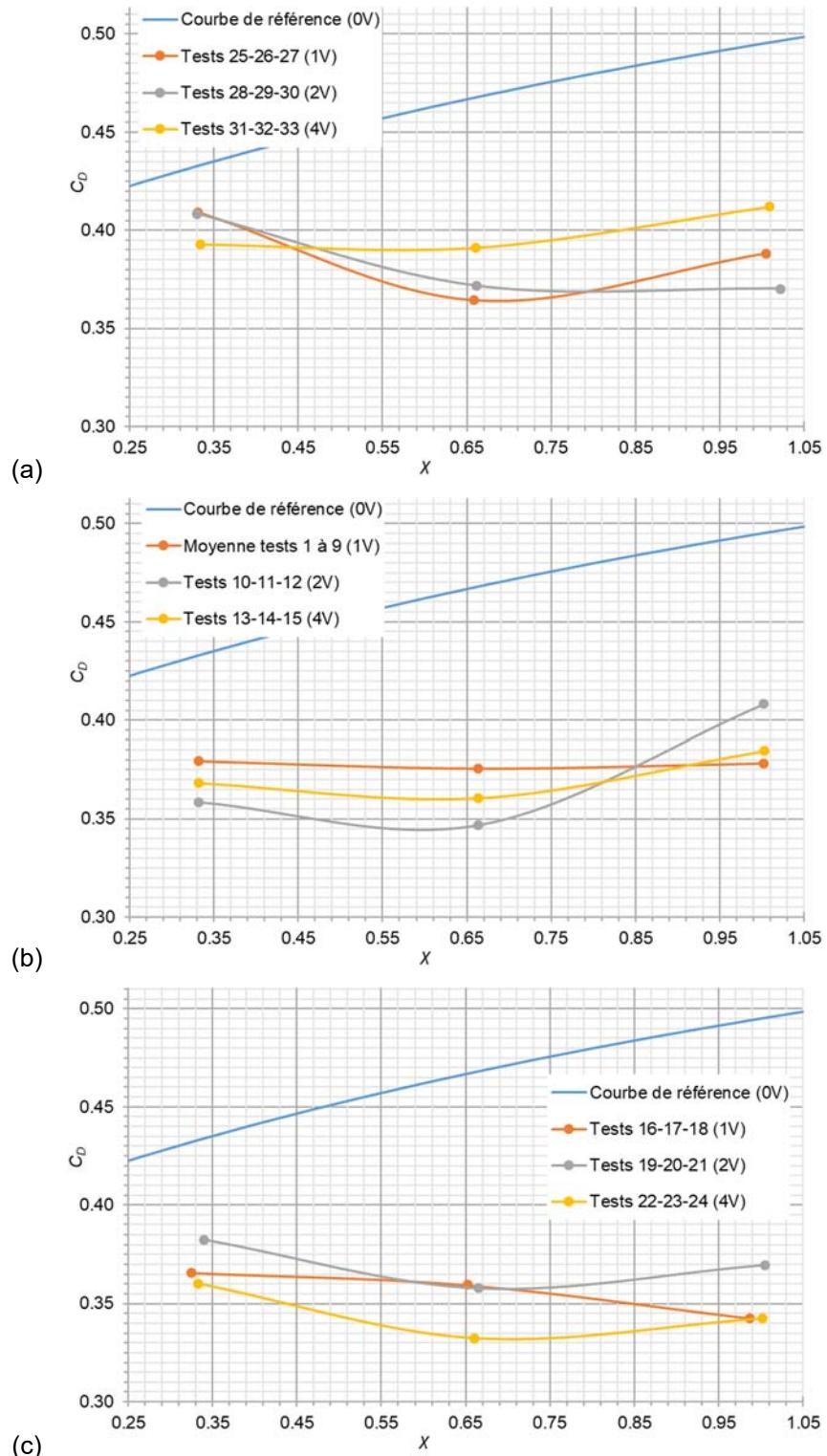


Figure 37. Courbe de tarage : coefficient C_D vs. charge relative χ avec variation du volume de bois flottants ; b/L_M = (a) 0.40, (b) 0.60 et (c) 0.77.



On constate que la surélévation du niveau d'eau n'est pas fonction de la variation du volume de bois flottants, dans les conditions testées ici. En se référant à la Figure 38, il est observé que la hauteur de blocage des bois flottants atteint un niveau maximal similaire au déversoir pour des volumes de bois flottants différents. Ce sont ces troncs présents contre le déversoir qui sont responsables de la diminution de la capacité de décharge du réservoir et donc de la surélévation du niveau d'eau.

En effet, un volume de bois flottants très conséquent (par exemple $4V$) se dispose en tapis. Cet encombrement se dispose a priori en longueur et non en hauteur. Les troncs, même avec un débit important, n'arrive plus à se déplacer au-dessus ou au-dessous de leurs voisins situés en amont. C'est pourquoi, ils viennent se mettre en place à la suite de leurs congénères dans le réservoir. La Figure 38 représente schématiquement le phénomène. Les bois flottants supplémentaires déposés dans le réservoir qui sont éloignés du déversoir n'ont pas d'influence sur l'écoulement proche du déversoir. Avec un volume de bois flottants plus important, plusieurs couches de troncs se superposent, ce qui engendre une stabilité améliorée du tapis. L'enchevêtrement des troncs est meilleur. L'imbrication d'un grand nombre de troncs entre eux assure une rigidité au tapis et ne permet pas aux troncs de se détacher.

Dans les conditions limites de cette étude, un volume de bois flottants « déterminant » est atteint pour la charge maximale dans le réservoir. Pour des volumes de bois flottants encore plus importants, l'élévation du niveau serait similaire à la surélévation maximale constatée. En d'autres termes, les volumes de bois flottants testés ($1V$, $2V$ et $4V$) étaient suffisamment grands pour créer un blocage total dans des conditions extrêmes.

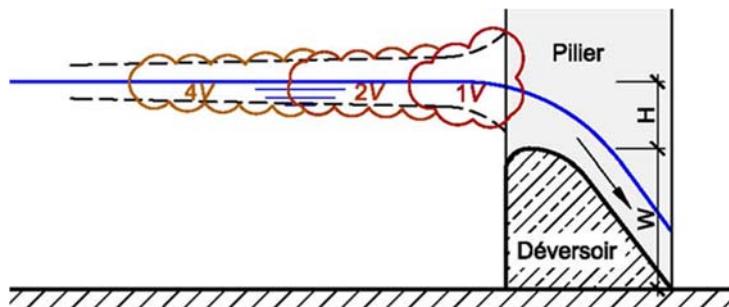


Figure 38. Schéma des dispositions des volumes de bois flottants au déversoir, en coupe.

4.2.3 Effet de la largeur des passes

Condition limite

L'influence de la largeur des passes sur la surélévation de la charge dans le réservoir est étudiée. Les tests avec les mêmes volumes de bois flottants (soit $1V$, $2V$ ou $4V$) et les mêmes débits sont comparés entre eux, pour déterminer l'effet d'un changement de largeur de passe. Le seul paramètre qui est donc changé est la largeur des passes (le rapport b/L_M).

Par exemple pour un volume de bois flottants de $4V$ et le 1er palier de débit, le test 13 ($b/L_M=0.60$) est comparé au test 22 ($b/L_M=0.77$) et au test 31 ($b/L_M=0.40$).

Comme pour l'étude de l'effet du volume de bois flottants, pour les tests de répétitions (tests 1, 1a, 4, 7 ; 2, 2a, 5, 8 ; 3a, 6, 9), c'est la moyenne des tests identiques qui a été prise en considération.



Afin de s'assurer d'une obstruction totale au déversoir, le critère de Godtlund et Tesaker (1994) a été pris considération ; la largeur relative des passes b/L_M est inférieure à 0.80.

Observations

Avec des volumes extrêmes 4V de bois flottants, un blocage complet se forme rapidement quand le rapport b/L_M est « petit » ($b/L_M=0.40$). Il a été observé que le blocage était plus stable et le nombre de troncs qui franchissaient le déversoir étaient moindres pour des passes étroites.

Le nombre de fractions de longueurs de troncs (Tableau 1) qui peuvent créer un blocage varie en fonction du rapport b/L_M . Pour $b/L_M=0.40$, cinq fractions ont un potentiel d'obstruction (classes E à I). Avec $b/L_M=0.60$, quatre fractions ont un risque de blocage (classes F à I). Alors que pour $b/L_M=0.77$, trois fractions sont déterminantes (classes G à H). Des passes plus larges que $b/L_M \geq 0.80$ n'ont pas été installées, pour respecter le critère de Godtlund et Tesaker (1994) et garantir un blocage complet.

Dans la Figure 39, seul le paramètre de la largeur est modifié, les deux autres grandeurs sont identiques, à savoir un volume de bois flottants de 4V et un débit correspondant au 3ème palier. La Figure 39a présente le test 33 ($b/L_M=0.40$), la Figure 39b montre le test 15 ($b/L_M=0.60$) et la Figure 39c illustre le test 24 ($b/L_M=0.77$). Il est observé que sur la Figure 39a, plus de longueurs de troncs sont en mesure de se bloquer qu'à la Figure 39c.





Figure 39. Effet de la largeur des passes ; (a) test 33 ($b/L_M=0.40$), (b) test 15 ($b/L_M=0.60$) et (c) test 24 ($b/L_M=0.77$).

Courbe de tarage

La Figure 40 représente l'évolution du coefficient du déversoir C_D en fonction de χ et avec le rapport b/L_M modifié. Le paramètre du volume de bois flottants est constant par graphique (a) 1V, (b) 2V et (c) 4V.

Un effet mineur de la largeur des passes devient visible. Il est intéressant de noter que, par tendance, les passes « étroites » ($b/L_M=0.40$) génèrent moins d'élévation de niveau d'eau, alors que les passes « larges » ($b/L_M=0.77$) augmentent un peu plus la charge.

L'efficacité du déversoir semble meilleure, en règle générale, lorsque b/L_M est « petit ». En effet, sur la Figure 40, les courbes $b/L_M=0.40$ sont légèrement supérieures aux courbes $b/L_M=0.77$. Néanmoins, cette tendance n'est pas significative ou systématique.

Selon la littérature, la largeur des passes est le paramètre le plus sensible pour un blocage sous une faible apparition de bois flottants. Les résultats ont montré que l'effet de la largeur des passes sur un blocage complet n'est pas aussi déterminant lorsque les conditions sont extrêmes.

Le blocage est plus stable quand la largeur des passes est « petite », ce qui pourrait expliquer la meilleure efficacité de l'évacuateur de crue, dans ces conditions. En effet, les troncs sont bien « calés » contre les piliers. Un nombre restreint de troncs suffisent au blocage. L'écoulement de l'eau suit alors un chemin bien défini, sans y être beaucoup perturbé. Quand b/L_M est « grand », un nombre de troncs mobilisés contre les piliers plus importants est nécessaire pour assurer un blocage complet. L'écoulement de l'eau à l'entrée du déversoir se retrouve donc plus perturbé, ce qui pourrait démontrer la moins bonne capacité de décharge. Il est à souligner que cet effet reste très faible.

