

**Zeitschrift:** Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria  
**Herausgeber:** Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband  
**Band:** 114 (2022)  
**Heft:** 4

**Artikel:** Force imposée sur un râtelier en amont d'un évacuateur de crue par des bois flottants, et concept pour favoriser le passage des bois flottants  
**Autor:** Pfister, Michael / Bénét, Loïc / De Cesare, Giovanni  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1008203>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 24.03.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Force imposée sur un râtelier en amont d'un évacuateur de crue par des bois flottants, et concept pour favoriser le passage des bois flottants

Michael Pfister, Loïc Béné, Giovanni De Cesare

## Résumé

L'obstruction de l'évacuateur de crue d'un barrage par des bois flottants peut réduire sa capacité hydraulique. Pour limiter cet effet, un râtelier peut être installé pour retenir les bois en amont de la section critique d'écoulement. Sur la base d'une modélisation physique, la force appliquée par les bois contre des râteliers a été mesurée. Deux types de râteliers (complet et partiel) et plusieurs positions ont été testées dans des conditions extrêmes (débits et volume de bois). La force maximale peut être exprimée sous forme d'un coefficient de traînée.

Jusqu'à présent, les bois flottants bloqués doivent être enlevés après les crues. Leur contribution écologique est absente dans le cours d'eau aval. Un râtelier partiel a été développé afin de favoriser le passage des bois en maintenant la capacité hydraulique. Plusieurs apparitions de bois flottants (du bois individuel au volume extrême) sont étudiées ainsi que le positionnement du râtelier. Les expériences montrent que le passage des bois individuels est augmenté avec un râtelier partiel pour des conditions bien définies.

## Zusammenfassung

Die Verklauung einer Hochwasserentlastungsanlage mit Schwemmholz kann ihre hydraulische Leistungsfähigkeit verringern. Zur Begrenzung dieses Effekts kann ein Rechen vorgesehen werden, welcher das Holz vor dem kritischen Abflussquerschnitt blockiert. Basierend auf physikalischen Modellversuchen wurde die Kraft gemessen, die vom Holz auf den Rechen ausgeübt wird. Unter extremen Bedingungen (Abfluss und Holzvolumen) wurden zwei Rechen (vollständig und aufgelöst) an mehreren Positionen getestet. Die maximale Rechenkraft kann mit dem Widerstandskoeffizienten ausgedrückt werden.

Bisher soll verklautes Schwemmholz nach einem Hochwasser entsorgt werden. Dessen ökologischer Wert fehlt dann im Unterlauf des Gewässers. Es wurde daher ein aufgelöster Rechen untersucht, der den Durchgang von Treibholz erleichtern und gleichzeitig die hydraulische Kapazität beibehalten soll. Mehrere Aufkommensarten von Schwemmholz (vom Einzelholz zu einem extremen Volumen) wurden untersucht sowie die Vorlagerung des Rechens. Die Experimente zeigen, dass der Durchgang einzelner Hölzer mit einem aufgelösten Rechen für gewisse Bedingungen gesteigert wird.

## 1. Introduction

Les cours d'eau sont des éléments importants du paysage et jouent un rôle clé dans la connexion des écosystèmes. La préservation des cours d'eau naturels est parfois en contradiction avec les besoins de la civilisation. Les bois flottants dans les cours d'eau illustrent ce conflit de manière exemplaire. Ils contribuent à la diversité de l'habitat aquatique. En même temps, il représente une menace potentielle pour les infrastructures.

L'accumulation de bois flottants au niveau de l'évacuateur de crue d'un barrage entraîne souvent une diminution de son efficacité. La capacité d'écoulement maximale peut être réduite, de sorte que le niveau du réservoir augmente de manière incontrôlée. Cela peut entraîner la submersion d'un barrage et, par conséquent, sa défaillance potentielle, ce qui serait inacceptable. Tout bassin versant boisé et aménagé est confronté à cette problématique.

Les trois mesures suivantes (Pfister et al., 2020) peuvent limiter l'augmentation du

niveau dans le réservoir à la suite de la présence de bois flottants: (1) la prolongation de la tête des piliers en amont du barrage, ce qui crée des embâcles juste en amont du barrage et libère ainsi la section critique (régulant le débit); (2) l'enlèvement des piliers afin de ne pas permettre aux bois flottants la possibilité de s'accumuler; et (3) la mise en place d'un râtelier en amont du barrage, à nouveau pour libérer la section critique.

Les mesures (1) et (3) présentées ci-dessus sont peu écologiques (et la mesure (2) est impossible en présence de vannes ou clapets), car les bois flottants retenus doivent être enlevés mécaniquement après la crue (art. 41 LEaux). En conséquence, ils ne peuvent plus servir à favoriser la diversité d'un écosystème dans le cours d'eau. L'utilité écologique du bois mort dans les cours d'eau est incontestée (Bulliard et Lauper, 2019), et le déficit typique est compensé à grands frais par des aménagements techniques en bois mort (Mende, 2018).

Sur la base des observations de Pfister et al. (2020), des essais de modélisation supplémentaires ont été réalisés avec un râtelier «partiel». Il doit garantir la sécurité en cas de crue et favoriser le passage partiel des bois flottants. Concrètement, cela signifie que les barres du râtelier partiel initient une rotation des bois flottants. Les bois flottants peuvent alors être évacués plus facilement entre les piliers situés en aval. Même si les bois flottants se bloquent au râtelier, le pilier de l'évacuateur de crue situé directement derrière est généralement exempt de bois flottants et la capacité d'écoulement n'est pas réduite de manière significative au niveau local. Si cela n'est pas acceptable, le râtelier partiel peut être combiné avec la prolongation des piliers en amont.

Les essais sur modèle montrent qu'en cas de faible volume de bois flottants (scénario fréquent), le râtelier partiel le fait passer plus facilement qu'un râtelier complet. En cas d'afflux important (scénario



rare), le râtelier est obstrué, mais avec des effets réduits sur la capacité d'évacuation.

Les râteliers sont soumis à de grandes forces lorsque les bois flottants les heurtent et – dans une phase ultérieure – lorsqu'un tapis entier de bois flottants s'appuie contre les râteliers. Les forces d'impact peuvent certes être déterminées à l'aide du théorème de l'impulsion, mais des paramètres tels que la durée de l'impact et l'élasticité du bois ont un effet réducteur sur les forces. Lors de l'estimation des forces résultant d'un tapis de bois flottants placé en amont et compacté, des approches de mécanique des fluides peuvent être formulées, mais avec quelques inconnues, comme le coefficient de traînée et la surface d'obstruction. Des nouveaux essais systématiques sur modèle réduit avec des bois flottants et une retenue en amont d'un évacuateur de crue ont permis de préciser ces paramètres.

La figure 1 montre les configurations étudiées sur le modèle réduit et définit les paramètres utilisés par la suite.

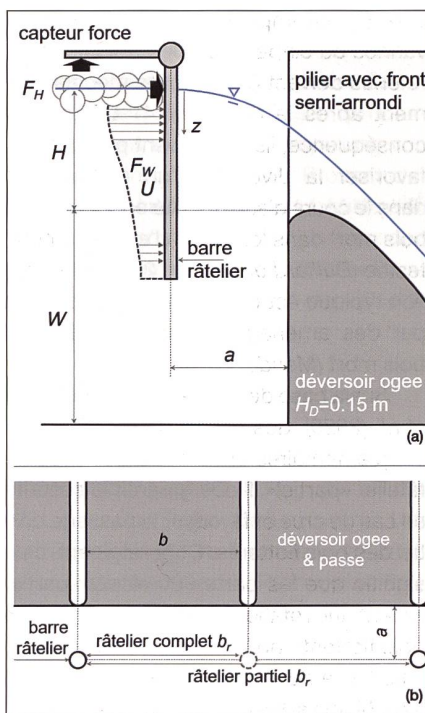


Figure 1 : Définition des paramètres : (a) coupe et (b) vue en plan.

## 2. Force imposée

Les barres de râtelier obstruées par de bois flottants sont soumises à d'importantes forces, en particulier dans le cas d'une obstruction totale et des vitesses d'écoulement élevées. Lors de l'estimation des forces dues à un tapis de bois flottants positionné en amont et appuyé, il est certes possible de formuler des ap-

proches de mécanique des fluides, mais jusqu'à présent avec de nombreuses inconnues, comme le coefficient de traînée et la surface d'obstruction.

