



Rapport final du 31.03.2023

Rechenkraft@Wehr

Force imposée par des bois flottants sur un
râtelier en amont d'un aménagement au fil de
l'eau



Râtelier du type « complet » étant bloqué de bois flottants dans un cours d'eau, en amont d'un déversoir vanné
HEIA-FR (HES-SO) et EPFL/PL-LCH, Loïc Bénéat (test 60)



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

EPFL

Date : 31.03.2023

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 Bénét, 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/502388-01



Zusammenfassung

Rechen stellen eine effiziente Massnahme zur Sicherstellung der Abflusskapazität sowie der Betriebssicherheit von Hochwasserentlastungsanlagen bei ausgeprägtem Schwemmholtzanfall dar. Vorgängige Forschungsprojekte haben sich mit Fragestellungen in diesem Zusammenhang befasst, insbesondere zum Überstau, diversen Massnahmen zu dessen Begrenzung und auch zu Rechenkräften. Bei Laufkraftwerken ist die Schwemmholtzproblematik noch verstärkt, da das Holz aufgrund der erhöhten Strömungsgeschwindigkeit dichter am Rechen liegt und diesen kompakter verlegt.

Die Kraft auf einen Rechenstab vor einer Wehranlage im Fliessgewässer für einen «extremen» Schwemmholtzanfall wurde in Rahmen dieses Projekts im physikalischen Model untersucht. Die Randbedingungen wurden systematisch variiert, namentlich der Abfluss, die Strömungsgeschwindigkeit und der lichte Stababstand. Es wurde ein «extremer» Schwemmholtzanfall angenommen, sowie ein aufgelöster und ein vollständiger Rechen.

Die Rechenkraft konnte erneut mit dem Strömungswiderstandskoeffizienten ausgedrückt werden. Die Schattenfläche war anzupassen, da das Holz bei grösseren Strömungsgeschwindigkeiten mehrlagig an den Rechen gedrückt wurde. Zudem war der Strömungswiderstandskoeffizient auf 27 zu erhöhen, im Gegensatz zu 20 für die Versuche auf Hochwasserentlastungsanlagen in Stauhaltungen.

Der Überstau an der verklausten Wehranlage war erwartungsgemäss abhängig vom Rechen und von der Geschwindigkeitshöhe der Anströmung, welche im Fliessgewässer grösser ist. Beide Effekte konnten quantifiziert werden. Es zeigte sich erneut der positive Effekt des Rechens auf die Abflusskapazität. Bei der Kombination von verlegtem Rechen und der kleinsten Wehrhöhen übernahm die Verklausung die Kontrolle über die Pegel-Abfluss-Beziehung. Das Wehr war nicht mehr massgebend.

Résumé

Les râteliers représentent une mesure efficace pour maintenir la capacité du débit et la sécurité de fonctionnement des évacuateurs de crue sur des barrages. Des projets de recherche antérieurs ont traité des problématiques dans ce contexte, notamment en ce qui concerne la surélévation de la retenue, diverses mesures pour limiter celle-ci et aussi les forces imposées aux barres de râtelier. Dans le cas déversoir au fil de l'eau (barrage vanné), le problème des bois flottants est plus important, car le bois est accumulé de manière plus compacte en raison de la vitesse d'écoulement amont amplifiée.

La force sur une barre de râtelier en amont d'un déversoir dans une rivière a été étudiée dans le cadre de ce projet pour une accumulation « extrême » de bois flottants et à l'aide d'un modèle réduit. Les conditions de bord ont été systématiquement variées, à savoir le débit, la vitesse d'écoulement et l'espacement des barres. Une accumulation « extrême » de bois a été supposée, ainsi qu'un râtelier partiel et complet.

La force sur une barre de râtelier pouvait à nouveau être exprimée en termes de coefficient de traînée. La surface d'obstruction a dû être ajustée car les bois s'étaient appuyés en plusieurs couches contre les râteliers à des vitesses d'écoulement plus élevées. Le coefficient de traînée a dû être porté à 27, comparé à 20 pour les essais sur évacuateurs de crue en réservoir.

Comme prévu, la surélévation de la retenue était dépendant de la présence du râtelier et la charge cinétique de l'écoulement amont, étant prononcé dans des cors d'eau. Leurs effets pouvaient être quantifiés. L'effet positif du râtelier sur la capacité de débit a de nouveau été démontré. Avec la



combinaison de râtelier obstrué et de petites hauteurs de pelle du déversoir, le blocage a pris le contrôle de la relation niveau-débit. Le déversoir n'était plus décisif.

Summary

Racks represent an efficient measure to maintain the discharge capacity and the operational safety of spillways on dams for a pronounced accumulation of driftwood. Previous research projects have dealt with these structures, in particular with regard to the reservoir level rise, various measures to limit the latter as well as with rack forces. In the case of run-on-river weirs, the problem of driftwood is amplified, since the wood clogs more compact on the rack due to the increased flow velocity.