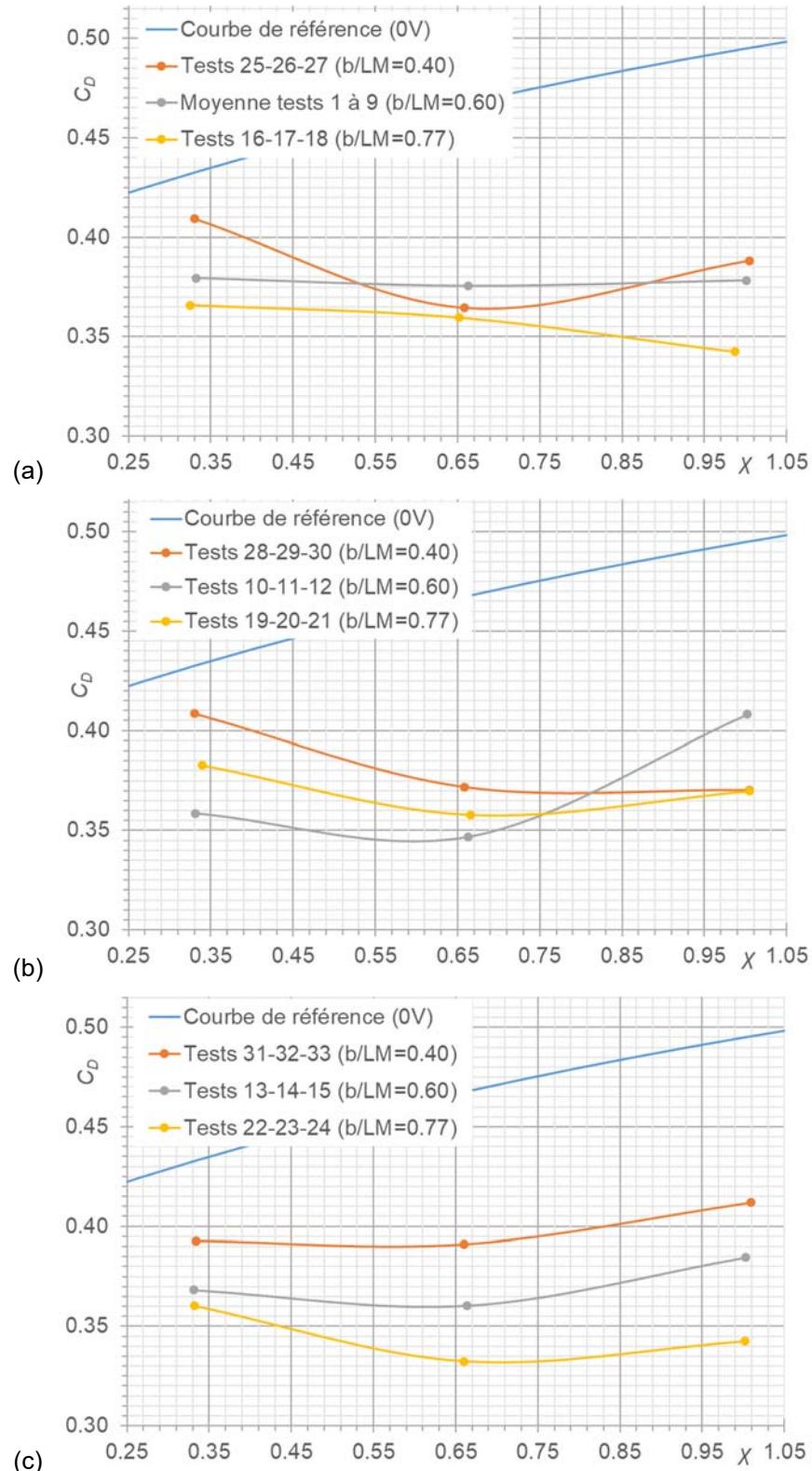


Figure 40. Effet de la largeur des passes, courbe de tarage exprimé par C_D en fonction de χ ; (a) 1V, (b) 2V et (c) 4V.



4.2.4 Effets combinés

Dans l'interprétation des paramètres testés, il a été conclu qu'aucun des trois paramètres-clés (débit, volume de bois flottants et largeur des passes) pris en considération dans cette étude ne crée des phénomènes dominants dans la surélévation de la charge lorsque le déversoir est complètement obstrué.

Lors des essais, il a été constaté que les premiers longs troncs se bloquent normalement contre les piliers de l'évacuateur de crue. Les troncs qui arrivent ensuite au déversoir prennent place dans le réservoir sous la forme d'un tapis, lorsque le blocage est stable et complet.

Quelques chiffres-clés sont disponibles au-dessous, dérivés des présents tests, afin d'avoir une impression grossière :

- La charge au déversoir avec un volume de bois flottants « déterminant » bloqué s'élève en moyenne à 114% comparé à la charge correspondante sans bois flottants.
- La charge s'est élevée au maximum à 121%.
- Le coefficient du déversoir vaut en moyenne $C_D=0.373$, lorsqu'un volume de bois flottants déterminant est bloqué. L'écart-type s'élève à $\sigma=0.021$. La valeur minimale vaut $C_D=0.332$ et la valeur maximale $C_D=0.412$.

Une analyse statistique des coefficients C_D a été effectuée. Les valeurs des coefficients C_D des tests 1 à 33 ont été classées dans un histogramme (Figure 41). La courbe rouge représente une distribution normale sur la base de la moyenne et de l'écart-type des coefficients C_D calculés précédemment.

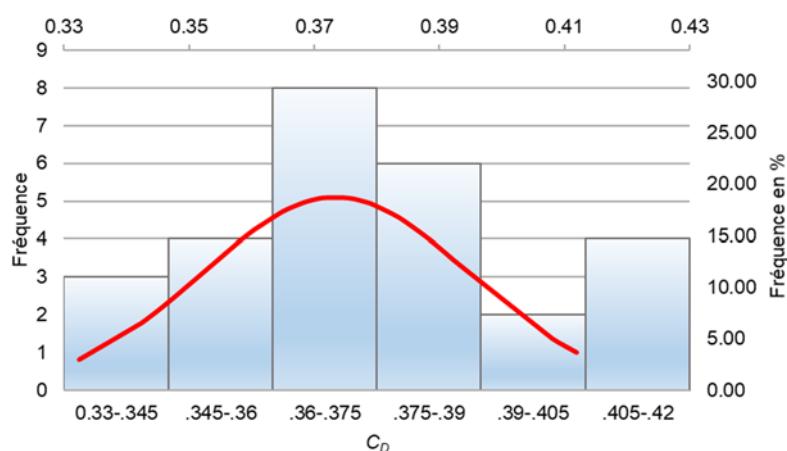


Figure 41. Fréquence des coefficients C_D pour les tests sans mesures.

La Figure 42 représente les coefficients du déversoir C_D des tests 1 à 33 en fonction de χ . Quand $\chi=1$, cela correspond au débit de dimensionnement du déversoir. La courbe supérieure correspond à la courbe de tarage du déversoir sans bois flottants. L'explication des différents symboles (en fonction des paramètres-clés) dans le graphique est la suivante :

- Les icônes rondes sont valables pour les tests avec un rapport de largeur de passes relatives $b/L_M=0.60$.
- Les icônes carrées sont valables pour les tests avec un rapport de largeur de passes relatives $b/L_M=0.77$.



- Les icônes triangulaires sont valables pour les tests avec un rapport de largeur de passes relatives $b/L_M=0.40$.
- Les icônes noires pleines représentent les tests avec une configuration de volume de bois flottants de 1V.
- Les icônes grises représentent les tests avec une configuration de volume de bois flottants de 2V.
- Les icônes noires vides représentent les tests avec une configuration de volume de bois flottants de 4V.

Dès qu'un blocage complet est généré au déversoir, on constate que toutes les valeurs C_D mesurées tendent vers une constante. Il n'y a pas de liens dominants entre les différents paramètres variés, l'absence d'un effet systématique de χ , $\#V$ et b/L_M devient évidente. On observe sur la Figure 42 que la plupart des coefficients C_D reste dans les deux bornes de l'écart-type et que la dispersion des valeurs est relativement faible.

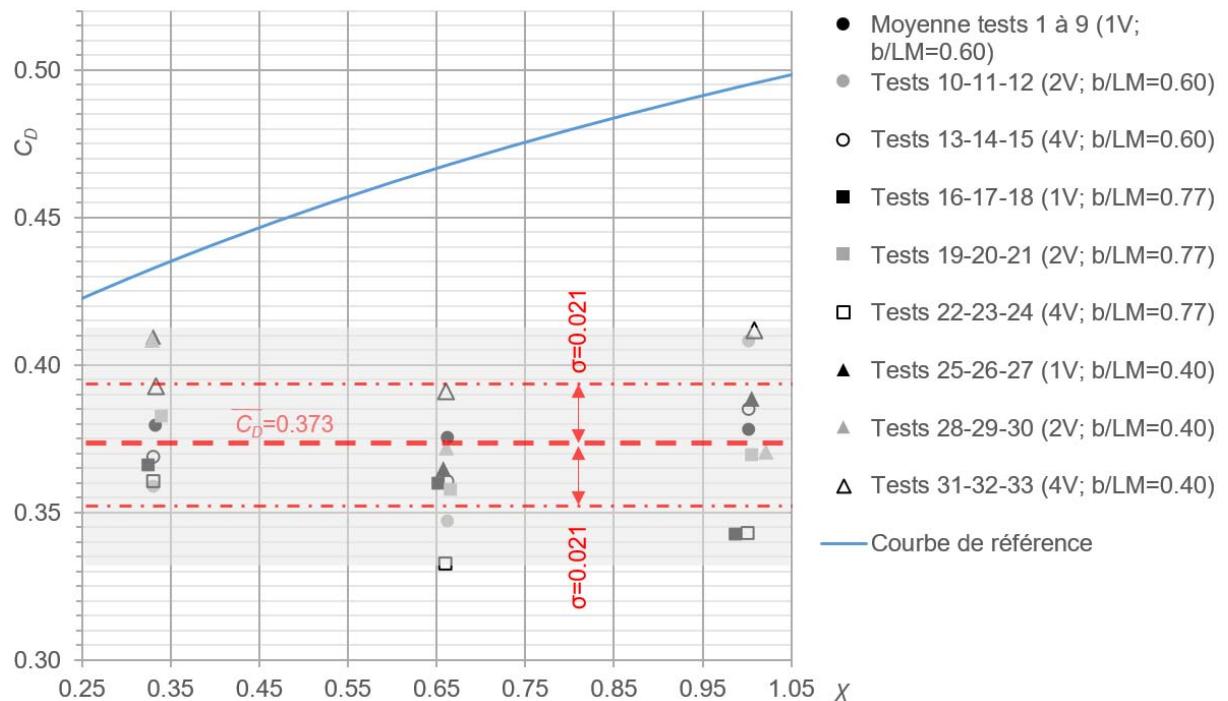


Figure 42. Ensemble de la distribution des coefficients C_D pour les tests sans mesures.

L'analyse statique a permis d'obtenir un coefficient moyen $C_D=0.373$ (déterminée sur la base de tous les C_D mesurés sur le modèle pour les tests 1 à 33, Tableau 2) et leur écart-type $\sigma=0.021$. Dans la pratique et donc pour le dimensionnement ou le contrôle des évacuateurs de crue, le coefficient du déversoir (du côté de la sécurité) C_{DD} pourrait être ainsi le suivant

$$C_{DD} = C_D - \sigma = 0.373 - 0.021 = 0.352 \quad (5)$$

Le coefficient recommandé vaudrait alors $C_{DD}=0.352$. Ce coefficient s'applique jusqu'au débit de dimensionnement et pour un déversoir complètement bloqué avec des piliers, donc pour des

conditions extrêmes. La comparaison du déversoir bloqué C_{DD} (Equation 5) avec la valeur de référence sans bois flottants (Equation 3) indique l'augmentation supplémentaire du niveau du réservoir due au blocage du bois flottant.

Sur la Figure 43, les charges H mesurées avec un blocage sont indiquées en fonction du débit unitaire $q=Q/nb$. Il est visible que le plan d'eau se soulève considérablement sous l'effet du blocage. L'explication des différents symboles est semblable à la Figure 42. On constate que la dispersion des valeurs est faible sur la surélévation du niveau d'eau. Pour information, le débit unitaire de dimensionnement vaut $q_D=0.127 \text{ m}^2/\text{s}$ dans le modèle, ce qui correspond environ au 3ème palier de débit sur la Figure 42.