La littérature est partiellement lacunaire et ne convient pas toujours à la conception statique des râteliers pour des conditions de bords variables. Elle contient, entre autres, les approches mentionnées ci-après :

- *Gippel et al. (1996)* se réfèrent au coefficient de traînée  $c_w = F / (0,5\rho U^2 LD)$  pour calculer la force  $F$  hydrodynamique stationnaire du râtelier avec une obstruction. Ici,  $LD$  est la surface d'obstruction des bois flottants (produit de la longueur  $L$  et du diamètre  $D$  des bois caractéristiques). Des barres prismatiques ainsi que d'autres éléments ont été testés et différents  $c_w$  ont été déterminés à cet effet. Selon les conditions testées, il s'ensuit des valeurs entre  $c_w = 0,4$  et  $1,2$  pour les écoulements lents, ce qui semble sans importance en raison de l'obstruction plutôt faible. Le coefficient de traînée avec obstruction peut être déterminé à l'aide d'une formule empirique en fonction du  $c_w$  « non influencé » et du degré d'obstruction. Une série de tests spéciaux a en outre montré que le  $c_w$  dépend également du nombre de Froude et de la profondeur d'écoulement, et peut atteindre même  $c_w = 5$  pour une combinaison extrême.
- *USCE (1997)* donne une approche pour le calcul des forces d'impact au fil de l'eau des différents éléments en bois. Pour l'essentiel, celles-ci sont assimilées au poids propre de l'élément.
- *NCHRP (2000)* donnent un aperçu des forces exercées sur les piles et caissons de pont sous l'influence de bois flottants et soulignent l'hétérogénéité des résultats. Ils montrent l'influence d'un ratio d'obstruction, qui ne peut toutefois être déterminé que dans des expériences sur modèle.
- L'impact dynamique maximal (enveloppe des forces mesurées dans le modèle) a été approximé par *Haehnel et Daly (2004)* avec  $F_M = 1550Um^{0,5}$ ,  $U$  étant la vitesse et  $m$  la masse du bois. La structure de la formule empirique est empruntée au théorème de l'impulsion et simplifiée. On constate à nouveau l'influence dominante de la vitesse d'écoulement, qui est plus élevée pour les râteliers en rivière que pour celle dans des retenues.
- *La FHWA (2005)* cite les études de *NCHRP (2000)*, se réfère à la force de calcul hydrodynamique stationnaire et

indique des valeurs pour  $c_w$  autour de  $1,8$ , ou comme fonction du nombre de Froude amont et de la position du râtelier.

- *Kälin et al. (2005)* conçoivent un « tronçon normalisé » et le font rebondir verticalement sur un champ de tôles. L'accent est mis sur le dimensionnement statique et non sur la position des éléments ou la force d'une obstruction de bois flottants.
- Des études sur l'impact et la résistance à l'écoulement résultant de la présence de bois flottants et de déchets de civilisation sont discutées, principalement pour les bâtiments, par *Nistor et al. (2017)* et *Wüthrich et al. (2020)*. Sur la base d'essais sur modèle réduit, ces études démontrent que la connaissance des « densités » d'obstruction est nécessaire pour décrire les forces. Il apparaît en outre que ce n'est pas l'impact des bois flottants du type « forest debris » qui constitue le cas de charge déterminant, mais la force hydrodynamique suite à l'écoulement et due à la réduction de la perméabilité de la section d'écoulement. Les auteurs indiquent, pour les bois flottants sans éléments en forme de conteneur (grands éléments de civilisation), un facteur de 2 en ce qui concerne la force sur le bâtiment, par rapport à la situation sans bois (eau pure).
- *Spreizer et al. (2019)* ont équipé des éléments en bois d'accéléromètres et les ont fait entrer en collision avec des obstacles dans un modèle physique. Lors de l'impact des éléments sur une pile de pont, ils ont mesuré des accélérations allant jusqu'à environ près de  $2g$ , et de près de  $4g$  lors de l'interaction avec la paroi du canal.
- *Majtan et al. (2021)* étudient à l'aide de simulations SPH les forces exercées par le bois flottant sur les ponts en arc à une seule travée. La présence de bois flottant augmente les forces, et peut notamment aussi détacher des pierres individuelles de la structure en les heurtant.

## 2.1 Expériences

Des expériences systématiques (*Bénet et al., 2022*) ont été effectués sur un canal d'essai de la PL-LCH (EPFL). Sa longueur est de  $10\text{ m}$ , sa largeur de  $1,50\text{ m}$  et la hauteur de  $0,70\text{ m}$ . À la fin du canal, un déversoir standard (ogee crest) est installé, avec des piliers mobiles pour étudier diverses configurations.

Un limnimètre ( $\pm 1\text{ mm}$ ) mesure le niveau d'eau dans le réservoir  $4\text{ m}$  en amont du déversoir. Le débit est enregistré par un débitmètre magnétique inductif (précision de mesure de  $\pm 0,5\%$  FS). Une jauge

de contrainte mesure la force appliquée contre le râtelier (TAS501M+SIC-A2, précision de mesure de  $\pm 0,1\%$  FS, fréquence d'acquisition 0,2Hz, moyenne sur 240 à 480 valeurs).

Le râtelier a été monté de manière pivotante et équipé d'une jauge de contrainte via un bras de levier (à droite sur la *figure 2*). La jauge de contrainte a été étalonné à l'aide de poids de référence précis. La force purement hydrodynamique du râtelier (eau uniquement, sans bois) a été mesurée systématiquement et validée à l'aide de valeurs tirées de la littérature. Ensuite, la force imposée par les bois flottants bloqués contre le râtelier a été mesurée pour deux types: (1) le râtelier complet (une barre avant chaque pilier), et (2) le râtelier partiel (une barre avant chaque deuxième pilier).

La caractéristique des bois flottants a été choisie selon *Rickli et Hess (2009)*. La présence de troncs de grande longueur est accentuée (conditions extrêmes). Au total, 2760 troncs et 80 souches composent le volume, répartis en neuf classes de longueur allant de 0,10 à 0,43m de long (avec un facteur d'échelle géométrique de 1:35; cela donne in situ de tailles entre 3,5 à 15,2m), pour un rapport longueur versus diamètre proche de 20.

La systématique des essais résulte des règles de l'art, des questions posées et de l'expérience. Au total, 108 essais ont été réalisés, composés de 54 configurations qui ont été testées deux fois chacune. En outre, la situation avec et sans bois a été mesurée afin que le coefficient de traînée à l'écoulement puisse être lu directement à partir du jeu de données.

Les essais ont consisté à faire varier systématiquement les débits (exprimés par la charge relative  $\chi = H_R/H_D$ , avec  $H_R$  étant la charge de référence sans bois et  $H_D$  la charge de dimensionnement du réservoir, ici  $H_D = 0,15m$ , *figure 1*), la largeur des passes  $b$ , l'avancée du râtelier  $a$  (positions 1 à 4, *chapitre 3.1*), le type de râtelier (complet ou partiel, l'écartement des barres est appelé  $b_r$  et vaut  $b_r = b$  pour le râtelier complet et  $b_r = 2b$  pour le râtelier partiel) et la quantité de bois flottants (sans bois, ainsi que sous la quantité de bois extrême avec 2840 éléments).

La procédure de test a été la suivante (*figure 3*):

a) Le système d'acquisition est opérationnel suffisamment long pour stabiliser les valeurs mesurées. À la fin de cette durée, la force « interne » est mesurée,

c'est-à-dire la force suite à l'excentricité de la construction sans autre influence extérieure. Celle-ci doit à chaque fois être déduite de toutes les autres forces.

- b) Le débit le plus faible ( $\chi = 0,33$ ) est maintenu pendant 20 min. On mesure la composante hydrodynamique, ainsi de l'eau uniquement.
- c) Le bois flottant est ajouté et réparti uniformément dans le canal.
- d) Le débit le plus faible ( $\chi = 0,33$ ) est à nouveau réglé et maintenu pendant 20 minutes. La force du bois et de l'eau est mesurée. Pour l'évaluation ultérieure, la composante de l'eau (de l'étape b) est soustraite de celle-ci.
- e) Le débit est réglé sur  $\chi = 0,67$  et maintenu pendant 20 min. On mesure la force du bois et de l'eau.
- f) Le débit est réglé sur  $\chi = 1$  et maintenu pendant 40 min afin que le signal se stabilise et que l'obstruction puisse se compacter. On mesure la force du bois et de l'eau. À la fin de la période, le bois est retiré.
- g) Le débit est maintenu à  $\chi = 1$  pendant 20 minutes supplémentaires. On mesure la force hydrodynamique seule (comme valeur de comparaison avec l'étape f).
- h) Le débit est abaissé à  $\chi = 0,67$  et maintenu pendant 20 min. La force hydrodynamique est mesurée (comme valeur de comparaison avec l'étape e).
- i) Le débit est arrêté et la force « interne » est à nouveau mesurée (comme à l'étape a). Si celle-ci n'est pas égale à celle d'avant les essais, la déviation est répartie linéairement dans le temps.