The rack-bar force upstream of a river weir for an "extreme" accumulation of driftwood was investigated in the context of this project using a physical model. The boundary conditions were systematically varied, namely the discharge, the flow velocity and the rack bar spacing. An "extreme" accumulation of driftwood was assumed, as well as a partial and a full rack.

The driftwood-induced rack force could again be expressed in terms of the drag coefficient. The reference surface had to be adjusted since the driftwood was pushed in several layers against the rack at higher flow velocities. Over all, the drag coefficient had to be increased to 27, in contrast to 20 for the tests on spillways in reservoirs.

As expected, the reservoir level rise for the clogged weir depended on the presence of the rack and the approach flow head, which increase in rivers as compared to reservoirs. The effects of both parameters could be quantified. The positive effect of the rack on the discharge capacity was once more proven. With the combination of clogged rack and the smallest weir heights, the blockage took control of the rating curve, the weir was no longer decisive.

Take-home messages

- A weir operates hydraulically slightly less efficient under elevated approach flow velocities, as common in rivers. The weir coefficient marginally decreases. Combined with driftwood being trapped at the weir, the latter further drops. The residual capacity of the blocked weirs is much smaller for higher approach flow velocities (in rivers) than for a reservoir configuration, since the wood is pressed compact on the weir front. The installation of a rack enhances the situation partially, particularly for medium approach flow velocities. However, under the maximum tested velocity, only a small enhancement was observed due to the presence of the rack.
- Due to the higher flow velocity in rivers as compared to reservoir, driftwood is pressed with a significant momentum against racks. The model test data indicated that, again, a representation of the wood load with the drag coefficient is feasible. However, the wood occurred now in several layers at the rack, complicating the formulation of the constricted area. The latter was formulated empirically, together with a drag coefficient reaching now roughly 27.



Table des matières

1	Introduction	6
2	Etat de l'art	7
2.1	Etude bibliographique	7
2.2	Besoin de recherche et question-clés	9
3	Méthode	11
3.1	Modèle réduit	11
3.2	Descriptif des essais	13
4	Résultats	16
4.1	Observations	16
4.2	Surélévation amont	21
4.2.1	Fonctionnement hydraulique (eau sans bois ni râtelier)	21
4.2.2	Avec bois flottants mais sans râtelier	24
4.2.3	Râtelier complet avec bois flottants	27
4.2.4	Râtelier partiel avec bois flottants	29
4.3	Force sur râtelier	31
4.3.1	Surface obstruée	31
4.3.2	Définition du coefficient de trainée	33
4.3.3	Coefficient de trainée pour râtelier complet	34
4.3.4	Coefficient de trainée pour râtelier partiel	36
4.3.5	Discussion	38
5	Conclusion	41
5.1	Surélévation amont	41
5.2	Force	41
6	Notation	43
7	Bibliographie	44



1 Introduction

Chaque aménagement hydroélectrique au fil de l'eau dispose d'un barrage vanné pour le passage des crues. Il est évidemment essentiel qu'il soit opérationnel dans toutes les conditions, en particulier lors crues extrêmes. Ces événements extrêmes semblent se multiplier, car le changement climatique entraîne une augmentation de l'intensité des précipitations (NCCS 2018, OFEV 2021). Les événements extrêmes se caractérisent par des crues composées d'eau, de bois flottants et de matériaux charriés.

L'accumulation de bois flottants au niveau du barrage vanné (ou d'un autre point d'étranglement, comme un ponceau ou un pilier de pont) entraîne généralement une diminution de l'efficacité de l'écoulement et le niveau de la rivière en amont augmente de manière incontrôlée. Cela peut entraîner le dépôt de sédiments, le débordement d'un cours d'eau et l'inondation des plaines voisines et l'endommagement des infrastructures qui y sont installées.

Des mesures concrètes sont nécessaires pour protéger les aménagements contre les conséquences indésirables d'un blocage des ouvrages hydrauliques avec des bois flottants. Cette tâche est un défi. On ne connaît pas précisément le volume de bois flottants susceptible d'atteindre l'aménagement, ni son comportement local et ses caractéristiques de mise en eau (OFEV 2019).

La mise en place de « râtelier » de protection, qui fait l'objet de cette étude, est une des solutions pour la gestion des bois flottants dans les rivières. Après trois étapes de recherche sur la thématique des bois flottants dans les conditions en amont correspondant à celles d'un réservoir, c'est-à-dire avec de l'eau quasi stagnante dans le réservoir, cette nouvelle étape présente les conditions amont correspondant à celles d'un cours d'eau, c'est-à-dire avec de l'eau en mouvement. Cela change l'interaction des bois flottants avec les aménagements hydrauliques considérablement.