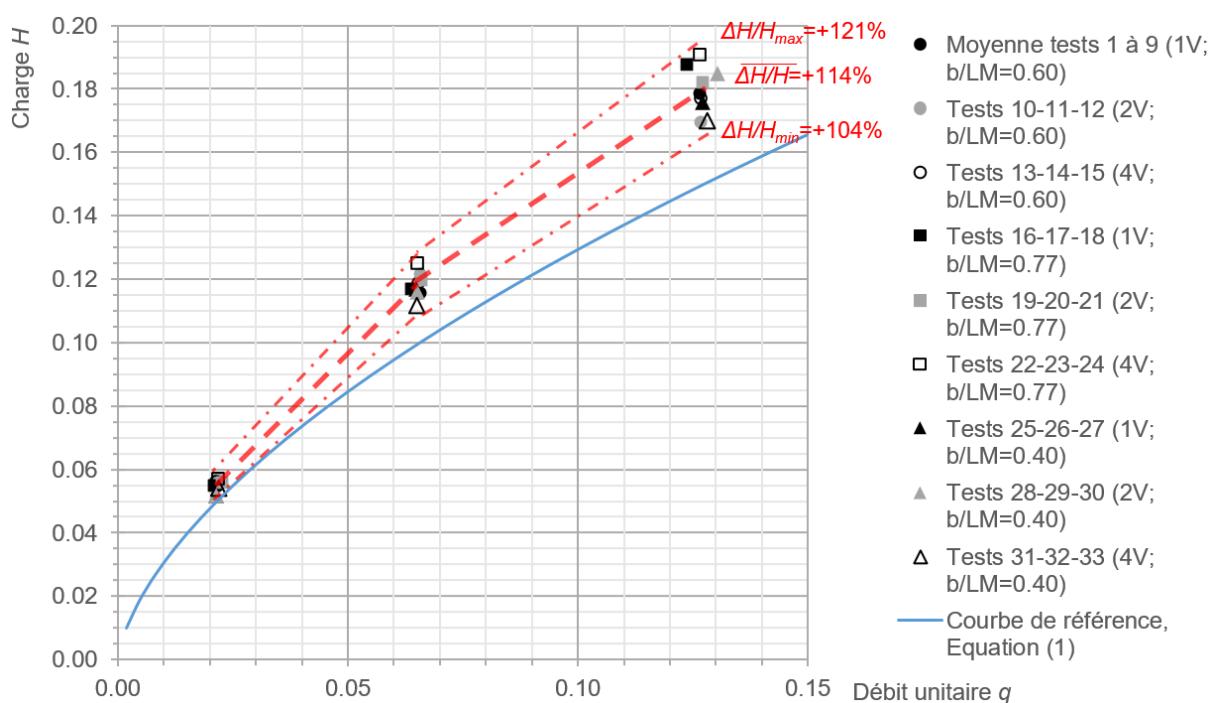


Figure 43. Courbe de tarage exprimé par la charges H [m] en fonction du débit unitaire q [m^2/s] pour les tests sans mesure.

4.2.5 Dimensions du tapis

Les essais 7 à 33 sont utilisés pour étudier les dimensions du tapis formé par les bois flottants. Les tests de répétition 1 à 6 ne sont pas pris en considération pour ne pas influencer davantage une configuration d'essai.

A chaque essai, l'extension horizontale du tapis de bois flottants E [m] a été relevée approximativement. Il s'agit de la distance moyenne perpendiculaire entre la tête des piliers (contre le déversoir) et l'arrière du tapis en amont dans le réservoir. La mesure est prise en général à l'axe du canal (Figure 44a). La hauteur verticale du tronc le plus haut à l'obstruction F [m] en amont du déversoir par rapport au niveau d'eau dans le réservoir a également été mesurée (Figure 44b).

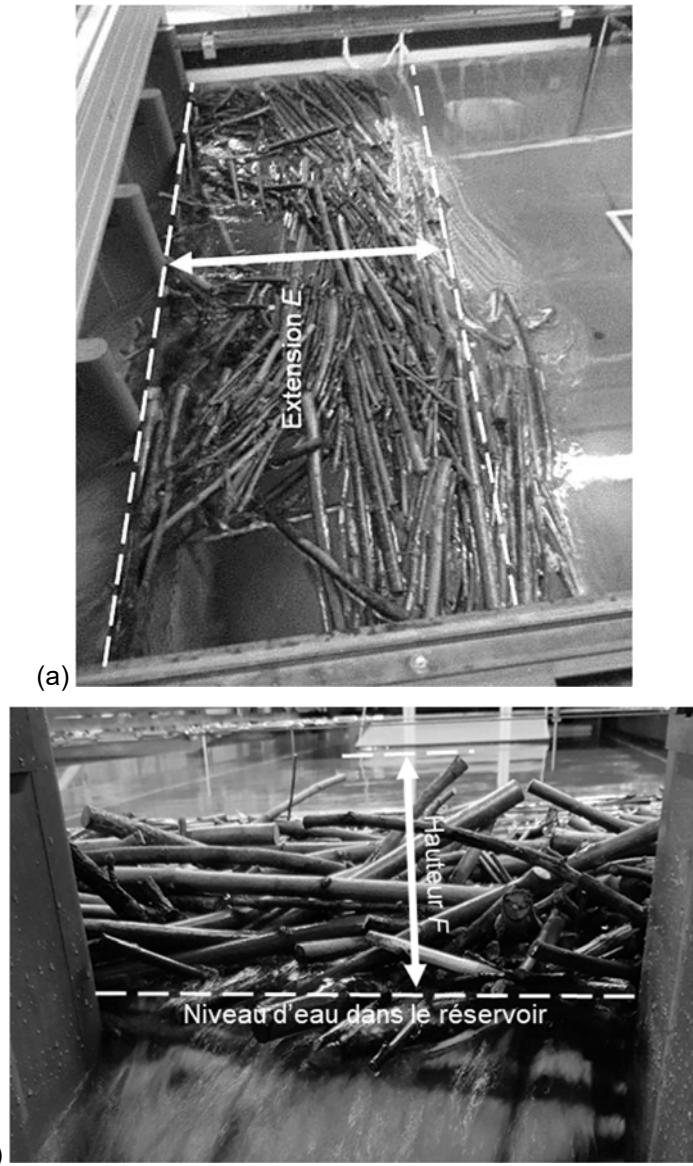


Figure 44. (a) Extension horizontale moyenne du tapis E (test 18), et (b) hauteur maximale F (test 21).

Plusieurs observations sont déjà disponibles ci-dessous :

- L'extension horizontale E du tapis se réduit avec l'augmentation du débit. En augmentant progressivement le débit, le nombre de troncs mobilisés augmente. Le tapis formé par les bois flottants se rapproche ainsi du déversoir.
- On constate que la variation du volume de bois flottants de $1V$ à $2V$ puis $4V$ provoque une extension horizontale plus importante du tapis formé à l'amont du réservoir.
- Il est observé que la hauteur maximale F des troncs contre les piliers est quasiment similaire malgré une différence de volume de bois flottants entre les tests. Cette constatation s'explique par le fait que le niveau de blocage « maximum » est déjà atteint avec le plus petit volume de bois flottants ($1V$). Pour rappel, c'est un volume de bois flottants « déterminant » pour représenter un blocage complet, dans les conditions testées.



L'extension horizontale du tapis est influencée par le volume total de bois flottants V , la largeur du canal B et le débit (exprimé par la hauteur critique h_c). L'extension horizontale E peut être approximée comme :

$$\frac{E}{h_c} = 2.76 \left(\frac{V}{Bh_c^2} \right)^{0.57} \quad (6)$$

La définition de la hauteur critique h_c comprend la largeur active du déversoir nb

$$h_c = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{nb^2 g}} \quad (7)$$

Il faut souligner que l'équation (6) considère B comme la largeur de référence. La dispersion des données augmente si $nb \ll B$. Cette dispersion signifie que seule une largeur de déversoir étroite nb est « ouverte » (ici pour les tests 7 à 33 : $0.58 \leq nb/B \leq 0.89$), par rapport à la largeur totale du canal $B=1.50$ m. Le coefficient de détermination est $R^2=0.94$ entre l'équation (6) et l'ensemble des valeurs mesurées (Figure 45a). La mesure n'a fourni qu'une valeur E approximative en raison de la nature hétérogène de la composition de bois flottants.

La hauteur de blocage du tronc le plus haut F est difficile à normaliser. Une enveloppe est tout de même proposée :

$$\frac{F}{h_c} \leq 0.27 \left(\frac{V}{Bh_c^2} \right)^{0.50} \quad (8)$$

Le blocage de bois flottants directement en amont du déversoir s'est donc élevé verticalement au-dessus de la surface du niveau d'eau dans le réservoir, jusqu'à F au maximum. La détermination du meilleur ajustement est $R^2=0.62$. La Figure 45b compare l'ensemble des valeurs mesurées avec l'équation (8). La dispersion des valeurs est plus grande que pour la l'extension horizontale du tapis E .

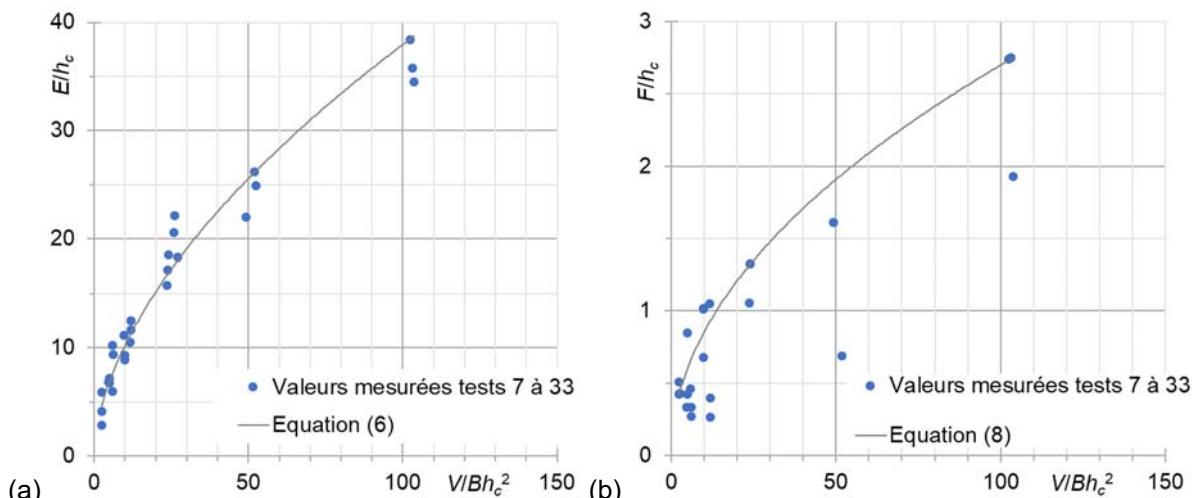


Figure 45. (a) Extension horizontale E/h_c en fonction de V/Bh_c^2 , équation (6), et (b) hauteur maximale des troncs F/h_c en fonction de V/Bh_c^2 , équation (8).



4.3 Essais avec mesures au déversoir

4.3.1 Têtes des piliers prolongés dans le réservoir

Condition limite

Les piliers ont été équipés d'éléments supplémentaires qui prolongent leurs têtes dans le réservoir. L'effet hydraulique suggéré de cette contre-mesure est que le blocage des bois flottants situé contre les piliers est éloigné de la section d'écoulement critique. Un espace pour l'écoulement de l'eau serait disponible entre le déversoir et les premiers troncs bloqués, dans le but de réduire la perte d'efficacité au déversoir.

Les paramètres suivants ont fait l'objet de variation systématique :

- La position de la tête des piliers p dans le réservoir (Figure 17, Figure 26) :
 - $p=0.00$ m; « zéro » (alignés avec la crête du déversoir), pour les essais 16 à 33
 - $p=0.04$ m; « petit » (prolongés de 0.04 m dans le réservoir,), pour les essais 34 à 42 et 52 à 60
 - $p=0.08$ m ; « grand » (prolongés de 0.08 m dans le réservoir), pour les essais 43 à 51 et 61 à 69
- Le débit : exprimé par χ , avec trois paliers $\chi=1/3$, $2/3$ et $3/3$
- Le volume de bois flottants : $1V$, $2V$ et $4V$
- La largeur des passes : $b=0.175$ m ou 0.335 m (correspondant à $b/L_M=0.40$ ou 0.77). Le nombre de passes adjacentes ouvertes n varie entre 4 ($b/L_M=0.77$) et 5 ($b/L_M=0.40$).
- Les essais 34 à 69 sont considérés (Tableau 3).