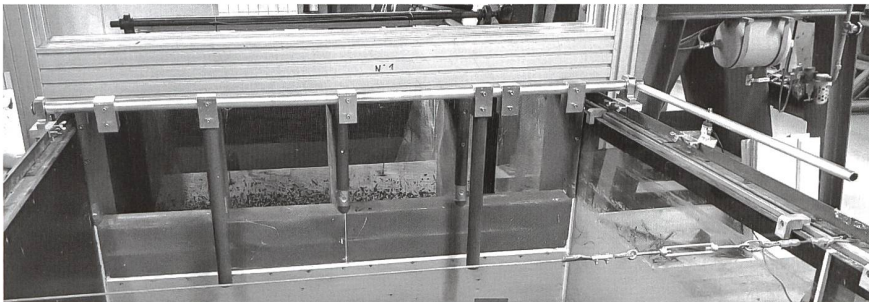


Figure 2: Installation du râtelier partiel sur un axe de rotation et la jauge de contrainte à droite de l'image.

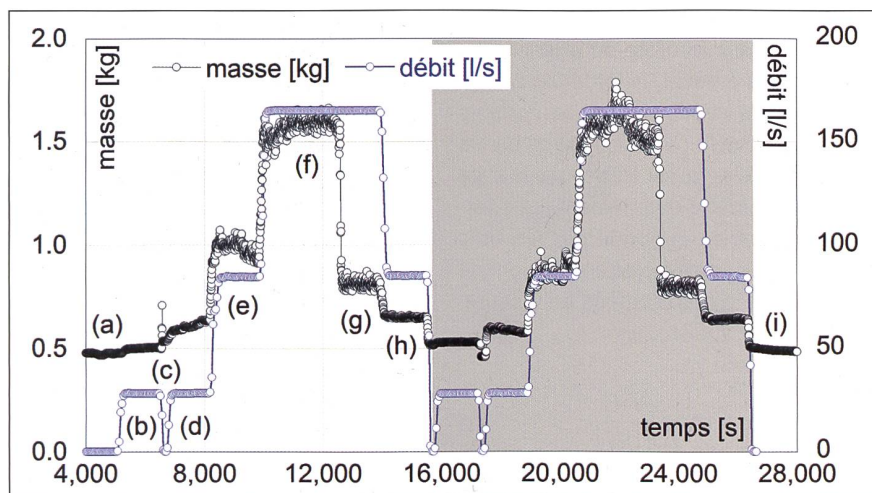


Figure 3: Valeurs du débit et de la force (en kg masse) sur le râtelier, telles qu'elles ont été enregistrées au cours d'une expérience (tests 1, 3 et 5, avec répétition en gris).

## 2.2 Force hydrodynamique

La force hydrodynamique sur un objet (ou sa résistance à l'écoulement) se compose de la résistance à la forme et la friction. La première résulte de la différence de pression avant et après l'objet, la seconde du frottement dans le fluide et à la surface de l'objet. Comme les barres de râtelier ne présentent qu'une faible surface, c'est la résistance à la forme qui est déterminante ici.

La force de traînée  $F_w$  (indice  $W$  pour l'eau, *figure 1a*) d'un objet dépend de la vitesse d'écoulement  $U$ , de la densité du fluide  $\rho$  et de la surface d'obstruction  $A$  de l'objet comme :

$$F_w = \frac{1}{2} c_w \rho A U^2 \quad (1)$$

Où  $c_w$  est le coefficient de traînée. Pour les barres cylindriques dans des profils de vitesse variés, *Cheng (2013)* indique le coefficient de traînée discrétisé par longueur

partielle  $\Delta z$  et la vitesse locale  $U$  correspondante, qui est exprimée avec le nombre de Reynolds  $R$  selon le lieu, comme suit :

$$c_W = 11R^{-0.75} + 0.9 \left[ 1 - e^{-\left(\frac{1000}{R}\right)} \right] + 1.2 \left[ 1 - e^{-\left(\frac{R}{4500}\right)^{0.7}} \right] \quad (2)$$

La force de traînée par longueur partielle constante  $\Delta z$  est cumulée segment par segment pour obtenir la force de traînée totale en tant que :

$$F_W = \frac{1}{2} \rho D \Delta z \sum (c_W U^2) \quad (3)$$

La surface d'obstruction  $y$  a été remplacée par le produit de  $D$  (diamètre de la barre de râtelier) et de  $\Delta z$ . Dans le modèle, il faut donc mesurer la force de traînée, le champ de vitesse horizontal et les niveaux d'eau pour pouvoir les convertir en valeurs  $c_W$  correspondantes (équation 3) et les comparer ensuite avec les valeurs de la littérature.

Dans un premier temps, les moments  $M_R$  mesurés dans le modèle, résultant des forces traînée, ont été comparés aux valeurs calculées  $M_C$  selon l'approche qui vient d'être présentée (figure 4). Il s'avère que les moments mesurés sont en moyenne supérieure d'environ 30 % aux moments calculés. En général, le coefficient de détermination est cependant élevé avec  $R^2=0,91$ . On suppose que cela est lié au champ d'écoulement tridimensionnel prononcé en amont du déversoir. La comparaison directe des coefficients de traînée à l'écoulement  $c_W$  selon Cheng (2013) est moins pertinente, car les valeurs sont moins corrélées. Et ce n'est pas seulement le cas avec nos propres données, mais aussi avec celles de la littérature, par exemple avec NCHRP (2000).

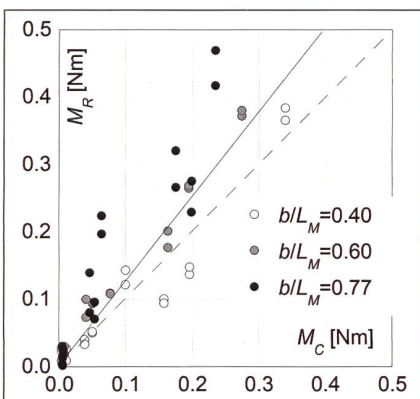


Figure 4: Moments hydrodynamiques mesurés et calculés (avec les bras de levier correspondants) sur les râteliers complets.

En résumé, on peut retenir que les forces (moments) résultant de la charge purement hydrodynamique peuvent être relativement bien prédites selon Cheng (2013), à condition que ses forces soient multipliées par une constante de 1,30. Cela est nécessaire pour adapter les conditions limites à notre situation de calcul. Il ne s'agit toutefois que d'un résultat périphérique, car les forces purement hydrodynamiques sont typiquement inférieures d'un facteur 2 à 6 aux forces induites par les bois flottants.

### 2.3 Forces induites par les bois flottants

La force induite  $F_H$  par les bois flottants est mesurée dans le modèle comme étant la force que les bois flottants (après déduction de la force hydrodynamique) exercent sur les râteliers testés, positionnée à la surface de l'eau (figure 1a). Le type de râtelier installé joue ici un rôle central.

Le râtelier complet présente un écartement relatif des barres de  $b_r/L_M < 0,80$ , avec  $b_r$  comme distance libre entre deux barres de râtelier voisins et  $L_M$  comme longueur maximale d'un tronç. Le râtelier complet, étant « étroit », permet aux bois flottants de se bloquer au niveau du râtelier lui-même, car il remplit le critère de Godtland et Tesaker (1994,  $b_r/L_M < 0,80$ ). Celui-ci indique à partir de quelle largeur de barre un râtelier a tendance à faire passer les bois flottants ou à les retenir. La quasi-totalité du volume de bois flottants reste accrochée au râtelier (figure 5a) et exerce une force contre lui.

La situation est différente pour le râtelier partiel, qui présente des écartements de barres plus importants que ceux de Godtland et Tesaker (1994). Dans ce cas, seule une partie des bois flottants s'appuie contre le râtelier. Certains troncs peuvent également s'appuyer contre les piliers situés derrière (figure 5b). Le râtelier ne subit donc qu'une partie de la force des bois flottants.