Les étapes précédentes effectuées sur modèle physique par les auteurs (Pfister et al. 2019, 2022, Pfister et Bénét 2021) avec une priorité sur les conditions extrêmes (volume de bois flottants, le débit et la distance entre les piles) ont relevé les finalités suivantes :

- Quantification de la surélévation amont du niveau d'eau suite à un blocage de bois flottants à un évacuateur de crue de barrage (avec une retenue comme conditions amont).
- Mesures constructives afin de limiter l'augmentation du niveau d'eau dans le réservoir suite au bois flottants (têtes de piliers en amont, suppression des piliers et râtelier de protection).
- Etude d'un râtelier appelé partiel avec un double objectif (garantir la sécurité contre la surélévation de la retenue durant les crues et maintenir les bois flottants dans le cours d'eau pour leur apport écologique, avec une retenue comme condition amont).
- Estimation des forces dues à un tapis de bois flottants placé en amont et pressé contre un râtelier avec formulation d'un coefficient de trainée C_w (avec une retenue comme condition amont).

L'étape de recherche, présentée ici, a donc pour objectif de couvrir pour les conditions d'approche similaires à un cours d'eau les mêmes connaissances que les étapes précédentes dans les conditions amont réservoir. Les recherches ont lieu sur le même modèle physique avec adaptation des conditions de bord qui imposent des vitesses amont plus élevées, à l'instar d'un barrage vanné. Les connaissances couvriront un grand nombre d'installations en Suisse.



2 Etat de l'art

L'étude de littérature portant sur la *force* des bois flottants imposée sur le râtelier est développée en détail dans le rapport de l'étude préliminaire (Pfister et al. 2022). Les éléments principaux sont repris et résumés ci-dessous. L'étude de littérature portant sur la *surélévation* engendrée par un blocage de bois flottants a été traitée par Pfister et al. (2019), et Pfister et Bénét (2021).

Les auteurs ont publié deux papier scientifiques « open access », notamment Bénét et al. (2021, 2022)

2.1 Etude bibliographique

Les barres de râteliers sont soumises à de grandes forces. En particulier dans le cas d'un râtelier complet (blocage total des bois flottants contre le râtelier uniquement) avec un écoulement et une considérable vitesse, la force devient importante.

Lors de l'estimation des forces dues à un tapis de bois flottant placés en amont et pressé, il est certes possible de formuler des approches de mécanique des fluides, mais jusqu'à présent avec (trop) d'inconnues, comme par exemple le coefficient de trainée C_w , la surface d'obstruction A ainsi qu'une réduction due à la perméabilité du blocage des bois flottants.

La littérature actuelle est encore lacunaire et ne convient pas à la conception pratique des râteliers en amont des ouvrages hydrauliques au fil de l'eau. Elle contient, entre autres, les approches mentionnées ci-après pour la détermination des forces :

- Gippel et al. (1996) se réfèrent au coefficient de résistance $C_w = R / (0.5 \rho u^2 LD)$ pour calculer la force hydrodynamique stationnaire au râtelier R , LD est la surface d'obstruction des bois flottants (produit de la longueur L et du diamètre D du tronc), une valeur inconnue de l'ingénieur chargé de la conception. Des barres représentants des troncs linéaires ainsi que des assemblages pour former des souches ont été testés et différents coefficients de trainée C_w ont été déterminés à cet effet. Selon les configurations, il en résulte des valeurs entre $C_w = 0.4$ et 1.2 pour les flux lents, ce qui semble sans importance en raison de l'encombrement plutôt faible (jusqu'à 30% de la section hydraulique). Le coefficient de résistance C_w avec une obstruction de bois flottants peut être déterminé à l'aide d'une formule empirique en fonction du C_w « non influencé » et du degré de blocage. Une série de tests spéciaux a en outre montré que C_w dépend également du nombre de Froude et de la profondeur d'écoulement, et peut tout juste atteindre $C_w = 5$ pour une combinaison extrême.
- USCE (1997) donne une approche pour le calcul des forces d'impact de différents éléments de bois flottants dans les centrales au fil de l'eau. 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 des bois flottants et soulignent l'hétérogénéité des données. Ils montrent l'influence du degré d'enfouissement, qui ne peut toutefois être déterminé que dans le modèle.
- L'impact dynamique maximal (enveloppe des forces mesurées dans le modèle) a été donné par Haehnel et Daly (2004) avec $F_M = 1550 u m^{0.5}$, 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'approche, qui est plus élevée pour les conditions fluviales que pour les courants de réservoir.