Le surplomb de la tête du pilier p par rapport à la charge hydraulique sans bois flottants H correspond au facteur p/H . Dans cette étude, p/H est compris entre 0 et 1.64.

Observations

Comme suggéré, les premiers troncs bloqués se retrouvent éloignés de la crête du déversoir avec des piliers dont la tête est prolongée en amont dans le réservoir. La Figure 46 représente les trois situations testées avec comme paramètres constants $b/L_M=0.77$, $4V$ et $\chi=3/3$; (a) $p=0.00$ m (test 21), (b) $p=0.04$ m (test 60), et (c) $p=0.08$ m (test 69). On constate que quand $p=0.08$ m et donc « grand », les bois flottants sont bloqués plus en amont par rapport à $p=0.00$ m « zéro ». Il a également été observé que les blocages sont plus stables lorsque $p=0.08$ m « grand » et moins de troncs se trouvent coincés dans les passes.

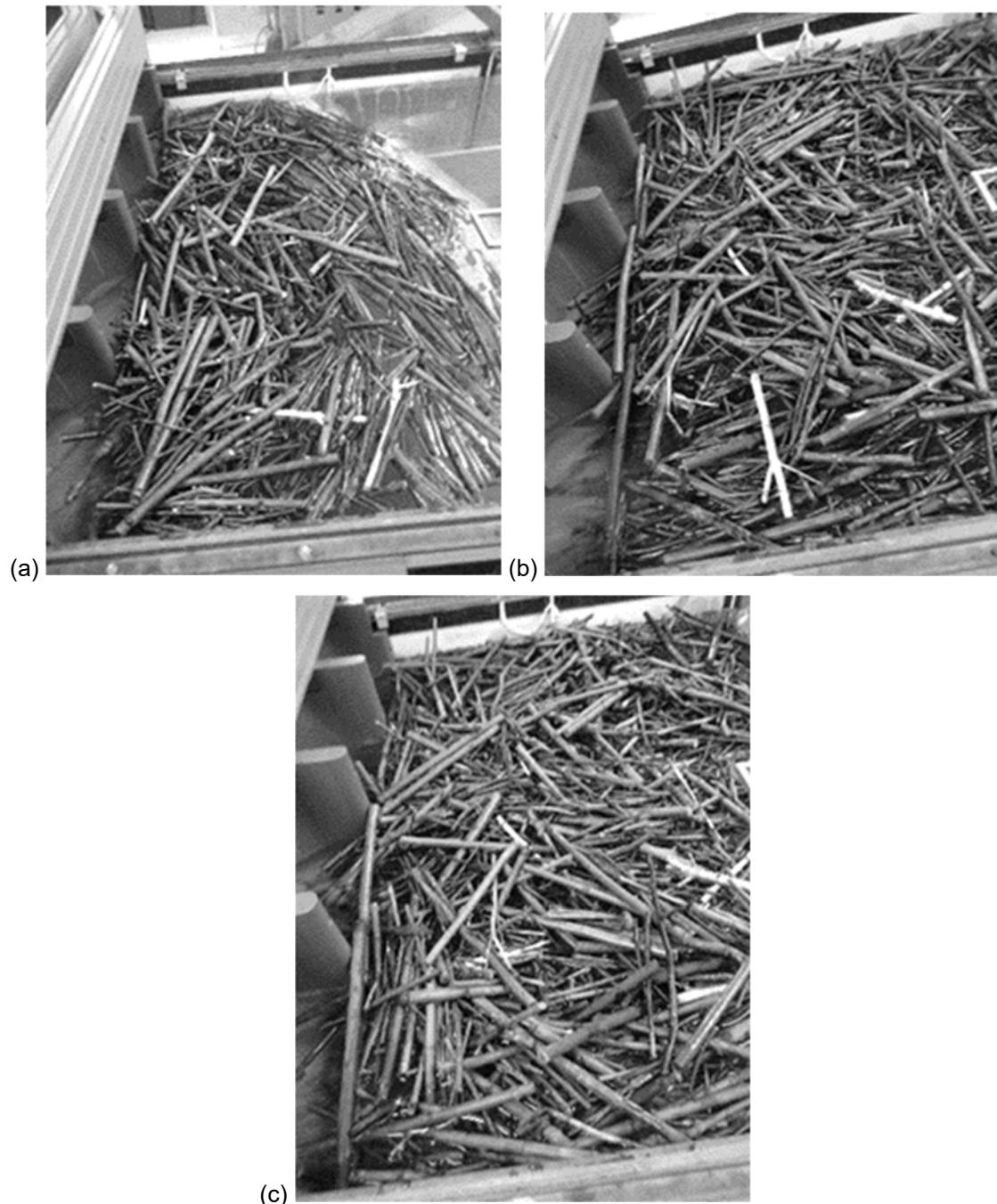


Figure 46. Distance différente entre les premiers troncs bloqués et la crête du déversoir ; $p =$ (a) 0.00 m (test 21), (b) 0.04 m (test 60), et (c) 0.08 m (test 69).



Courbe de tarage

La Figure 47 et la Figure 48 représentent l'évolution du coefficient du déversoir C_D en fonction de χ :

- La courbe de référence, calculée selon Vischer et Hager (1999) sans bois flottants, est légèrement supérieure à toutes valeurs mesurées. Cet effet est discuté dans le chapitre 3.3.1 (Figure 23).
- La courbe en orange représente les essais pour $p=0.00$ m « zéro ».
- La courbe en gris représente les essais pour $p=0.04$ m « petit ».
- La courbe en jaune représente les essais pour $p=0.08$ m « grand ».
- Le paramètre du volume de bois flottants est constant par graphique ; Figure 47a et Figure 48a 1V, Figure 47b et Figure 48b 2V et Figure 47c et Figure 48c 4V.
- La Figure 47a, b est valable pour une largeur de passes de $b/L_M=0.40$ et la Figure 48a, b et c pour une largeur de passe de $b/L_M=0.77$.

On observe qu'avec une tête de pilier « grande », l'efficacité au déversoir est améliorée par rapport à une tête de pilier « zéro ». Cette généralité semble valable indépendamment des autres conditions de bords (débit, volume de bois flottants et largeur des passes).

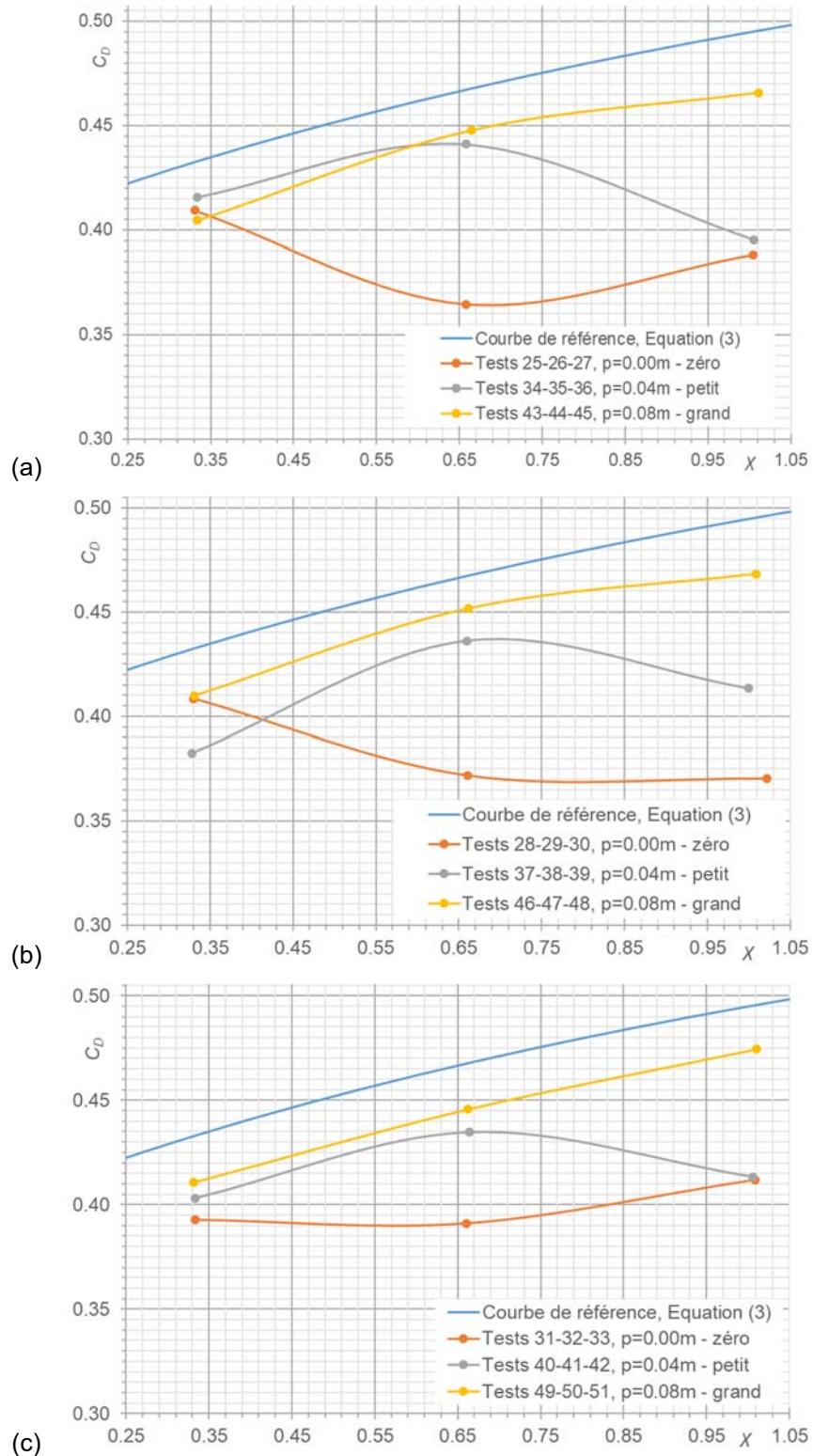


Figure 47. Coefficient du déversoir C_D en fonction de χ avec variation de la position de la tête des piliers pour $b/L_M=0.40$ et (a) 1V, (b) 2V et (c) 4V.