Afin de tenir compte du phénomène qui vient d'être décrit, la force par barres  $f_H$  (force totale induite par les bois flottants  $F_H$  mesurée divisée par le nombre de barres de râtelier, figure 1a) est utilisée par la suite comme paramètre déterminant. Le coefficient de traînée  $c_H$  induit par les bois flottants et par barre est déterminé comme suit sur la base des données de mesure, en s'appuyant sur l'équation 4 :

$$c_H = \frac{2f_H}{\rho A_H U^2} \quad (4)$$

L'équation 4 représente une approche physique raisonnable, mais doit être étayée

par des hypothèses pour l'application pratique. Premièrement,  $U$  représente dans notre cas la composante horizontale de la vitesse d'écoulement à la surface de l'eau au niveau du râtelier non obstrué. Cette hypothèse est judicieuse, car dans le modèle, le blocage contre le râtelier apparaît qu'à une seule couche de troncs et rarement à plusieurs. Cela est due à la vitesse du courant qui était faible et ne poussait que légèrement le bois contre le râtelier. Deuxièmement, il faut définir une surface d'obstruction  $A_H$ . En fait, celle-ci correspond à la surface obstruée par les bois flottants. Mais il est très difficile de la déterminer sans modèle réduit, et même avec elle varie entre les expériences. Nous avons donc décidé, après une analyse approfondie des données, que

- $A_H = D_M b_r$  pour des écartements de barres de râteliers « faibles » de  $b_r \leq L_M$ , et
- $A_H = D_M L_M$  pour des distances de barres de râteliers « importantes » de  $b_r > L_M$ .

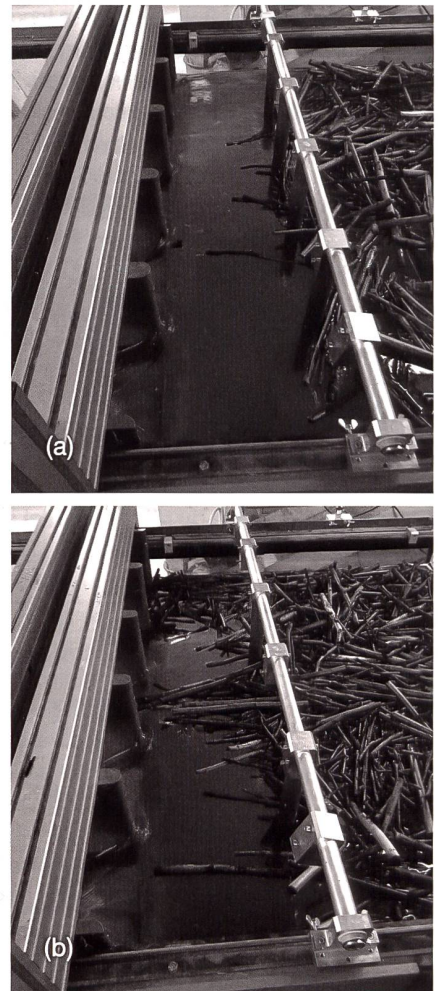


Figure 5: Exemple d'obstruction du râtelier (a) complet (test 18) et (b) partiel (test 72) dans le modèle. Dans le cas du râtelier partiel, certains troncs s'appuient également contre les piliers.

On suppose ainsi une obstruction à une seule couche, avec le diamètre maximal  $D_M$  du tronc le plus épais. La largeur de l'encombrement correspond à la valeur la plus faible de la longueur maximale du tronc  $L_M$  ou de l'écartement intérieur des barres  $b_r$ .

#### Râtelier complet

Le râtelier complet bloque normalement tous les troncs et subit conséquemment quasi la totalité de la force induite par les bois flottants. Il est de ce fait le premier à être étudié. La variation systématique des paramètres testés permis d'analyser séparément l'influence du débit, de la largeur des passes, de l'avancée du râtelier, et du nombre de Froude amont  $F_o$  (dans le réservoir) sur la force induite par barre. Il s'est avéré que toutes les variables de l'équation 4 sont de facto bien représentées, à l'exception de la distance relative entre les barres de râtelier  $b_r/L_M$ . Ici, la force des barres augmente avec  $b_r/L_M$ , ce qui était prévisible: (i) lorsque l'espacement entre les barres est « grand », un « large » tapis de bois flottants exerce une force contre une barre donnée et (ii) la force se répartit sur plusieurs barres dans le cas de troncs longs. Ces effets sont bien visibles dans la figure 6, montrant le coefficient de trainée  $c_H$  par barre et pour du bois uniquement en fonction de la distance relative entre les barres.

Le coefficient de détermination avec une tendance linéaire globale est de  $R^2=0,87$  pour les essais avec du bois flottant et le râtelier complet. La tendance suit en fait l'équation  $c_H=12,33(b_r/L_M)$ , représentée par une ligne en traitillés sur la figure 6. Compte tenu du fait que l'on étudie un phénomène de bois flottants avec une certaine instabilité des observations, nous recommandons plutôt de l'observer au moyen d'une enveloppe. Celle-ci est représentée par une ligne continue sur la figure 6 et suit la fonction:

$$c_H = 20 \frac{b_r}{L_M} \quad (5)$$

L'équation 5 ne s'applique qu'aux « faibles » distances entre les barres de râteliers avec  $b_r/L_M < 0,80$  (et donc pour les râteliers complets). C'est seulement dans ce cas que quasiment tous les bois flottants s'appuient contre le râtelier. Le comportement de la force des bois flottants avec un espacement plus important entre les barres de râtelier doit être étudié à l'aide du râtelier partiel.

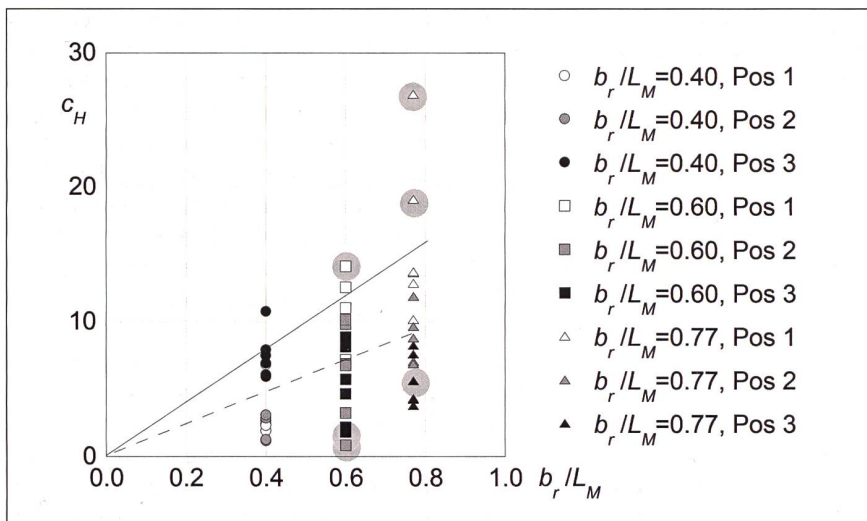


Figure 6: Coefficients de trainée à l'écoulement  $c_H$  induits par les bois flottants contre le râtelier complet en fonction de l'espacement relatif des barres du râtelier, avec une tendance linéaire.

Sur la figure 6, les tests avec  $F_o < 0,02$  sont surlignés d'un cercle gris. Ceux-ci fournissent dans l'ensemble des forces peu fiables, car les magnitudes sont très faibles ou se situent dans le domaine de la précision de mesure. Ces essais n'ont pas été inclus dans l'analyse. Le nombre de Froude amont est  $F_o=Q/(B(g(W+H)^3)^{0,5})$ , avec  $Q$  étant le débit,  $B$  la largeur du canal d'essai (ici  $B=1,50$  m),  $g$  l'accélération gravitationnelle,  $W$  la hauteur de la crête du déversoir (figure 1a) et  $H$  la charge sur le déversoir.

#### Râtelier partiel

Le râtelier partiel ne dispose que d'une barre devant chaque deuxième pilier. Les bois flottants s'appuient en conséquence contre la barre de râtelier et le pilier voisin. La distance relative entre les barres varie alors dans une fourchette de  $0,80 \leq b_r/L_M \leq 1,54$ , ce qui est supérieur au critère de Godtland

et Tesaker (1994). La probabilité que de nombreux troncs passe entre les barres est donc élevée.

L'analyse et la représentation des résultats des expériences ont été effectuées de la même manière que pour le râtelier complet. La figure 7 montre les coefficients de trainée  $c_H$  des bois flottants en fonction de  $b_r/L_M$ , qui est maintenant deux fois plus grande que pour le râtelier complet. En principe, les coefficients sont à peu près similaires que pour le râtelier complet et suivent la même tendance, mais avec des  $b_r/L_M$  plus grands. Une régression linéaire donne la relation  $c_H=6,15(b_r/L_M)$  avec  $R^2=0,80$ , une corrélation qui est encore acceptable dans le contexte des bois flottants. Il est intéressant de noter que la pente de 6,15 de la tendance linéaire du râtelier partiel est la moitié de la pente du râtelier complet (de 12,33).