- 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 d'approche et de la position de la grille.
- Kälin et al. (2005) conçoivent un « tronc d'arbre normalisé » et le font rebondir verticalement sur un champ de tôles comme simplification d'une structure hydraulique en acier. L'accent est mis sur le dimensionnement des aménagements et non la force provoquée par des bois flottants.
- Des études concrètes sur l'impact et la résistance (supplémentaire) à l'écoulement résultant de la présence de bois flottants et de déchets de civilisation sont actuellement discutées dans la littérature, principalement pour les bâtiments (par exemple Nistor et al. 2017 et Wüthrich et al. 2020). Les données sous-jacentes ont été collectées au moyen d'essais de modélisation physique. Ces études démontrent que la connaissance des « densités » d'obstruction est nécessaire pour décrire les forces d'écoulement sur les bâtiments. Il apparaît en outre que ce n'est pas l'impact des bois flottants ("forest debris") sur le bâtiment qui constitue le cas de charge déterminant, mais la force d'écoulement supplémentaire due à la réduction de la perméabilité suite au déplacement de la section d'écoulement. Les auteurs indiquent, pour les bois flottants sans éléments en forme de conteneur (grands déchets de civilisation), un facteur de 2 en ce qui concerne la charge sur le bâtiment, par rapport à la situation initiale sans bois (eau pure).
- Spreizer et al. (2019) ont équipé des éléments en bois de capteurs d'accélération 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 $2g$ pendant l'expérience décrite, 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 flottants sur les ponts en arc en pierre à une seule travée. Le bois flottant augmente ces forces, et peut notamment aussi détacher des pierres individuelles de la structure en les heurtant.

L'étude précédente s'est déjà concentrée sur les questions étudiées, mais dans des conditions de bord légèrement différentes. Elle est donc résumée ici plus en détail. Pfister et al. (2022) ont étudié sur modèle physique la force exercée par un blocage complet d'un volume extrême de bois flottants contre une structure de type râtelier (une pile cylindrique) positionnée en amont d'un déversoir (d'un évacuateur de crue). Plusieurs paramètres ont été variés systématiquement comme le débit, la largeur relative des passes, l'espacement relatif du râtelier et le positionnement du râtelier. Il en ressort que le coefficient de trainée c_H est fonction de l'espacement relatif du râtelier comme le montre la Figure 1.

Les forces dues aux bois flottants (sans la composante hydrodynamique) sur les râteliers peuvent être formulées avec l'approche courante de la force de résistance à l'écoulement (force de trainée). Pour un volume extrême de bois flottants, la force maximale suivante (déduite d'une enveloppe) agissant sur une barre de râtelier est de $f_B = (20rb_r/L_M)\rho A_B U_B^2/2$. Le terme entre parenthèses correspond au coefficient de trainée à l'écoulement c_H (avec une présence de bois flottants). Cette équation inclut l'effet de la vitesse d'approche et de la position en amont du râtelier. L'espacement relatif des barres de râtelier est pris en compte par le terme b_r/L_M , (rapport entre la largeur entre les barres de râtelier et la longueur maximale des troncs). La surface d'obstruction A_B est définie par la plus petite valeur entre $D_M L_M$ (grande distance entre les barres, $b_r > L_M$) et $D_M b_r$ (faible distance entre les barres $b_r < L_M$), avec D_M le diamètre maximal des troncs. La vitesse U_B est la vitesse à la surface de l'eau à l'endroit de la barre de râtelier.

Le facteur r indique le type de râtelier, avec $r=1$ pour le râtelier complet ($0.40 < b_r/L_M < 0.80$) ainsi que $r=0.5$ pour le râtelier complet ($0.80 \leq b_r/L_M \leq 1.54$). La plage de valeurs testées est de $0.40 < b_r/L_M < 1.54$.



Pour les espacements relatifs plus larges ($b_r/L_M > 1.54$), il s'ensuit un terme constant entre parenthèses (c.-à-d. $c_H=17$).

Les explications ci-dessus peuvent également être interprétées de manière plus pragmatique. Le coefficient de trainée à l'écoulement c_H pour les bois flottants peut de manière simplifiée être égal à $c_H=17$. Pratiquement tous nos points testés et ceux de NCHRP (2000) sont alors couverts, à deux exceptions près. L'équation relative à la force induite par les bois flottants par barres de râtelier barreau devient alors : $f_B \leq 17 \rho A_B U_B^2 / 2$.

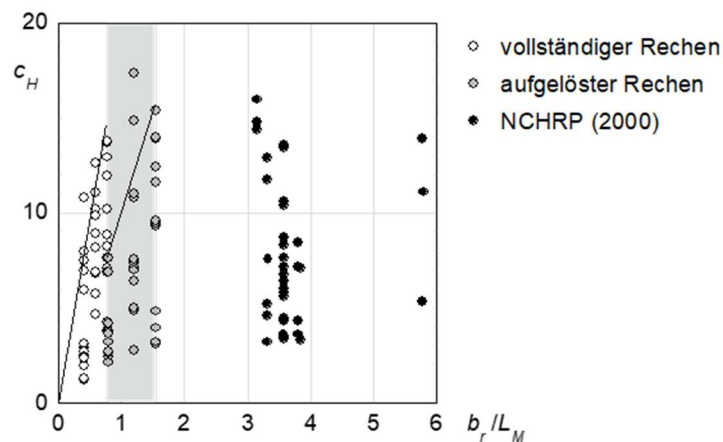


Figure 1. Coefficient de trainée en fonction de l'espacement relatif du râtelier b_r/L_M . (Pfister et al. 2022).