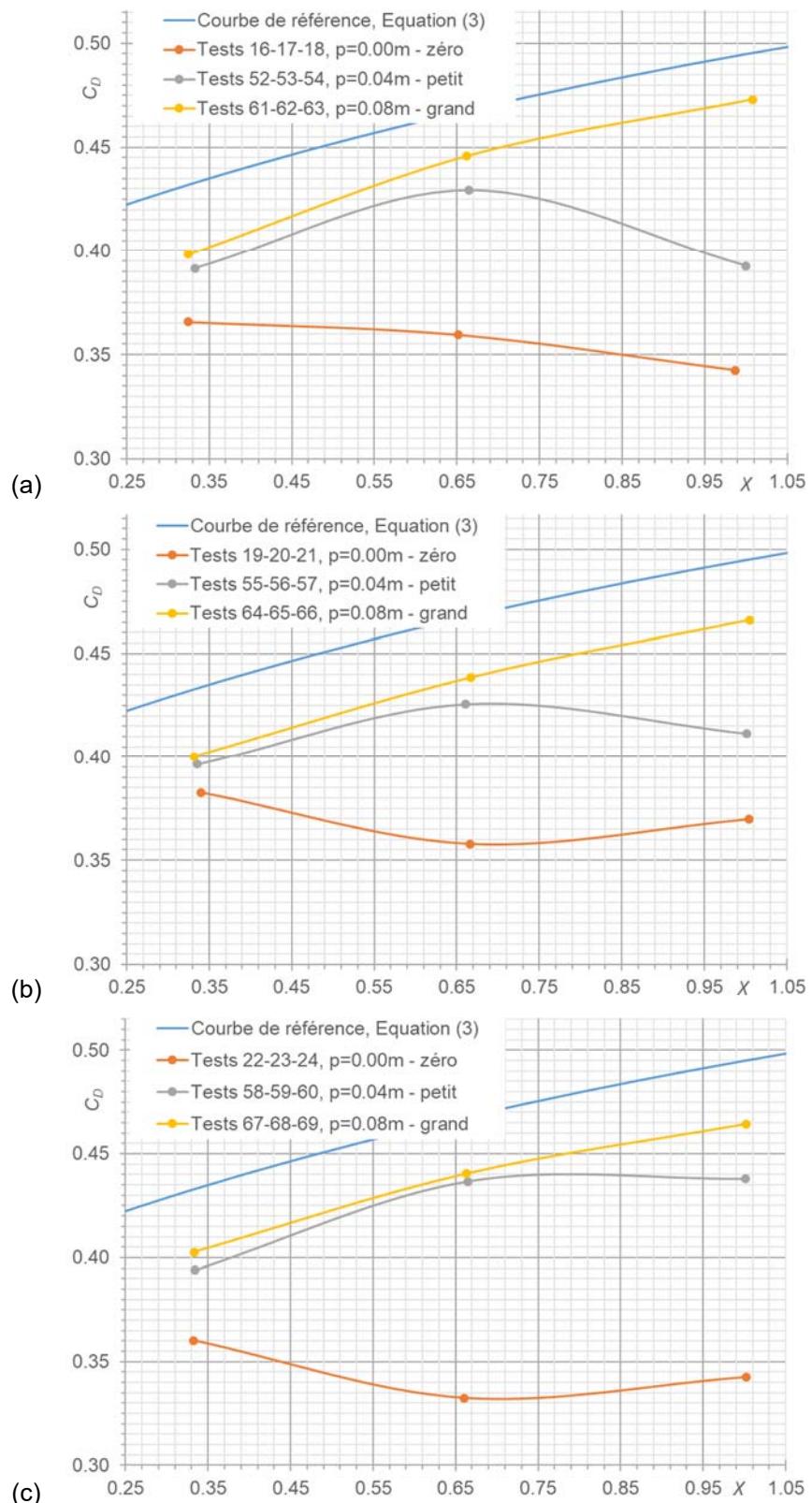


Figure 48. Coefficient du déversoir C_D en fonction de χ avec variation de la position de la tête des piliers pour $b/L_M=0.77$; (a) 1V, (b) 2V et (c) 4V.



Interprétation

Les données ont mis en évidence un effet positif évident du prolongement de la tête du pilier p dans le réservoir. Plus il est grand, moins le C_D est affecté par les bois flottants bloqués.

Pour résumer, la Figure 49 montre la courbe de tarage du déversoir C_D en fonction de χ pour les trois configurations de têtes de piliers testées. Toutes les données des « grands » prolongements (symboles ouverts) se rapprochent de la courbe de référence sans bois flottants (en bleu, Vischer et Hager, 1999), alors que les essais où la tête des piliers est contre le déversoir « zéro » (symboles noirs) indiquent des valeurs C_D fortement réduites.

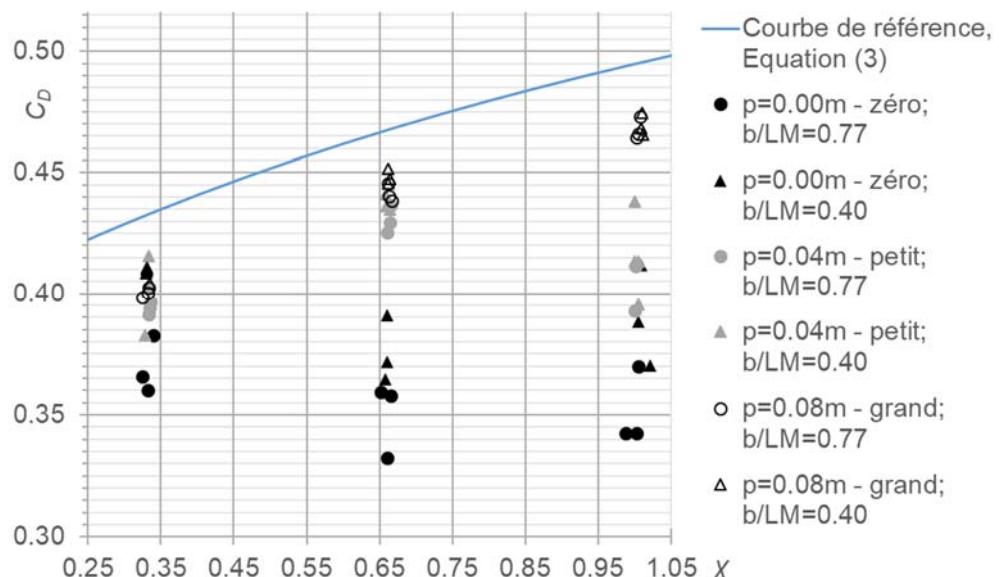


Figure 49. Coefficients C_D en fonction de χ pour les 3 têtes de piliers différentes.

L'effet positif de la tête de pilier dans le réservoir est lié à la charge H (sans bois flottants) exprimée par p/H .

Le facteur η est défini comme :

$$\eta \leq \frac{C_D \text{ (avec bois)}}{C_D \text{ (sans bois)}} \quad (9)$$

Il s'agit du coefficient du déversoir mesuré avec des bois flottants divisé par la valeur de référence calculée sans bois flottants (Vischer et Hager, 1999).

La Figure 50 représente le facteur p/H en fonction de η . On observe que l'effet d'un blocage complet dans les conditions extrêmes testées ici est absent si $p/H > 0.30$ à 0.35. Il faut préciser que dans ce domaine, lorsque $\eta \rightarrow 1$, on se trouve dans le mode de fonctionnement sans limitation par les bois flottants.

Les valeurs C_D mesurées ici sans bois flottants sont légèrement inférieures aux valeurs calculées selon Vischer et Hager (1999), de sorte que η ne peut atteindre avec précision 1. Si l'on prend les valeurs mesurées de C_D au chapitre 3.3.3 comme référence, au lieu de celles de Vischer et Hager (1999), alors $\eta=1$, preuve que l'effet du blocage est absent lorsque $p/H > 0.30$ à 0.35.



L'effet hydraulique suggéré de cette contre-mesure, à savoir que le blocage des bois flottants situé contre les piliers est éloigné de la section d'écoulement critique semblerait se confirmer dans les conditions testées ici ; les bois flottants ne gêneraient l'écoulement lorsqu'ils seraient éloignés de la crête du déversoir.

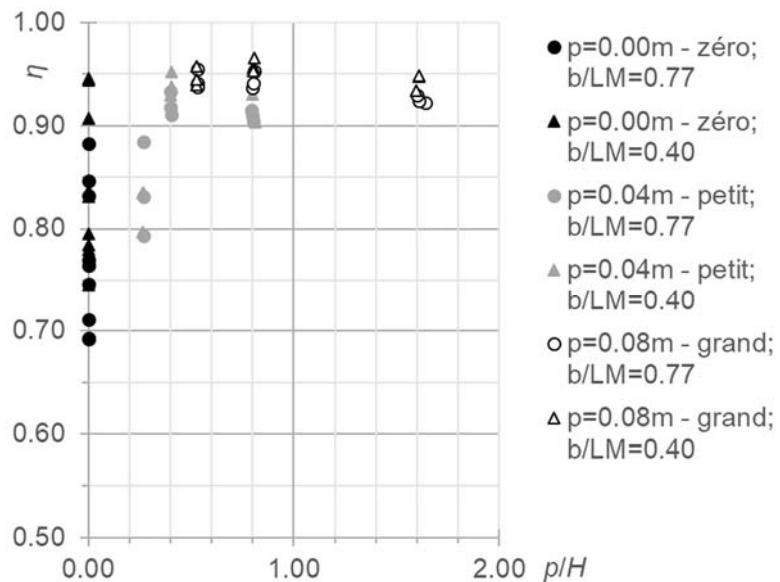


Figure 50. Facteur p/H en fonction de η avec variation de la position de la tête des piliers.

4.3.2 Déversoir sans piliers

Condition limite

Dans ce chapitre, tous les piliers au déversoir ont été supprimés. La Figure 51 montre la configuration testée.



Figure 51. Configuration testée pour le déversoir sans piliers.



Les paramètres suivants sont pris en compte pour cette analyse :

- La largeur du déversoir est égale à la largeur totale du modèle physique, c'est-à-dire que $b=B=1.50$ m. En d'autres termes, la condition est $b/L_M=3.46$.
- Les trois volumes de bois flottants 1V, 2V et 4V ont été testés.
- Les essais 70 à 89 sont étudiés dans ce chapitre (Tableau 4).

La procédure d'essai a dû être modifiée, puisqu'un blocage complet ou partiel ne pouvait être maintenu que dans le cas des plus petits débits. Ce dernier a donc été augmentée par très petits pas (environ $Q=0.005$ m³/s chacun), jusqu'aux valeurs pour lesquelles tous les bois flottants ont passé la crête du déversoir. Les débits se sont élevés jusqu'à $Q=0.041$ m³/s seulement, pour des valeurs supérieures le déversoir c'est libéré.

Observations

Sans piliers, les troncs positionnés (horizontalement, comme la crête du déversoir) ne font face à aucun obstacle vertical, de sorte qu'un blocage est impossible. Les bois flottants ne touchent que la crête du déversoir orientée transversalement, du moins pour les petits débits. Les troncs se « posent » sur la crête du déversoir avec des faibles charges (Figure 52).

En augmentant par petits pas le débit, le tapis formé par les troncs à la surface de l'eau se rapproche du déversoir, jusqu'à le franchir entièrement. La Figure 53 montre le rapprochement du tapis avec l'augmentation du débit. A chaque pas d'augmentation du débit, un certain nombre de troncs franchissent le déversoir, jusqu'à ce que des troncs mieux enchevêtrés entre eux se bloquent contre la crête du déversoir.

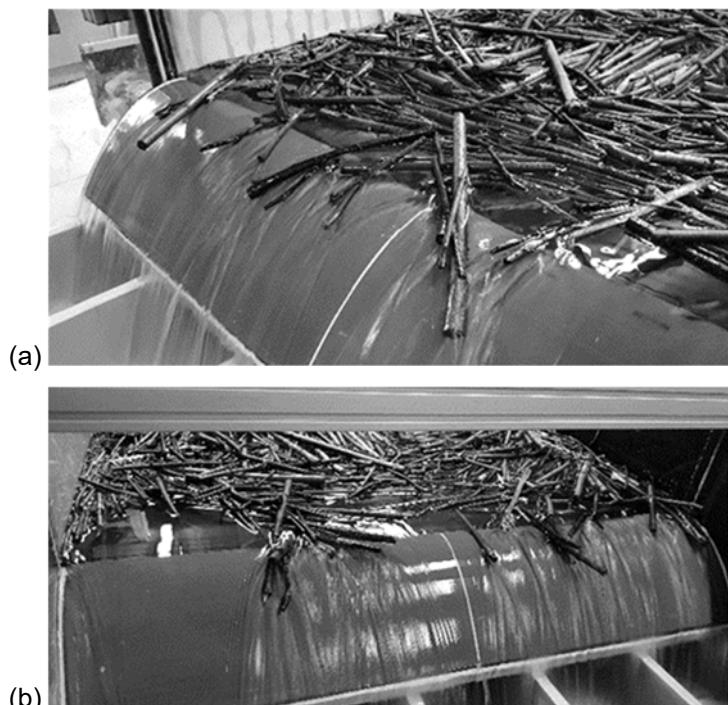


Figure 52. (a) Troncs posés sur la crête du déversoir (test 83), et (b) aucun obstacle vertical ne gêne les troncs (test 84).