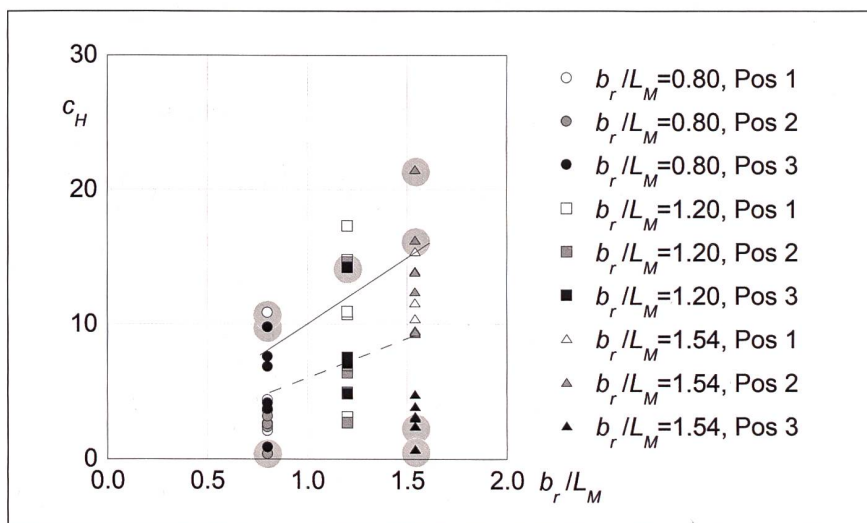


Figure 7: Coefficients de trainée induit par les bois flottants  $c_H$  du râtelier partiel en fonction de l'espacement relatif des barres du râtelier, avec une tendance linéaire.

Si l'on ajuste à nouveau une enveloppe dans les données de la *figure 7*, on constate que

$$c_H = 10 \frac{b_r}{L_M} \quad (6)$$

La pente dans l'équation 6 est égale à la moitié de la pente de l'équation 5. Le râtelier partiel subit donc en principe au maximum la moitié de la force du râtelier complet. Une fois de plus, les essais  $F_o > 0,02$  sont représentés en gris sur la *figure 7* et ne sont pas pris en compte pour l'analyse.

Des données applicables au cas du râtelier partiel sont fournies par *NCHRP (2000)* qui spécifient les forces induites par les bois flottants pour le cas de la pile de pont. Dans notre contexte, nous interprétons cela comme un râtelier partiel avec une très grande distance entre les barres. Concrètement, il en résulte environ  $3 < b_r/L_M < 6$  pour leurs expériences. Sur la base de leurs mesures de force, des dimensions des bois flottants, des vitesses d'écoulement et de la géométrie du canal, des valeurs de  $c_H$  ont été calculées avec notre approche. Les différences résident dans la forme de la tête des piliers: nous travaillons avec (i) des barres de râtelier rondes, alors que *NCHRP (2000)* a étudié des piles de pont rectangulaires en plan, (ii) un réservoir en amont du barrage, alors que *NCHRP (2000)* a supposé un cours d'eau, et (iii) un volume de bois flottants «extrême», alors que *NCHRP (2000)* a considéré un volume plus faible.

La *figure 8* complète nos données (uniquement  $F_o > 0,02$ ) avec celles de *NCHRP (2000)*. Celles-ci se situent aux grands  $b_r/L_M$  et vont jusqu'à environ  $c_H < 17$ . Cette valeur

correspond également au maximum que nous avons observé. Les valeurs n'augmentent donc plus pour des distances entre les barres de râtelier de plus en plus grandes, mais atteignent la valeur maximale mentionnée à partir d'environ  $b_r/L_M > 1,54$ . Cela est évident, car aucun tapis de bois flottants «très» large ne peut se former devant une seule barre simplement parce que la distance entre les barres devient «très» grande. La largeur de l'obstruction, et donc la valeur  $c_H$ , se dissocie de  $b_r/L_M$  pour des distances très larges entre les barres. Nous avons déjà intégré ce phénomène dans la formulation de la surface d'obstruction  $A_H$ , comme mentionné précédemment. La largeur déterminante de l'obstruction pour sa détermination est la valeur la plus faible entre la longueur maximale du tronç et la distance entre les barres. Les données de *NCHRP (2000)* aident donc à déterminer cette transition.

#### 2.4 Conclusions force

Les forces dues aux bois flottants (sans la composante hydrodynamique) sur les râteliers peuvent être formulées de manière fiable avec l'approche courante de la force de traînée, par rapport à une barre de râtelier. Les essais systématiques sur modèle ont permis de valider et de calibrer cette équation. Pour une apparition de bois flottants «extrême», la force maximale suivante (déduite d'une enveloppe) agit sur une barre d'un râtelier:

$$f_H = \left(20r \frac{b_r}{L_M}\right) \rho A_H \frac{U^2}{2} \quad (7)$$

Dans l'équation 7, le terme entre parenthèses correspond au coefficient de trai-

née  $c_H$  pour les bois flottants. Cette équation inclut l'effet de la vitesse d'écoulement (c'est-à-dire l'avancée du râtelier et le débit), l'espace libre des barres de râtelier, la longueur maximale des bois flottants, et la surface d'obstruction. Cette dernière a été prise comme valeur inférieure de  $D_M L_M$  (grande distance entre les barres) ou  $D_M b_r$  (faible distance entre les barres).

Le facteur  $r$  indique le type de râtelier, et est  $r=1$  pour le râtelier complet ( $0,40 < b_r/L_M < 0,80$ ) ainsi que  $r=0,5$  pour le râtelier partiel ( $0,80 \leq b_r/L_M \leq 1,54$ ). Par conséquent, l'équation 7 est uniquement valable dans la plage  $0,40 < b_r/L_M < 1,54$ . Pour les barres plus espacées ( $b_r/L_M > 1,54$ ), il s'ensuit un terme constant entre parenthèses ( $c_H=17$ ) dans l'équation 7.

Les explications ci-dessus peuvent également être interprétées de manière pragmatique. Le terme entre parenthèses dans l'équation 7 peut aussi être remplacé, de manière simplifiée, par  $c_H=17$ . Pratiquement tous nos points et ceux de *NCHRP (2000)* sont alors couverts, à deux exceptions près. L'équation 7 relative à la force contre les râteliers induite par les bois flottants par barres devient alors

$$f_H \leq 17 \rho A_H \frac{U^2}{2} \quad (8)$$

Les observations et conclusions mentionnées ici sont valables dans le cadre des paramètres étudiés et de leur domaine de variation.

Pour conclure, il convient de noter que nous avons également testé deux volumes de bois flottants plus faibles par rapport au volume «extrême» décrit jusqu'ici. «Petit» signifie concrètement qu'ils étaient inférieurs au volume déterminant estimé par *Schalko et al. (2019)*. Les forces de calcul mesurées étaient légèrement inférieures à celles de l'obstruction «extrême». Cette dernière représente donc manifestement le cas déterminant.

### 3. Râtelier partiellement perméable

Des râteliers positionnés en amont – ainsi que d'autres mesures constructives – retiennent les bois flottants avant l'entrée dans l'évacuateur de crue et préservent ainsi sa capacité. L'aspect de la sécurité des barrages a été pris en compte. La rétention complète des bois flottants nécessite son enlèvement mécanique après la crue, ce qui les rend indisponibles en tant

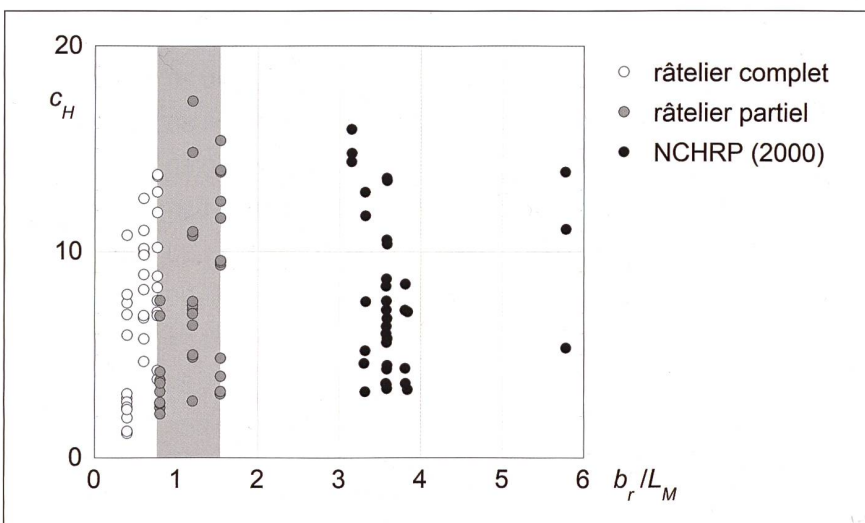


Figure 8: Coefficients de trainée  $c_H$  induits par les bois flottants estimés à l'aide des données de *NCHRP (2000)* et de notre approche ( $F_o > 0,02$ ).

qu'élément structurant de l'habitat des cours d'eau.