2.2 Besoin de recherche et question-clés

L'étude de littérature résume que les forces des bois flottants bloqués contre un ouvrage sont principalement fonction de la masse de bois flottants, de la vitesse d'approche et de la section bloquée, des paramètres généralement inconnus lors d'un dimensionnement.

Les forces produites par des blocages de bois flottants contre des râteliers complets et partiels ne sont pas encore clairement spécifiées par la littérature actuelle dans le cadre d'un écoulement de type cours d'eau.

Les râteliers de protection n'ont pas d'approche généralisées pour leur dimensionnement face aux forces des bois flottants en rivières. Les études sur la force d'impact des bois flottants contre la structure se concentre majoritairement sur des obstructions avec des (piliers de) ponts, des bois individuels ou des petites quantités de bois flottants.

Beaucoup de paramètres sont inconnus pour l'ingénieur lors du dimensionnement d'un râtelier pour l'expression d'un coefficient de trainée c_H . Les questions de recherche suivantes en découlent toujours orientés dans la direction « extrême » (quantités de bois flottants importantes, de grands débits et des passes étroites) :

- Comment se comporte un volume extrême de bois flottants bloqué contre un râtelier en rivière ?
- Quelle est la surélévation observée par une telle obstruction et comment la définir de manière adimensionnelle ?



- Quelle est la force des bois flottants sur un râtelier « en rivière » ?
- Quelle est l'influence des différents paramètres sur l'expression de la force (le débit et conséquemment de la vitesse d'approche, la largeur des passes entre les piliers, la position ainsi que le type de râtelier et la caractéristique des bois flottants) ?
- Une différence entre un râtelier « complet » et « partiel » est-elle observée ?
- Est-il possible de mettre les résultats obtenus en lien avec les observations documentées dans la littérature pour des situations relativement similaires ?
- Un râtelier en rivière peut-il être traité avec la même approche qu'un râtelier dans un réservoir, par exemple en insérant une fonction basée sur le nombre de Froude amont ?



3 Méthode

3.1 Modèle réduit

Le même modèle réduit comme dans les études préliminaires a été utilisé. Il est décrit en détail dans nos rapports antérieurs. Il consiste d'un canal droit et horizontal, installé à la Plateforme des Constructions Hydrauliques (PL-LCH) de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)

Le canal a été utilisé pour les expériences avec les caractéristiques suivantes :

- 10 m de longueur, 1.50 m de largeur et de 0.70 m de hauteur
- Un déversoir standard situé transversalement à l'aval du canal avec une charge de dimensionnement du déversoir de $H_D=0.15$ m.
- Sur le déversoir, des piliers à tête ronde d'une épaisseur de 0.04 m sont amovibles dans le sens de la largeur du canal afin de créer les largeurs de passes b (des vannes) souhaitées.
- **Deux hauteurs de crête du déversoir (pelle W variable, mise en place d'un faux-fonds) supplémentaires sont étudiées soit $W=0.05$ m, soit $W=0.15$ m (Figure 2). L'étude antérieure a été effectuée avec une pelle de $W=0.42$ m.** Ses données sont reprises ici pour des raisons de comparaison. La réduction de la pelle a pour effet sur la mesure d'augmenter le courant de l'écoulement, c'est-à-dire de créer une vitesse amont. Ceci transforme la condition de bord amont du type retenue en type cours d'eau.
- Un limnimètre gradué au millimètre (précision de mesure ± 1 mm) sert à mesurer le niveau d'eau amont dans le canal. Un débitmètre magnétique inductif (précision de mesure $\pm 0.5\%$ FS, sur le circuit général du laboratoire) mesure le débit franchissant le déversoir. Il est situé sur le circuit général du laboratoire. Une jauge de contrainte mesure la masse issue du système de mesure de force connecté au râtelier.
- Les bois flottants utilisés dans cette étude sont similaires aux précédentes études (Pfister et al., 2019, 2022, Pfister et Bénet 2021) et forment un grand volume hétérogène. La composition du volume accentue les bois flottants plutôt longs dans le cadre des phénomènes extrêmes et est caractéristique des phénomènes extrêmes. Les troncs les plus grands utilisés dans le modèle mesurent $L_M=0.433$ en longueur et $D_M=0.022$ m comme diamètre.
- Le système de mesure de force sur râtelier est le même que celui utilisé par Pfister et al. (2022). Il est directement assimilé à un râtelier en rivière. Le système est relié par un bras de levier à une jauge de contrainte qui mesure les masses toutes les secondes (traduites en force par la multiplication de l'accélération gravitationnelle $g=9.81$).
- Deux types de râtelier ont été testés, notamment le râtelier complet composé d'une barre devant chaque pilier et le râtelier partiel, avec seulement une barre devant chaque 2^{ème} pilier.
- Les positions du râtelier testé sont semblables à Pfister et al. (2022) avec trois configurations appelées « proche », « intermédiaire » et « distant ».