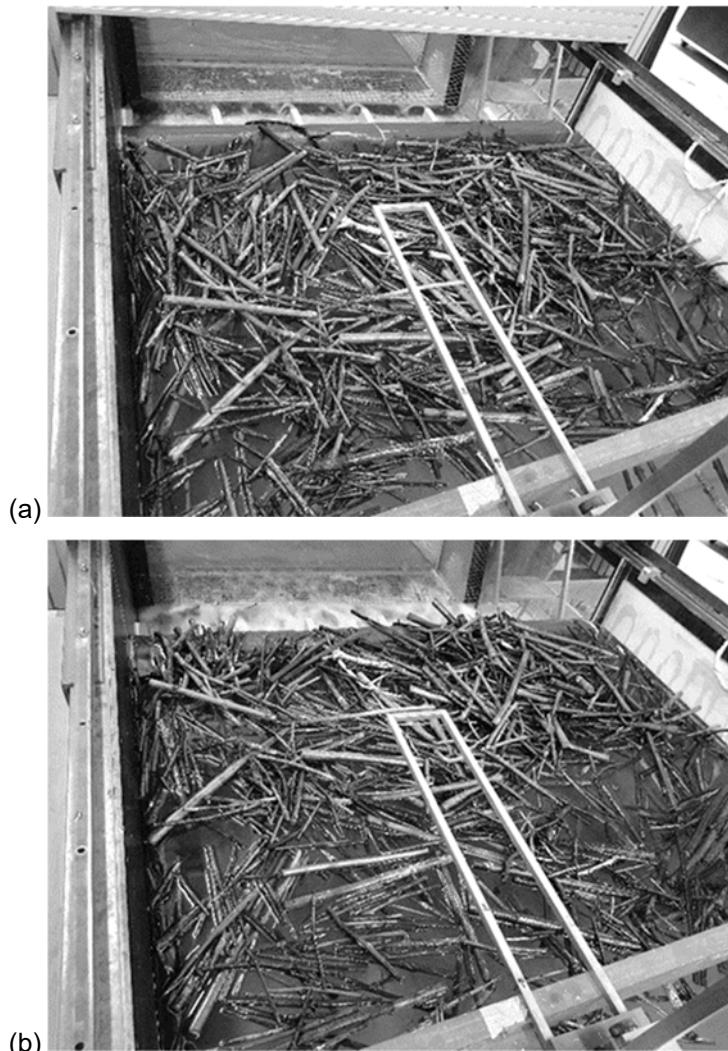


Figure 53. (a) Position du tapis (test 76), et (b) Le tapis se rapproche du déversoir avec l'augmentation du débit (test 79).

Courbe de tarage

La Figure 54 montre les coefficients du déversoir C_D obtenus en fonction de χ . On constate que l'efficacité au déversoir est réduite tant qu'il y a des bois flottants retenus à l'arrière dans le réservoir ($\chi < 0.35$ environ). Lorsque l'ensemble du tapis franchit le déversoir ($\chi > 0.35$ environ), les essais se sont interrompus et on suggère que la capacité de décharge de l'évacuateur de crue n'est plus entravée (et correspond alors à la courbe de référence).

Trois comportements des bois flottants peuvent être identifiés : blocage complet pour les plus petits débits, blocage partiel pour les petits débits et passage total des bois flottants sous des débits légèrement plus élevés. Le coefficient C_D de la crête complètement ou partiellement bloquée s'est comporté comme suit :

- La valeur C_D est nettement réduite tant qu'il y a un blocage, jusqu'à environ $\chi < 0.25$ à 0.35.
- Pour les débits plus importants (valeurs plus élevées de χ , en gris foncé), les bois flottants passent et la valeur C_D se rapprocherait de celle de la crête libre (Vischer et Hager, 1999).



Pfister et al. (2013) ont montré que la probabilité de blocage de bois flottants sur les déversoirs à touches de Piano est liée au rapport entre le diamètre D_M maximum des troncs et la charge au déversoir H .

La Figure 55 montre donc le coefficient normalisé η , selon l'équation (9), versus D_M/H . Comme dans Pfister et al. (2013), trois régimes sont visibles :

- Blocage complet pour $D_M/H > 0.60$ avec $\eta \approx 0.75$ à 0.80 (blanc sur la figure)
- Blocage partiel pour $0.35 \leq D_M/H \leq 0.60$ avec $\eta \approx 0.80$ à 0.85 (gris clair sur la figure)
- Un déversoir libre sans blocage pour $D_M/H < 0.35$ avec $\eta \rightarrow 1$ (gris foncé sur la figure)

Il est à noter que Pfister et al. (2013) ont indiqué des limites presque similaires de $D_M/H < 0.35$ pour une probabilité de blocage de 0 et de $D_M/H > 1$ pour une probabilité de blocage de 1.

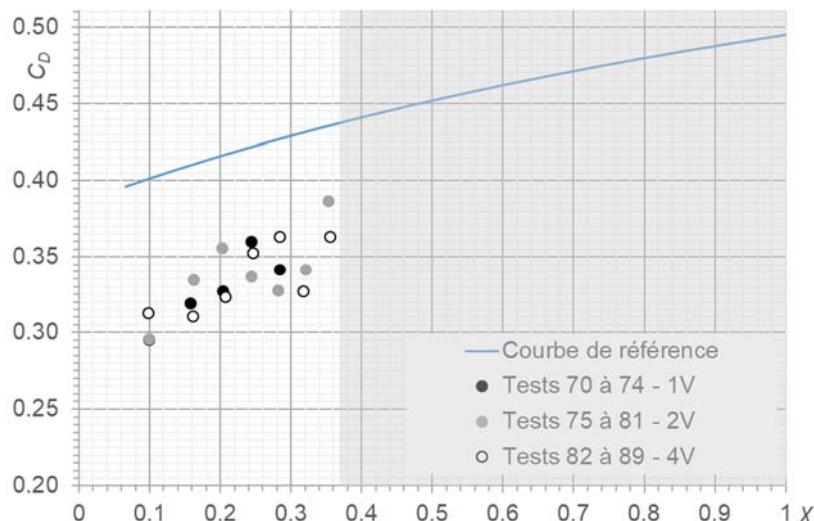


Figure 54. Coefficients du déversoir C_D obtenus en fonction de χ pour un déversoir sans piliers.

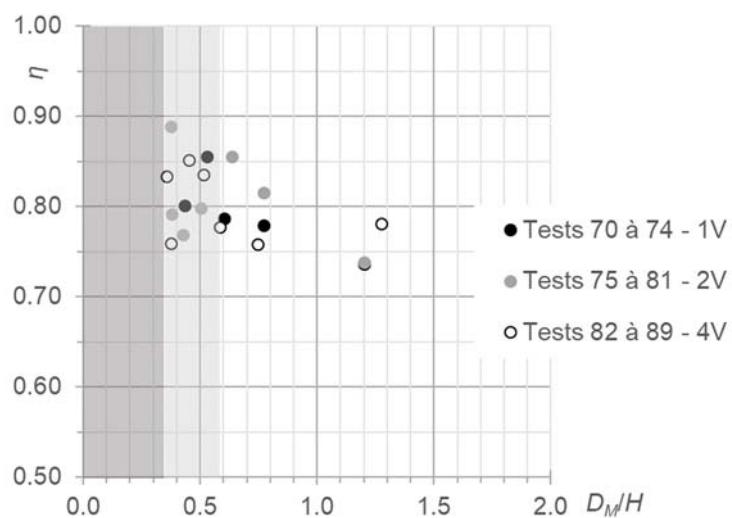


Figure 55. Facteur D_M/H en fonction de η pour un déversoir sans piliers.



4.3.3 Mise en place d'un râtelier

Condition limite

Un râtelier a été placé en l'amont du déversoir (Figure 17). Le râtelier est constitué de barres circulaires de 0.04 m de diamètre qui prennent place devant les piliers soit (1) de manière « complète » (Figure 27a), soit (2) de manière « partielle » (Figure 27b). L'espacement axial entre les barres est de b , étant donné que les piliers ont le même diamètre. Cet élément a les propriétés suivantes :

- Le râtelier se situe à $0.5b$ en amont de la crête du déversoir.
- Deux largeurs de passes sont testées, à savoir $b=0.175$ m ou 0.335 m (correspondant à $b/L_M=0.40$ ou 0.77).
- Les têtes des piliers se trouvent à fleur du déversoir $p=0.00$ m.

Râtelier complet :

- Une barre devant chaque pilier, donc espacement transversal de b .
- Le débit est exprimé par χ , avec trois paliers $\chi=1/3$, $2/3$ et $3/3$.
- Le volume de bois flottants varie entre $1V$, $2V$ et $4V$.
- Essais 90 à 98 et 118 à 120 (Tableau 5).
- Ce râtelier agit de la manière que la tête des piliers prolongées en amont dans le réservoir (effet identique comme pour les têtes de piliers prolongées dans le réservoir).

Râtelier partiel :

- Une barre devant chaque deuxième pilier, donc espacement transversal de $2b$.
- Le débit est exprimé par χ et varie entre 0.17 et 1.02.
- Le volume de bois flottants testé est de $4V$. Les essais effectués pour le râtelier complet ont montré que la variation du volume de bois flottants n'a aucun effet significatif, c'est pourquoi les essais avec le râtelier partiel ont été effectués seulement avec le plus grand volume de bois flottants.
- Essais 99 à 117 (Tableau 5).
- Il est suggéré que cette disposition favorise la rotation des bois flottants dans le réservoir, de sorte que les troncs pourraient éventuellement passer la crête du déversoir sans se bloquer et de provoquer une élévation importante du niveau du réservoir.
- La méthodologie des essais est différente ; le débit est augmenté progressivement par palier ($Q=0.01$ à 0.02 m³/s).

Les barres sont donc relativement massives (comparée avec un râtelier construit), mais cette disposition permet une comparaison directe des résultats actuels avec ceux des piliers en surplomb.

Observation

Pour le râtelier « complet », les observations sont similaires à celles du prolongement de la tête des piliers dans le déversoir (chapitre 4.3.1). Les troncs sont venus s'appuyer contre les barres du râtelier. Les premiers troncs bloqués se retrouvent éloignés de la crête du déversoir (Figure 56a), ce qui laisse un espace pour l'écoulement de l'eau qui pourrait être moins perturbé.



Pour le râtelier « partiel », les troncs n'ont pas pivoté autour des barres et ne donc pas franchit le déversoir. Des troncs se sont retrouvés bloqués dans les passes (Figure 56b) et ils ont gêné l'écoulement de l'eau. Le tapis de bois flottants est trop compact pour permettre à chaque tronc de s'orienter de manière individuelle dans le sens du courant.

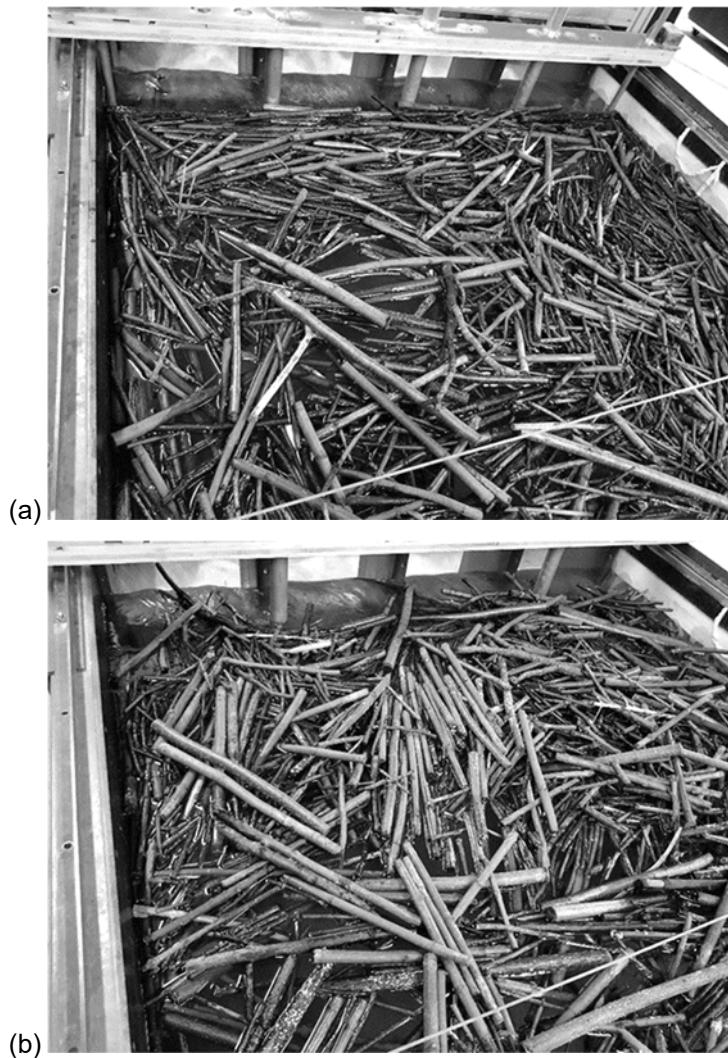


Figure 56. (a) Troncs bloqués contre le râtelier (a) complet (test 98), et (b) partiel (test 111).