Dans la suite, nous prenons aussi compte de la valeur écologique du bois de grande taille dans les cours d'eau. L'étude sur la diminution de la probabilité de blocage des râteliers partiels a donc pour but de tester un râtelier avec des bois flottants qui assure la sécurité des barrages tout en étant – au moins partiellement – perméable ou en laissant une part aussi importante que possible de bois flottants dans le cours d'eau.

Le râtelier partiel détaillé ci-dessus ne dispose d'une barre de râtelier que devant un pilier sur deux, le râtelier complet dispose d'une barre de râtelier devant chaque pilier. La figure 9 montre un râtelier partiel dans le modèle pendant un essai.



Figure 9: Essai avec un râtelier partiel et une quantité extrême de bois flottant (test 278).

La littérature indique les approches suivantes pour orienter des bois :

- *McFadden et Stallion (1976)* ont conçu trois piliers en forme triangulaire en amont d'un ouvrage similaire à un évacuateur de crue. Les résultats n'ont pas été concluants. Une partie des bois flottants se sont alignés parallèlement à l'écoulement, les autres sont restés bloqués contre les piliers.
- *FHWA (2005)* a étudié le positionnement d'un pilier individuel en amont d'un ouvrage potentiellement obstrué. Le but est d'inciter les mouvements des bois flottants dans le sens de l'écoulement.
- *Lange et Bezzola (2006)* se sont intéressés à un redresseur. Il a été montré qu'il influence le passage des bois flottants vers l'aval. Cependant, avec la présence

d'une grande quantité de bois flottants, une obstruction de la section d'écoulement peut avoir lieu, dès qu'un tronç flottant de grande longueur se bloque.

- La probabilité de blocage d'un tronç individuel contre un seul pilier a été étudié par *Schalko (2017)*. Si la rugosité des troncs et des piliers ont un effet mineur sur la probabilité de blocage, la longueur des troncs, la vitesse d'écoulement, le mode de transports des troncs, le nombre de Froude et la profondeur d'écoulement influencent la probabilité de blocage.
- *De Cicco et al. (2020)* se concentrent sur l'influence de la géométrie des piliers pour la probabilité de blocage. Il est constaté que les mécanismes de transports des bois flottants influencent la probabilité. Une forme rectangulaire des piliers multiplie par trois la probabilité en référence à une forme triangulaire. La géométrie du pilier influence l'écoulement en amont, ce qui affecte la probabilité. Ce sont les troncs les plus longs qui présentent la plus haute probabilité de blocage.
- *Schalko et al. (2020)* ont installé des ailettes métalliques sur un pilier pour guider les bois flottants. Les diverses configurations testées (type d'ailettes, inclinaison, angle en référence à l'écoulement) n'ont pas montré de réduction de la probabilité de blocage. Les ailettes ont permis d'éviter un impact des bois flottants directement sur le pilier

### 3.1 Expériences de passage

Le modèle physique a été adapté pour cette nouvelle série de tests. Plus précisément, un élément configurable pour le râtelier (complet ou partiel) a été ajouté. Les expériences ont porté sur le scénario extrême de bois flottants et, en complément, sur deux autres différentes formes d'accumulation de bois individuel. L'arrivée « individuelle » de bois flottants se décrit par une succession de petits groupes de trois troncs de longueur identique et maximale (au total 60 troncs). L'arrivée « en groupe » est composée de 6 groupes de trente troncs de longueur identique et maximale (au total 180 troncs). Quant à l'arrivée « extrême », il s'agit du volume de bois flottants extrême décrit au chapitre 2.1.

Des différents débits ont été testés, ainsi que des largeurs de passes et des positions du râtelier. La gamme de paramètres étudiés est présentée dans le tableau 1. La position avancée du râtelier a été testée avec quatre positions distinctes :

- « loin » de l'entrée (a grand),
- à une position « moyenne » (a moyen),
- « près » de l'entrée (a petit), et
- « sans » râtelier comme configuration de référence.

Au total, 573 essais ont été réalisés, tous avec un affluent de type « réservoir » en amont du râtelier ( $F_o < 0,1$ ). La probabilité d'obstruction  $P$  et la capacité hydraulique  $\eta$  ont été évaluées, et comparées aux valeurs du râtelier complet ainsi qu'à celles de la situation sans râtelier. Elles sont définies comme suit :

- Performance hydraulique  $\eta$  comme le rapport entre le coefficient du déversoir avec bois et du coefficient sans bois. La valeur  $\eta$  est donc comprise entre zéro (la capacité hydraulique n'est plus assurée) et un (la pleine capacité se produit, sans réduction, tableau 2).
- Probabilité d'obstruction  $P$  comme le rapport entre le nombre de bois bloqués et le nombre total de bois ajoutés. La valeur de  $P$  est donc comprise entre zéro (tout le bois passe le râtelier et le déversoir) et un (tout le bois est bloqué, tableau 3).

Apparition du bois		$\chi_R$	$b/L_M$	$a$
		[-]	[-]	[m]
Individuel	Min.	0,34	0,40	0,00
	Max.	1,01	0,77	0,40
Groupe	Min.	0,33	0,40	0,00
	Max.	1,01	0,77	0,40
Extrême	Min.	0,17 (*)	0,40	0,00
	Max.	1,01	0,77	0,40

Tableau 1: Gammes de paramètres étudiées et type d'apparition des bois flottants (\*valeur de Bénet et al., 2021).

### 3.2 Râtelier partiel

Les figures 10, 11 et 12 montrent la probabilité d'obstruction  $P$  et la capacité hydraulique  $\eta$  du râtelier partiel en fonction de l'avancée relative du râtelier  $a/H_R$ , avec  $H_R$  comme charge de référence du débit sans bois flottants. Cette normalisation s'est avérée déterminante dans les études précédentes sur le râtelier complet et les têtes de piliers avancées (*Pfister et al., 2020*).

Pour le bois individuel (figure 10), les bois flottants pouvaient se déplacer relativement librement et, en conséquence, être souvent tournés dans le sens du courant par le râtelier partiel. En particulier, la position 1 du râtelier, avec de « grands »  $a/H_R$  et donc « éloignés » de l'entrée, offrait suf-



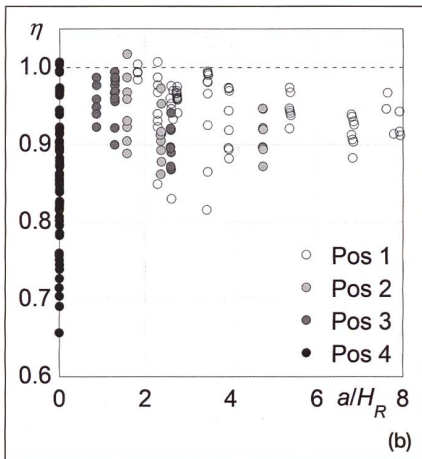
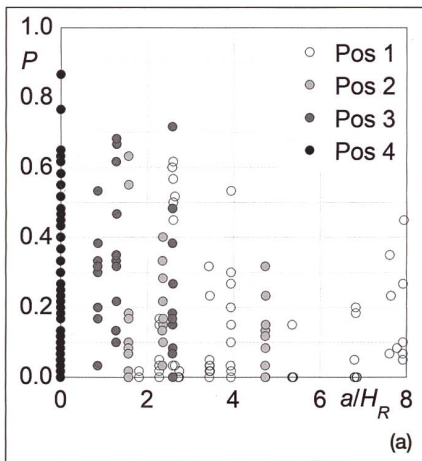


Figure 10: Pour le râtelier partiel et l'apparition de bois individuel: (a) probabilité d'obstruction  $P$  et (b) capacité hydraulique  $\eta$ .