Un schéma est disponible à la Figure 3 avec l'ensemble de la nomenclature appliquée.

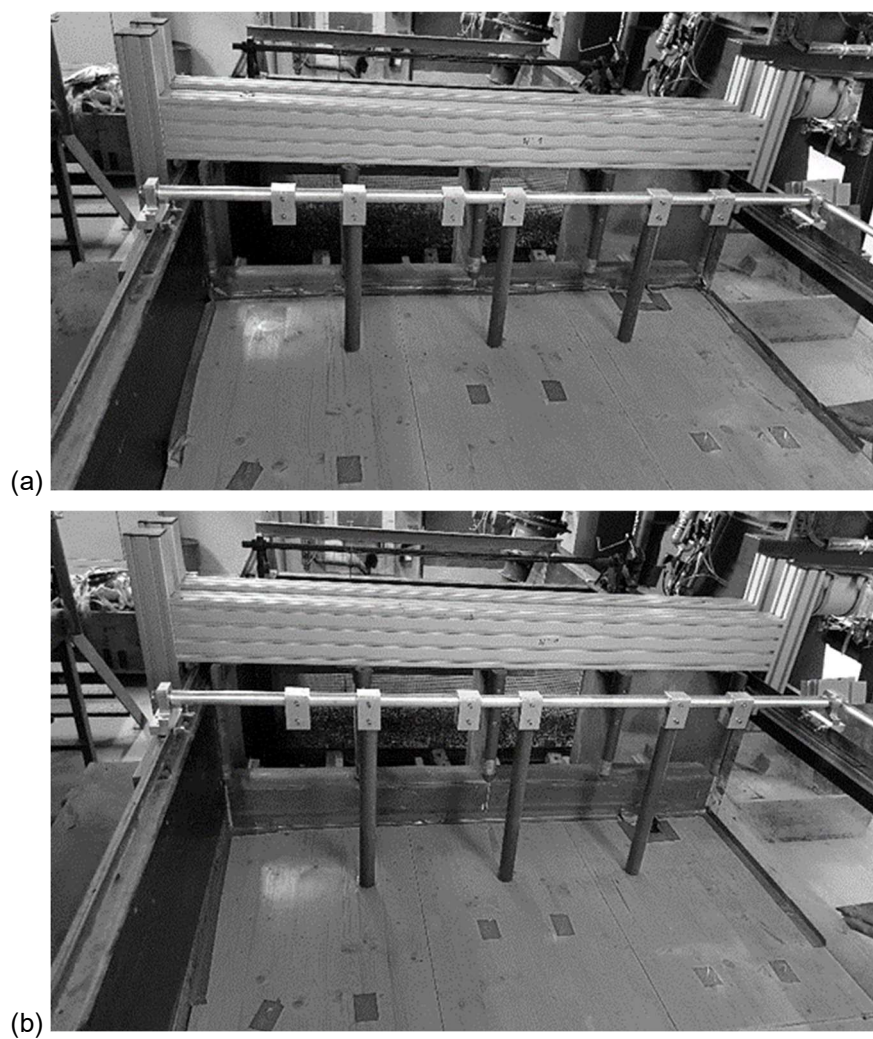


Figure 2. Vue de l'amont du canal d'essai, avec des pelles variables de (a) $W=0.05$ m et (b) $W=0.15$ m. Ceci sert à varier la vitesse de l'écoulement s'approchant du déversoir. Autrement, les configurations sont identiques.