Courbe de tarage

La Figure 57 représente les coefficients C_D mesurés en fonction de χ qui sont comparé à la courbe de référence sans bois flottants en bleu (Vischer et Hager, 1999) :

- En jaune ; pour un râtelier complet et une largeur des passes $b/L_M=0.77$
- En gris ; pour un râtelier complet et une largeur des passes $b/L_M=0.40$
- En vert ; pour un râtelier partiel et une largeur des passes $b/L_M=0.77$
- En orange ; pour un râtelier partiel et une largeur des passes $b/L_M=0.40$



On constate qu'avec un râtelier « complet », l'efficacité du déversoir n'est pas perturbée. Pour le râtelier « partiel », l'efficacité au déversoir partiellement semble perturbée.

Râtelier complet

Les essais effectués ont montré que les bois flottants n'avaient aucun effet sur la capacité de décharge, de sorte que des valeurs de C_D correspondantes à celles d'une opération libre sans bois flottants ont été atteintes. Cette analyse est semblable au niveau des résultats à celle des essais concernant les têtes des piliers prolongées dans le réservoir. Il faut souligner que le râtelier est positionné à $0.57 \leq (0.5b/H) \leq 3.35$, soit beaucoup plus en amont (dans le réservoir) que la distance minimale de $p/H > 0.30$ à 0.35 requise pour une opération sans influence dans le contexte du prolongement des piliers dans le réservoir (chapitre 4.3.1). Encore une fois, H fait référence ici à la charge hydraulique non perturbée selon Vischer et Hager (1999).

Râtelier partiel

Pour cette configuration, le râtelier a été positionné à $0.58 \leq (0.5b/H) \leq 6.76$, soit de nouveau plus en amont que la distance minimale $p/H > 0.30$ à 0.35 nécessaire pour un fonctionnement libre dans le cadre des piliers avec une tête prolongée. Les résultats des essais avec le râtelier partiel ne sont pas homogènes. La présence de bois flottants a réduit partiellement et seulement légèrement la capacité de décharge. Quelques troncs se sont appuyés contre la tête du pilier où la barre de râtelier était absente, et ont ainsi atteint la zone d'écoulement critique sur la crête du déversoir, affectant la capacité du déversoir.

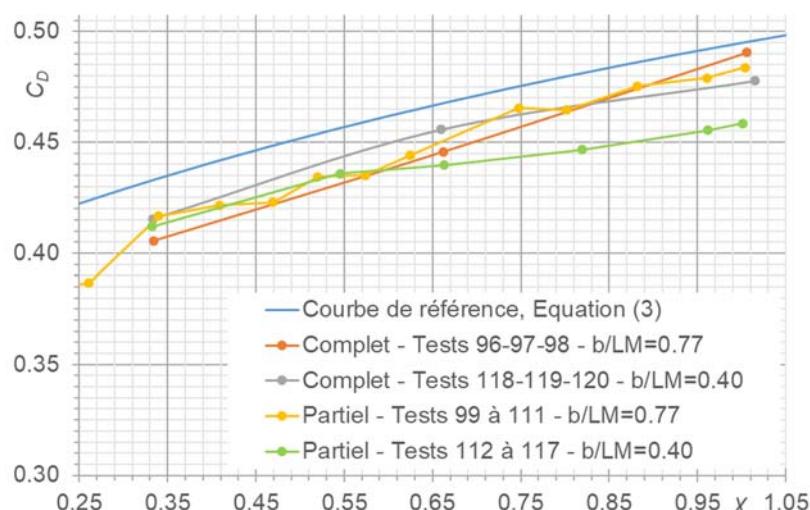


Figure 57. Coefficients du déversoir C_D obtenus en fonction de x pour les tests avec un râtelier.

Pas de rotations systématiques des troncs dans le sens du courant, combinée à leur passage dans le déversoir ont été observées. Cela est éventuellement dû au mécanisme d'approvisionnement en bois flottants choisi ici, où le volume total a été fourni en un seul lot.

Nous supposons qu'un râtelier partiel serait plus efficace s'il peut effectivement faire tourner les troncs.

- Cela implique une occurrence de bois flottants en continu et en petits lots de cinq troncs par exemple. Les troncs se bloquent ainsi moins entre pairs.



- Le râtelier est à positionner plus en amont du déversoir que le présent. Les troncs ne touchent donc pas les piliers quand ils sont en train de tourner.

Une étude systématique de ces hypothèses ne peut pas être inclus dans les travaux actuels.



5 Application au cas de Palagnedra

5.1 Hypothèses

Pour le contexte de l'incident au barrage de Palagnedra nous nous référons au chapitre 2.2.1.

Les hypothèses suivantes ont été prises en considération :

- La hauteur du pont au-dessus du déversoir est de 3.00 m (Boes et al., 2017). Le pont est représenté de manière schématique (manque d'information).
- Le débit de dimensionnement du déversoir est fixé à $Q_D=450 \text{ m}^3/\text{s}$ (Boes et al., 2017). Pour modéliser la charge correspondante sans bois flottants, le coefficient du déversoir C_D (valeur de dimensionnement, $\chi=1$) a été évalué à $C_D=0.495$ selon l'équation 3.
- Le débit de la crue a été estimé à $Q=2'000 \text{ m}^3/\text{s}$ (Boes et al., 2017). Par simplification, le coefficient du déversoir C_D a été également évalué à $C_D=0.495$, pour connaître le niveau d'eau sans bois flottants. L'augmentation théorique légère de C_D pour $\chi>1$ a été ignorée. La charge (et donc le niveau de la retenue) est supérieure au niveau du pont pour Q (Figure 58), mais la perturbation qu'il crée sur l'écoulement n'a pas été considérée explicitement.
- Pour déterminer la charge avec des bois flottants, le coefficient C_{DD} recommandé ($C_{DD}=0.352$) selon l'équation (5) a été pris en compte.
- En plus de la charge avec bois flottants, une épaisseur verticale de 1.80 m du tapis boisé en-dessus du niveau d'eau a été rajoutée. Cette épaisseur est issue des observations réalisées sur le modèle réduit (Equation 8). Cette épaisseur est un rapport entre les dimensions de l'évacuateur de crue de Palagnedra et celui du modèle réduit.

5.2 Charges

La Figure 58 montre les différents niveaux de la charge au déversoir, obtenus par calculs.

La charge qui est fonction du débit de dimensionnement ($Q_D=450 \text{ m}^3/\text{s}$) se trouve en-dessous du pont.

La surélévation du plan d'eau créée par les bois flottants se situe également juste sous le pont.

L'épaisseur du tapis de bois flottants est supérieure à la côte du pont, et contribuera donc à un blocage comme le font les piliers.

On constate que le niveau d'eau relatif au débit de crue ($Q=2'000 \text{ m}^3/\text{s}$) est déjà supérieur à la côte du pont. Le niveau d'eau dû à la surélévation avec bois flottants est encore plus haut que le pont.

L'addition du tapis de bois flottants montre, finalement, que celui-ci passe par-dessus le pont, comme les photos (Figure 1a, Figure 11b) de l'évènement le présentent.

5.3 Interprétation

Si le débit de dimensionnement Q_D était uniquement arrivé, la crue se serait déroulée selon nos résultats sans problème majeur. En effet, même avec la surélévation causée par les bois flottants, le niveau d'eau serait toujours légèrement inférieur à celui du pont, en cas de blocage complet par des bois flottants. Le tapis de bois flottants se bloquerait contre les piliers et le pont.

Pour un débit de crue extrême de $Q=2'000 \text{ m}^3/\text{s}$, l'évacuateur de crue est sous-dimensionné. Même sans occurrence de bois flottants, l'écoulement touche le pont. Certes, les bois flottants créeraient une surélévation supplémentaire mais pas déterminante pour provoquer des conséquences dans les



environ. Les images prises après la crue montrent un volume extrême de bois flottants bloqués au barrage, même sur le pont. Cela converge avec les calculs mentionnées (Figure 58).

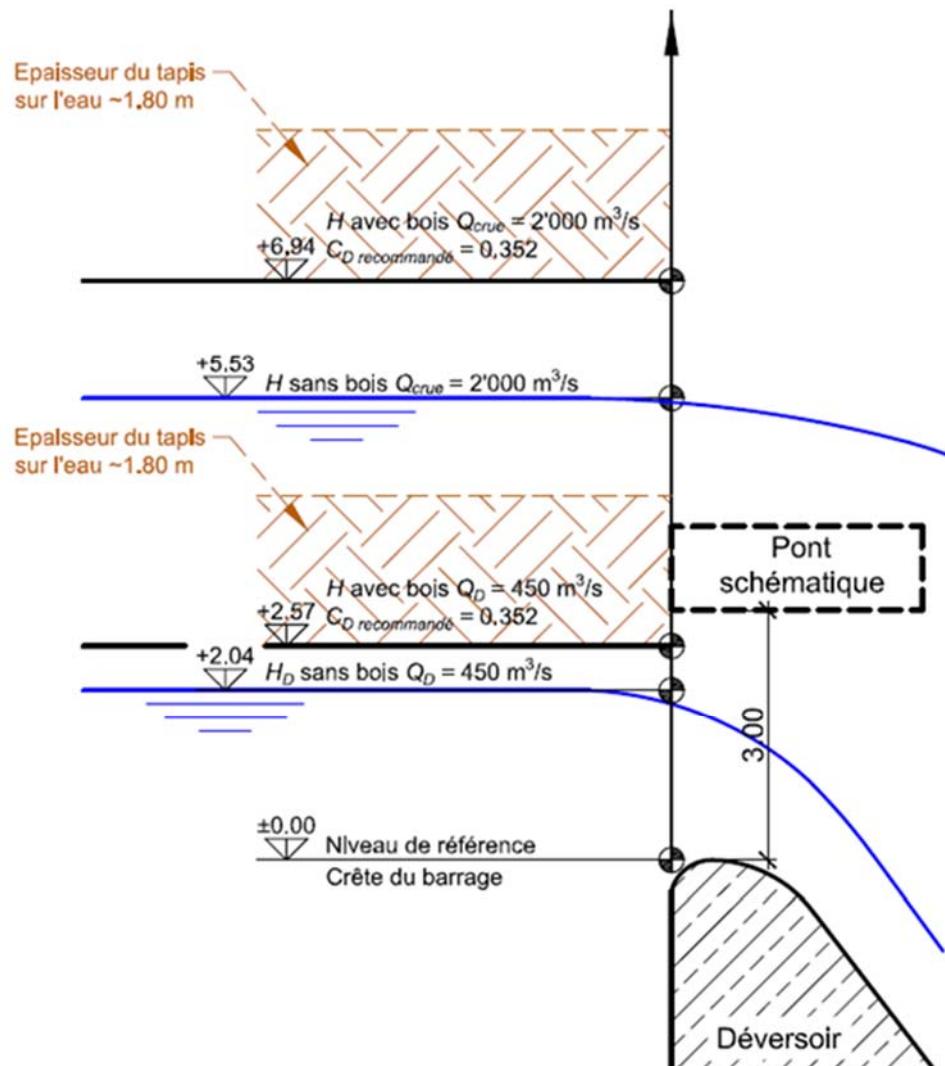


Figure 58. Différents niveaux de charges calculés sur le barrage de Palagnedra.



6 Conclusions

6.1 Contexte

Les barrages sont des structures indispensables à la civilisation moderne, car ils fournissent entre autres de l'eau pour l'irrigation et la production d'électricité. Cependant, ils peuvent constituer une menace s'ils ne sont pas conformément dimensionnés et opérés.

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. Mais, ils ne doivent pas augmenter la probabilité de rupture du barrage.