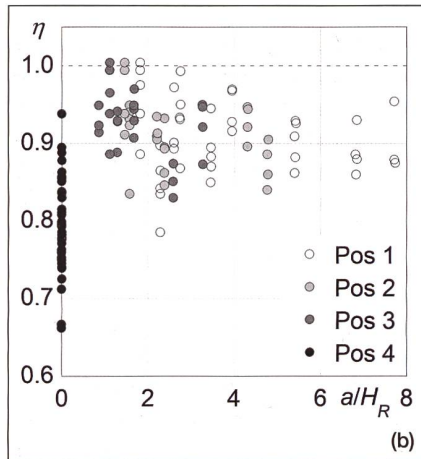
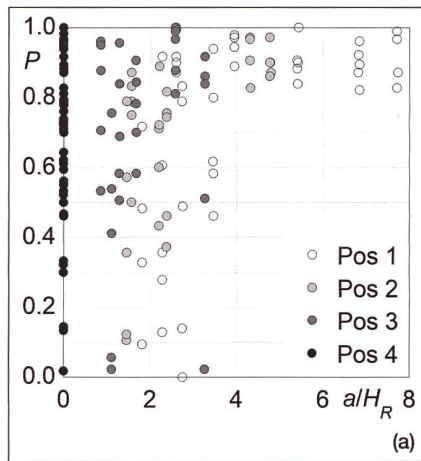


Figure 11: Pour le râtelier partiel et l'apparition de bois en groupe: (a) probabilité d'obstruction  $P$  et (b) capacité hydraulique  $\eta$ .

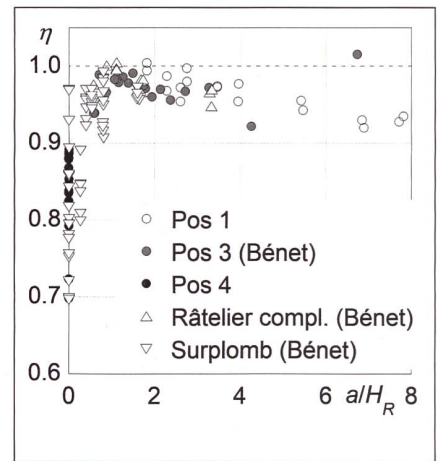


Figure 12: Pour le râtelier partiel et l'apparition de bois extrême: capacité hydraulique  $\eta$ .

### 3.3 Râtelier partiel et surplomb des piliers

Le surplomb maximal des piliers de  $p=0,08\text{ m}$  (Pfister et al., 2020) a été intégré dans le modèle, en plus du râtelier partiel (figure 13). Comme le montre la figure 14a, la perméabilité est restée plus élevée pour le bois individuel et quasiment inchangée pour les autres arrivées de bois. La différence est toutefois frappante en ce qui concerne la capacité hydraulique. Celle-ci est maintenant toujours supérieure à environ  $\eta \approx 0,95$  aussi longtemps que  $0,35 < a/H_R < 4$  (figure 14b).

fissement d'espace pour la rotation et les probabilités d'embâcle diminuaient, en particulier par rapport à la situation sans râtelier (position 4). La capacité hydraulique était nettement plus importante avec le  $a/H_R$  et le râtelier partiel que celle sans râtelier (typiquement  $\eta > 80\%$ ).

Pour les bois flottants en tant que groupe (figure 11), il n'y a guère de différence en ce qui concerne la probabilité d'obstruction avec et sans le râtelier partiel, avec l'exception des râteliers très distants. En revanche, la capacité hydraulique est maintenant généralement au-dessus de  $\eta > 80\%$ .

En cas d'arrivée extrême de bois flottants, le volume total de bois se bloque au niveau du râtelier partiel et des piliers, ce qui donne  $P=1$ . Ceci est également valable pour la situation sans râtelier. Cependant, la présence du râtelier partiel augmente nettement la capacité hydraulique, typiquement à plus de 90% (figure 12).

Par conséquent, le râtelier partiel laisse passer nettement plus de bois individuel que la configuration sans râtelier (tableau 3). Il n'y a pas de différence significative pour un volume de bois en groupe ou un vo-

lume extrême. La perméabilité est donc augmentée pour le cas de charge le plus fréquent, par rapport à la situation sans râtelier ou avec un râtelier complet. Cet objectif a donc été relativement bien atteint et plus de gros bois mort restent dans le cours d'eau. Pour les bois flottants en groupes et la situation extrême, la quantité de bois retenue par le râtelier partiel est à peu près la même. C'est peut-être même un point positif, car le bois flottant s'accumulerait dans les endroits étroits du cours d'eau en aval de l'évacuateur de crue, ce qui ne ferait que déplacer le danger.

La capacité hydraulique (tableau 2) est certes nettement augmentée par le râtelier partiel ( $\eta > 0,80$ ), par rapport à la situation sans râtelier ( $\eta > 0,65$ ). Cependant, il n'y a pas de performance élevée ( $\eta \approx 0,95$ ), comme c'est le cas par exemple pour la situation avec un râtelier complet. En conséquence, le râtelier partiel serait combiné avec des piliers en surplomb (Pfister et al. 2020). Cela permettrait de conserver sa capacité à laisser le passage des bois flottants tout en augmentant sa capacité hydraulique.



Figure 13: Combinaison d'un râtelier partiel avec le surplomb des piliers (test 527).

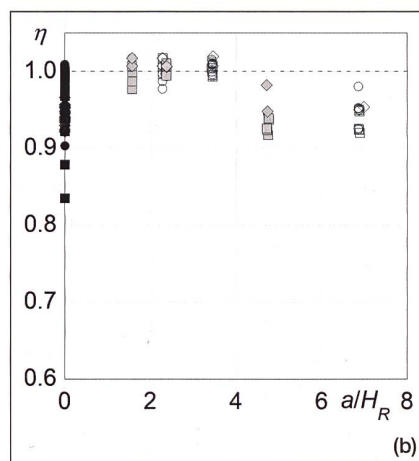
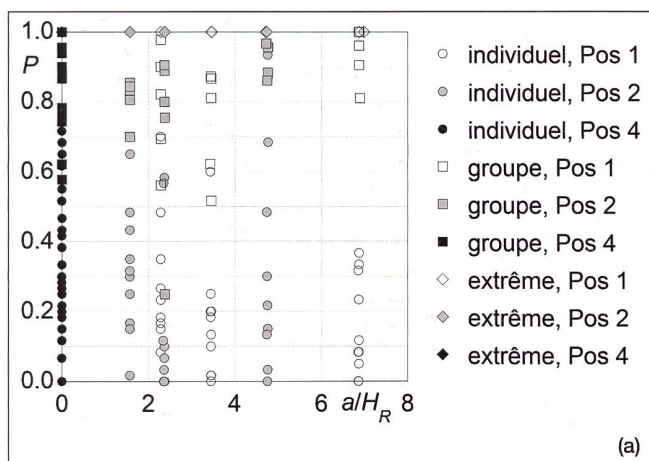


Figure 14: Pour le râtelier partiel avec un surplomb de pilier et différentes apparitions de bois flottants: (a) probabilité d'obstruction et (b) capacité hydraulique.

### 3.4 Conclusions râtelier partiellement perméable

Les conclusions suivantes peuvent être tirées sur la base des essais réalisés :

- Les passes larges ( $b/L_M > 0,80$ , Godtland et Tesaker, 1994) sont les plus efficaces pour faire passer les bois flottants tout en maintenant la capacité d'écoulement. Certes, de tels dispositifs n'ont pas été testés ici, mais nos données le suggèrent.
- Dans le cas de passes plus étroites ( $b/L_M \leq 0,80$ ) et d'un volume potentiellement grand de bois flottants, on peut faire la distinction suivante :

1. Si la capacité hydraulique est centrale (par exemple  $\eta \geq 0,90$ ) et que les bois flottants doivent être acheminés autant que possible, il est recommandé d'installer un râtelier partiel ( $a/H_R < 4$ ) combiné à un surplomb de pilier ( $p/H_R > 0,35$ ). Cela permet de faire passer une certaine quantité de bois flottants.
2. Si le passage est plus important que la capacité hydraulique, il est possible de prévoir un râtelier partiel (à la position  $1 \leq a/H_R < 4$ , sans surplomb de pilier). La capacité est alors de  $\eta > 0,80$  pour chaque volume de bois flottants

testé et jusqu'à 30 % de bois flottants passent en plus (bois individuel) par rapport à la configuration sans râtelier.

Les tableaux 2 et 3 donnent la capacité et la probabilité d'obstruction par configuration.

### Remerciements

L'Office fédéral de l'énergie a financé l'étude, ensemble avec la HES-SO.

Position du râtelier	Volume de bois	Sans surplomb des piliers			Avec surplomb des piliers	
		$b/L_M [-]$			$b/L_M [-]$	
		0,40	0,60	0,77	Valeur moyenne	0,60
1	Individuel	0,94	0,94	0,97	0,95	0,99
2		-	0,92	-	0,92	0,98
3		-	0,94	-	0,94	-
4		0,80	0,88	0,95	0,88	0,97
1	Groupe	0,94	0,87	0,93	0,91	0,98
2		-	0,89	-	0,89	0,98
3		-	0,90	-	0,90	-
4		0,79	0,77	0,83	0,79	0,95
1	Extrême	0,95	0,96	0,98	0,96	0,99
2		-	-	-	-	0,99
3		0,97	-	0,97	0,97	-
4		0,86	0,85	0,81	0,84	0,97

Tableau 2: Capacité hydraulique  $\eta$  (moyenne de tous les débits testés).