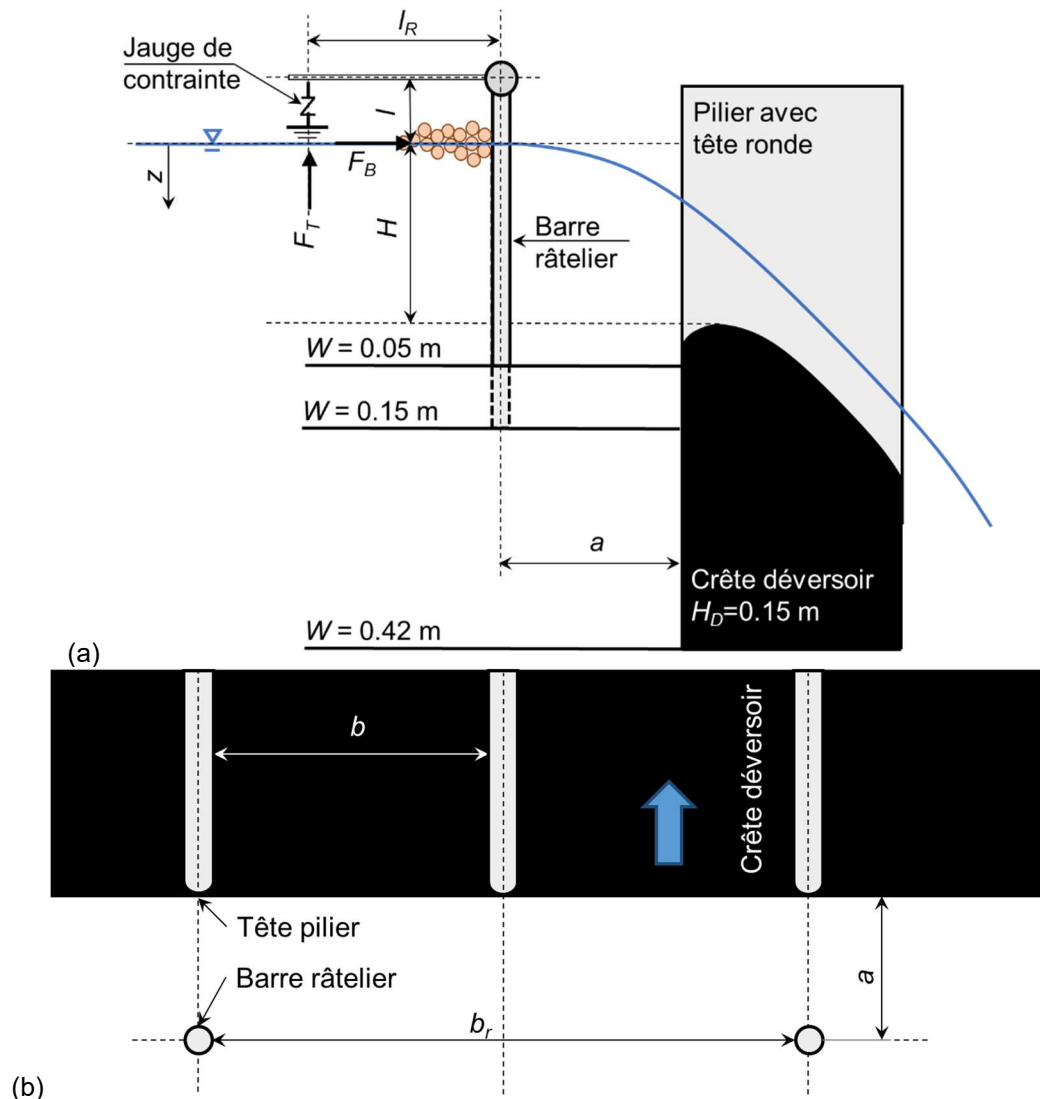


Figure 3. Schéma du déversoir et nomenclature, (a) coupe, et (b) vue en plan avec un râtelier partiel (une barre devant chaque deuxième pilier).

3.2 Descriptif des essais

Les paramètres clés ont fait l'objet d'une variation systématique et indépendante afin de définir leurs influences respectives sur les résultats obtenus :

- Trois charges sur le déversoir ont été définies, réciproquement trois débits (exprimés en débit relatif $\chi = H/H_D$), de la manière suivante : $H_1 = 0.05$ m étant $\chi = 0.33$, $H_2 = 0.10$ m étant $\chi = 0.67$ et $H_3 = H_D = 0.15$ m étant $\chi = 1$.
- Deux largeurs de passe sont étudiées, exprimées avec les rapports b/L_M (b étant la largeur des passes et L_M la longueur maximale des troncs) qui sont $b/L_M = 0.60$, et 0.77 . Toutes les largeurs étudiées sont volontairement inférieures au critère de Godtland et Tesaker (1994). Les études précédentes ont aussi considéré $b/L_M = 0.40$. Des parois latérales au déversoir ont dû être



installées pour cette configuration afin de réduire la largeur de la section d'écoulement au déversoir. Ceci génère une vitesse amont au déversoir étant différente de celle dans le canal, ce qui affecte la densité des bois bloqués pour les tests présents, car la vitesse dans le canal est maintenant déterminante. La configuration « étroite » ($b/L_M=0.40$) est donc exclue de la présente série de tests (les tests ont été faites, mais la largeur du canal étant différente de celle du déversoir empêche la considération dans l'analyse).