Bien que les connaissances sur l'effet des bois flottants aient augmenté ces dernières années, le risque engendré par le blocage complet de l'ouvrage d'entrée d'un évacuateur de crue n'a guère été approfondi. Sur la base d'observations in situ et de la littérature, la largeur des passes des évacuateurs de crue et le volume de bois flottants apparaissent fréquemment comme paramètres déterminants.

Le présent rapport s'intègre dans une étude confiée par l'OFEN. Il examine sur la base d'essais sur modèle réduit ce blocage et ses conséquences. Plus précisément, les bois flottants sont introduits en amont du déversoir de l'évacuateur de crue et leur blocage ainsi que l'augmentation subséquente du niveau du réservoir sont étudiés. Un accent particulier est mis sur les événements extrêmes en termes d'occurrence de bois flottants et de débit.

6.2 Modèle physique

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 PL-LCH à L'EPFL. Un déversoir standard est situé transversalement à l'aval du canal, au vu de sa fréquente utilisation in situ. La maquette offre, par sa conception, une grande flexibilité dans le positionnement des piliers, de la régulation du débit et du volume 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 les études de Bezzola et Hegg (2007) et Rickli et Hess (2009). 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 0.433 m, ce qui correspond en réalité à des dimensions entre 3.50 m et 15.20 m pour un facteur d'échelle de 35. Les volumes de bois flottants considérés sont composés entre 710 troncs et 2'840 troncs. Cela représente un très grand volume testé, étant considéré l'approche combinant des crues extrêmes avec des volumes de bois flottants extrêmes.

6.3 Essais sans mesures au déversoir

Un déversoir standard avec des piliers (vannes complètement ouvertes pour faire passer le débit de dimensionnement) a été installé dans le modèle, et les trois paramètres suivants ont été variés de manière systématique :

- 3 paliers de débit (le dernier palier correspond au débit de dimensionnement du déversoir).
- 3 volumes de bois flottants différents (1V, 2V et 4V).



- 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).

Une analyse statistique sur la répétition de tests identiques pour identifier la signification statistique des résultats de la valeur de C_D a montré que l'écart maximal par rapport à la valeur moyenne des mesures effectuées est inférieur à $\pm 2\%$. Une erreur absolue inférieure à 4% semble acceptable, de sorte que les autres essais ne sont effectués qu'une seule fois, sans répétition.

Lors des essais, il a été constaté que les premiers troncs se bloquent contre les piliers de l'évacuateur de crue. Les troncs qui arrivent ensuite au déversoir prennent place dans le réservoir sous la forme d'un tapis, lorsque le blocage est stable et complet. En effet, tous les troncs ne peuvent pas se disposer contre les piliers du déversoir, il n'y a pas assez de place. Les troncs au niveau de la crête du déversoir gênent l'écoulement. Le solde du volume reste dans le réservoir, dès que le maximum de troncs s'est placé contre l'évacuateur de crue, ce qui explique la diminution de la capacité de décharge et la tendance vers une constante.

Une valeur typique du C_D obstruée a pu être mise à disposition des maîtres d'ouvrages, afin qu'ils puissent estimer la surélévation de leur retenue dans le cas d'un blocage complet. Lorsqu'un volume de bois flottants « déterminant » obstrue un évacuateur de crue, l'efficacité du déversoir est réduite et le coefficient du déversoir C_D s'approche d'une constante.

La charge hydraulique au déversoir avec un volume de bois flottants « déterminant » bloqué s'élève en moyenne à 114% comparé à la charge hydraulique correspondante sans bois flottants, et au maximum à 121%.

Le coefficient C_D sous un blocage déterminant vaut en moyenne 0.373, au minimum 0.332 et au maximum 0.412. L'écart-type σ s'élève à 0.021. Un coefficient C_D moyen en soustrayant l'écart-type σ pourrait être utilisé, au vu de la dispersion des valeurs relativement faible. Le coefficient recommandé vaudrait alors $C_{DD}=0.352$, lorsque le déversoir est totalement obstrué. Ce coefficient s'applique jusqu'au débit de dimensionnement et pour un déversoir complètement bloqué avec des piliers. La comparaison du déversoir bloqué avec la courbe de tarage sans bois flottants (Hager et Vischer, 1999) indique l'augmentation supplémentaire du niveau du réservoir due au blocage.

6.4 Essais avec mesures au déversoir

Tête des piliers prolongées dans le déversoir

La position de la tête des piliers p dans le réservoir a été modifiée dans le but de réduire la perte d'efficacité au déversoir constatée précédemment. La section obstruée est ainsi éloignée de la section critique du déversoir déterminant le débit. La valeur p dans le modèle est égale à $p=0.00$ m « zéro » ; à $p=0.04$ m ; « petit » ; ou à $p=0.08$ m « grand ». Le surplomb de la tête du pilier p par rapport à la charge hydraulique sans bois flottants H correspond au facteur p/H , compris entre 0 et 1.64.

Les premiers troncs bloqués se retrouvent éloignés de la crête du déversoir avec des piliers dont la tête est prolongée en amont dans le réservoir. Les données ont mis en évidence un effet positif évident du prolongement de la tête du pilier p dans le réservoir. Plus il est grand, moins le C_D est affecté par les bois flottants bloqués.

Les expériences suggèrent que l'effet d'un blocage complet dans les conditions extrêmes testées ici est absent si $p/H>0.30$ à 0.35.

Aucun pilier au déversoir

Les piliers au déversoir ont été supprimés, la largeur est égale à la largeur totale du modèle, c'est-à-dire que $b=B=1.50$ m.



Sans piliers, les troncs positionnés horizontalement ne font face à aucun obstacle vertical, de sorte qu'un blocage est impossible. Les bois flottants ne touchent que la crête du déversoir orientée transversalement, du moins pour les petits débits. On a constaté que l'efficacité au déversoir est réduite tant qu'il y a des bois flottants retenus en amont du déversoir lors des débits très faibles. Lorsque l'ensemble du tapis franchit le déversoir, les essais se sont interrompus et on suggère que la capacité de décharge de l'évacuateur de crue n'est plus entravée.

La valeur C_D est nettement réduite tant qu'il y a un blocage, jusqu'à environ $\chi < 0.25$ à 0.35. Pour les débits plus importants (valeurs plus élevées de $\chi = H/H_D$), les bois flottants passent et la valeur C_D se rapprocherait de celle du déversoir libre (Vischer et Hager, 1999).

L'efficacité au déversoir peut être liée au rapport entre le diamètre D_M maximum des troncs et la charge au déversoir H . Ainsi, le blocage est complet pour $D_M/H > 0.60$ avec une efficacité de C_D réduite. Le blocage est partiel pour $0.35 \leq D_M/H \leq 0.60$ et le déversoir est libre sans blocage pour $D_M/H < 0.35$ avec aucun effet sur l'efficacité au déversoir.

Mise en place d'un râtelier

Un râtelier a été placé à l'amont devant le déversoir. Le râtelier est constitué de barres circulaires de 0.04 m de diamètre qui prennent place devant les piliers soit (1) de manière « complète », soit (2) de manière « partielle ».

Pour le râtelier « complet », les observations ont été similaires à celles du prolongement de la tête des piliers dans le déversoir. Pour le râtelier « partielle », les troncs n'ont pas pivoté autour des barres comme cela a été souhaité. Des troncs se sont retrouvés bloqués dans les passes et ils ont généré l'écoulement de l'eau.



7 Publications

1. Bénet, L., De Cesare, G., Pfister, M. Reservoir level rise under extreme driftwood blockage at ogee crest. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE [soumis le 18.09.2019, under review].
2. Bénet, L., De Cesare, G., Pfister, M. Effet des bois flottants bloquant un évacuateur de crue sous des conditions extrêmes. *Wasser Energie Luft* [annoncé au SWV].
3. Une « contribution brève des participants » sur le sujet est annoncé au SWV pour le symposium CIPC 2020 *Gestion des bois flottants sur les cours d'eau*, 21.01.2020, Olten.

8 Notation

b	largeur d'une passe [m]
B	largeur du canal [m]
C_D	coefficient du déversoir [-]
C_{DD}	coefficient du déversoir recommandé [-]
D	diamètre des troncs [m]
E	extension horizontale du tapis formé par les bois flottants, perpendiculaire à l'axe du déversoir [m]
F	hauteur maximale de blocage verticale (au-dessus de la surface du niveau d'eau du réservoir) des bois flottants à l'amont des piliers [m]
g	accélération de la gravité [m/s^2]
H	charge du déversoir [m]
h_c	hauteur d'écoulement critique [m]
H_D	charge de dimensionnement du déversoir [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 [-]
Q	débit [m^3/s]
q	débit unitaire [m^2/s]
R	coefficient de détermination [m]
U	vitesse d'écoulement dans le canal / réservoir [m/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 [-]
λ	facteur d'échelle géométrique [-]
ρ	densité de l'eau [kg/m^3]



9 Bibliographie

- 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.
- Boes, R.M., Bühlmann, M., Hochstrasser, H., Kolly, J.-C., Lauber, G., Monney-Ueberl, J., Pfister, M., Radogna, R., Schmocke, L., Stucki, A., Urso, F. (2017). Schwemmgut an Hochwasserentlastungsanlagen (WHE) von Talsperren. *Bericht des Schweizerischen Talsperrenkomitees STK über den Stand der Schwemmgutproblematik an Talsperren*, Zürich.
- 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.
- 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.
- Godtland, K., Tesaker, E. (1994). Clogging of spillways by trash. Proc. Intl. Conf. ICOLD, Durban, Q68, R36, 543-557.
- Gschnitzer, T., Gems, B., Aufleger, M., Mazzorana, B., Comiti, F. (2015). On the evaluation and modelling of wood clogging processes in flood related hazards estimation. Porc. *Engineering Geology for Society and Territory*, Vol. 3, 139-142. Springer Berlin.
- 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). Disturbances. *Operational Safety of Dams and Reservoirs*, chapter 7, 173-219, ICE London.
- Hartlieb, A. (2012a). Modellversuche zur Verklausung 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.
- Lange, D., Bezzola, G.R. (2006). Schwemmholz, Probleme und Lösungsansätze. *VAW Mitteilung* 188, ETH Zürich.
- Lyn, D., Cooper, T., Yi, Y.-k. (2003). Debris Accumulation at Bridge Crossings: Laboratory and Field Studies. *Technical report*, Joint Transportation Research Program, West Lafayette, Indiana.
- Möller, G., Weitbrecht, V., Nussle, D. (2009). Matteschwelle Bern – Erkenntnisse zur Hochwassersicherheit aus hydraulischen Modellversuchen. *Wasser Energie Luft* 101(2), 83-88.



- 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., Ribi, J.-M. (2020). Les modèles réduits des ouvrages particuliers dans les réseaux de canalisations. *Séminaire Hydraulique des Canalisations*, VSA, HEIA-FR, Fribourg.
- Pfister, M., Tullis, B., Schleiss, A.J. (2015). Closure to Debris blocking sensitivity of Piano Key weirs under reservoir type approach flow. *Journal of Hydraulic Engineering* 141(10), 07015013.
- Rickenmann, D. (1997). Sediment transport in Swiss torrents. *Earth Surface Processes and Landforms*, 22(10):937–951.
- 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., Piégay, H., Gurnell, A. M., Marston, R. A., Stoffel, M. (2016b). Recent advances quantifying the large wood dynamics in river basins: New methods and remaining challenges. *Reviews of Geophysics*, 54(3), 611-652.
- Schalko, I., Schmocke, L., Weitbrecht, V., Boes, R.M. (2019). Gefahrenbeurteilung von Schwemmholzverklausungen in Flüssen: Teil 2 - Aufstau. *Wasser Energie Luft* 111(2), 69-75
- Schalko, I., Schmocke, L., Weitbrecht, V., Boes, R.M. (2018). Backwater rise due to large wood accumulations. *Journal of Hydraulic Engineering* 144(9), 04018056.
- Schmocke, L., Hager, W.H. (2013). Scale modelling of wooden debris accumulation at a debris rack. *Journal of Hydraulic Engineering* 139(8), 827-836.
- Schmocke, 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.
- Vischer, D.L., Hager, W.H. (1999). *Dam Hydraulics*. John Wiley & Sons, Chichester, US.
- 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.