Position du râtelier	Volume de bois	Sans surplomb des piliers			Avec surplomb des piliers	
		$b/L_M [-]$			$b/L_M M [-]$	
		0,40	0,60	0,77	Valeur moyenne	0,40
1	Individuel	0,22	0,06	0,01	0,10	0,20
2		-	0,16	-	0,16	0,26
3		-	0,30	-	0,30	-
4		0,41	0,18	0,05	0,21	0,32
1	Groupe	0,94	0,68	0,59	0,74	0,82
2		-	0,76	-	0,76	0,82
3		-	0,82	-	0,82	-
4		0,80	0,72	0,52	0,68	0,81
1	Extrême	$\approx 1$	$\approx 1$	$\approx 1$	$\approx 1$	$\approx 1$
2		-	-	-	-	$\approx 1$
3		$\approx 1$	-	$\approx 1$	$\approx 1$	-
4		$\approx 1$	$\approx 1$	$\approx 1$	$\approx 1$	$\approx 1$

Tableau 3: Probabilité d'obstruction  $P$  (moyenne de tous les débits testés).

Sources:

Bénet, L., De Cesare, G., Pfister, M. (2021). Reservoir Level rise under extreme driftwood blockage at ogee crest. *Journal of Hydraulic Engineering* 147(1), 04020086.

Bénet, L., De Cesare, G., Pfister, M. (2022). Partial driftwood rack at gated ogee crest: Trapping rate and discharge efficiency. *Journal of Hydraulic Engineering* 148(8), 06022008.

Bülliard, J., Lauper, S. (2019). Influence du bois mort dans les cours d'eau pour les peuplements piscicoles. Rapport, Service des forêts et de la faune SFF, État de Fribourg.

Cheng N.-S. (2013). Calculation of Drag Coefficient for Arrays of Emergent Circular Cylinders with Pseudofluid Model. *Journal of Hydraulic Engineering* 139(6), 602–611.

De Cicco, P.N., Paris, E., Solari, L., Ruiz-Villanueva, V. (2020). Bridge pier shape influence on wood accumulation: Outcomes from flume experiments and numerical modelling. *Journal of Flood Risk Management* 2020(13), 12599.

FHWA (2005). Debris Control Structures Evaluation and Countermeasures. *Hydraulic Engineering Circular No. 9*, Salem, OG.

Gippel, C.J., O'Neill, I., Finlayson, B.L., Schnatz, I. (1996). Hydraulic guideline for the re-introduction and management of large woody debris in lowland rivers. *Regulated rivers: Research & management* 12(2–3), 223–236.

Godtland, K., Tesaker, E. (1994). Clogging of spillways by trash. *Proc. Intl. Conf. ICOLD, Durban, Q68, R36*, 543–557.

Häehnel, R.B., Daly, F. (2004). Maximum Impact Force of Woody Debris on Floodplain Structures. *Journal of Hydraulic Engineering* 130(2), 112–120.

Kälin, R., Ballini, D., Meier, J. (2005). Abspülen von Geschwemmselteppichen: Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit von Stahlwasserbauten. *Wasser Energie Luft* 97(1/2), 11–13.

Lange, D., Bezzola, G.R. (2006). Schwemmholz, Probleme und Lösungsansätze. *VAW Mitteilungen* 188, ETH Zürich.

Majtan, E., Cunningham, L.S., Rogers, B. (2021). Flood-Induced Hydrodynamic and Debris Impact Forces on Single-Span Masonry Arch Bridge. *Journal of Hydraulic Engineering* 147(11), 04021043.

McFadden, T., Stallion, M. (1976). Debris at the Chena River. *CRREL Report 76–26*, USACE, Hanover.

Mende, M., éditeur (2018). *Lebendige Gewässer mit Totholz*. *Ingenieurbiologie* 2(18), 1–76.

NCHRP (2000). Debris forces on highway bridges. *National Cooperative Highway Research Program, Report 445*, National Academic Press, Washington DC.

Nistor, I., Goseberg, N., Stolle, J. (2017). Tsunami-driven debris motion and loads: A critical review. *Frontiers in Built Environment* 3(2), 1–11.

Pfister, M., Bénet, L., De Cesare, G. (2020). Effet des bois flottants obstruant un évacuateur de crue sous des conditions extrêmes. *Wasser Energie Luft* 112(3), 165–170.

Rickli, C., Hess, J. (2009). Aspects de la formation des bois flottants. *Cours de formation continue KHOS «Protection contre les crues»*, Fribourg, 1–15.

Schalko, I., Schmocker, L., Weitbrecht, V., Boes, R.M. (2020). Risk reduction measures of large wood

accumulations at bridges. *Environmental Fluid Mechanics* 2020(20), 485–502.

Schalko, I., Schmocker, L., Weitbrecht, V., Boes, R.M. (2019). Gefahrenbeurteilung von Schwemmholzverkläuerungen in Flüssen: Teil 2 – Aufstau. *Wasser Energie Luft* 111(2), 71–77.

Schalko, I. (2017). Large Wood Accumulation Probability at a Single Bridge Pier. 37<sup>th</sup> IAHR World Congress, Kuala Lumpur, Malaysia.

Spreitzer, G., Tunnicliffe, J., Friedrich, H. (2019). Using smart sensors for measuring impact forces of large wood. E-proceedings 38<sup>th</sup> IAHR World Congress, Panama City, Panama.

USCE (1997). Debris Control at Hydraulic Structures in Selected Areas of the United States and Europe. *Contract Report CHL-97-4*, US Army Corps of Engineers, UK, London.

Wüthrich, D., Ylla Arbòs, C., Pfister, M., Schleiss, A.J. (2020). Effect of debris damming on wave-induced hydrodynamic loads against free-standing buildings with openings. *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering* 146(1), 04019036.

Auteurs:

Michael Pfister, Prof. Dr, Filière Génie Civil, Haute École d'Ingénierie et d'Architecture de Fribourg (HES-SO), CH-1705 Fribourg, michael.pfister@hefr.ch,

Loïc Bénet, MSc, Filière Génie Civil, Haute École d'Ingénierie et d'Architecture de Fribourg (HES-SO), CH-1705 Fribourg,

Giovanni De Cesare, Dr, Plateforme de constructions hydrauliques (PL-LCH), École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), CH-1015 Lausanne.



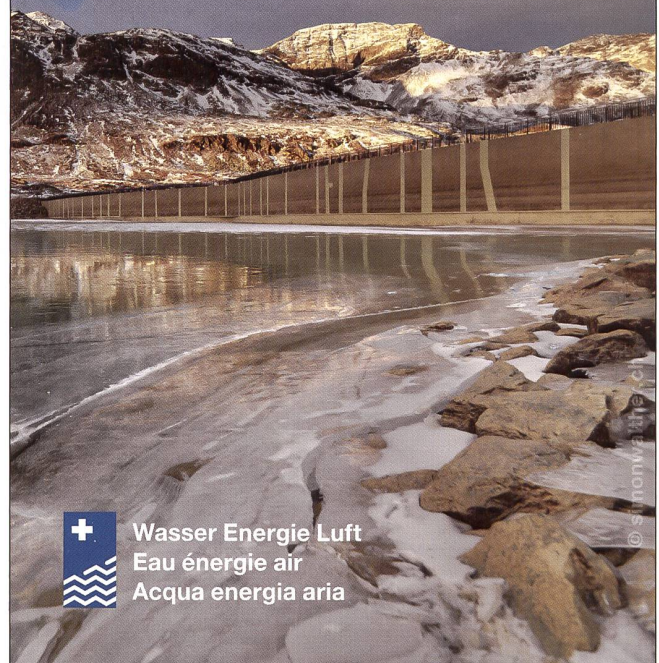
## Bau- oder Umweltingenieur/-in im Wasserbau


70-100% | Schwyz | ab 1. April 2023 oder nach Vereinbarung



Alle aktuellen Stellenangebote und Online Bewerbung auf [www.sz.ch/jobs](http://www.sz.ch/jobs)

Nutzen Sie als Abonnent den Zugang zu unserem Login-Bereich auf unserer Website [www.swv.ch](http://www.swv.ch) und laden Sie das «WEL» auf das Gerät Ihrer Wahl.



 Wasser Energie Luft  
Eau énergie air  
Acqua energia aria