- Trois positions a de râteliers (distance entre râtelier et pelle du déversoir, avancement) étant « proche », « intermédiaire » et « distant ».
- Deux types de râteliers appelés « complet » et « partiel » exprimés par le rapport b_r/L_M (b_r étant la distance entre les barres de râtelier et L_M la longueur maximale des troncs, Figure 3), compris entre $0.60 \leq b_r/L_M \leq 1.64$.
- Une seule apparition de bois est testée, définie comme « extrême »
- Deux hauteurs de la crête du déversoir W sont testées avec $W=0.05$ m et 0.15 m, exprimé avec le rapport H_D/W (rapport entre la charge de dimensionnement du déversoir $H_D=0.15$ m et la hauteur de la crête du déversoir W), avec $H_D/W=1$ (moyenne pelle) et 3 (faible pelle). Les deux correspondent à une situation amont similaire à un cours d'eau. La configuration avec une grande pelle de $W=0.42$ m et $H_D/W=0.36$ a été investiguée dans les études précédentes et les données sont reprises. La grande pelle représente une retenue en amont.

La systématique de variation des paramètres étudiés donne le programme de tests suivant :

1. $W=0.05$ m
 - Râtelier complet
 - $b/L_M=0.60$
 - Tests 1 – 6 : proche ; $\chi=1/3$, $2/3$ et $3/3$
 - Tests 7 – 12 : intermédiaire ; $\chi=1/3$, $2/3$ et $3/3$
 - Tests 13 – 18 : distant ; $\chi=1/3$, $2/3$ et $3/3$
 - $b/L_M=0.77$
 - Tests 19 – 24 : proche ; $\chi=1/3$, $2/3$ et $3/3$
 - Tests 25 – 30 : intermédiaire ; $\chi=1/3$, $2/3$ et $3/3$
 - Tests 31 – 36 : distant ; $\chi=1/3$, $2/3$ et $3/3$
 - $b/L_M=0.40$
 - Tests 37 – 42 : proche ; $\chi=1/3$, $2/3$ et $3/3$
 - Tests 43 – 48 : intermédiaire ; $\chi=1/3$, $2/3$ et $3/3$
 - Tests 49 – 54 : distant ; $\chi=1/3$, $2/3$ et $3/3$
 - Râtelier partiel
 - $b/L_M=0.60$
 - Tests 55 – 60 : proche ; $\chi=1/3$, $2/3$ et $3/3$
 - Tests 61 – 66 : intermédiaire ; $\chi=1/3$, $2/3$ et $3/3$
 - Tests 67 – 72 : distant ; $\chi=1/3$, $2/3$ et $3/3$



- $b/L_M=0.77$
 - Tests 73 – 78 : proche ; $\chi=1/3, 2/3$ et $3/3$
 - Tests 79 – 84 : intermédiaire ; $\chi=1/3, 2/3$ et $3/3$
 - Tests 85 – 90 : distant ; $\chi=1/3, 2/3$ et $3/3$
 - $b/L_M=0.40$
 - Tests 91 – 96 : proche ; $\chi=1/3, 2/3$ et $3/3$
 - Tests 97 – 102 : intermédiaire ; $\chi=1/3, 2/3$ et $3/3$
 - Tests 103 – 108 : distant ; $\chi=1/3, 2/3$ et $3/3$
2. $W=0.15$ m
- Râtelier complet
 - $b/L_M=0.77$
 - Tests 127 – 132 : proche ; $\chi=1/3, 2/3$ et $3/3$
 - Tests 133 – 138 : intermédiaire ; $\chi=1/3, 2/3$ et $3/3$
 - Tests 139 – 144 : distant ; $\chi=1/3, 2/3$ et $3/3$
 - $b/L_M=0.40$
 - Tests 145 – 150 : proche ; $\chi=1/3, 2/3$ et $3/3$
 - Tests 151 – 156 : intermédiaire ; $\chi=1/3, 2/3$ et $3/3$
 - Tests 157 – 162 : distant ; $\chi=1/3, 2/3$ et $3/3$
 -
 - Râtelier partiel
 - $b/L_M=0.77$
 - Tests 181 – 186 : proche ; $\chi=1/3, 2/3$ et $3/3$
 - Tests 187 – 192 : intermédiaire ; $\chi=1/3, 2/3$ et $3/3$
 - Tests 193 – 198 : distant ; $\chi=1/3, 2/3$ et $3/3$
 - $b/L_M=0.40$
 - Tests 199 – 204 : proche ; $\chi=1/3, 2/3$ et $3/3$
 - Tests 205 – 210 : intermédiaire ; $\chi=1/3, 2/3$ et $3/3$
 - Tests 211 – 216 : distant ; $\chi=1/3, 2/3$ et $3/3$

Au total, 90 combinaisons de paramètres ont été étudiées, résultant avec les répétitions (2 fois par tests) en 180 tests effectués. Toutes les combinaisons prévues n'ont pas pu être testée sur le modèle (les limites du modèle étant dépassée). La procédure de test est similaire à celle présentée par Pfister et al. (2022).



4 Résultats

4.1 Observations

Diverses observations ont été tirées visuellement du modèle réduit pendant les expériences. Il semble pertinent de les relever et d'illustrer les propos avec quelques photos.

Les bois flottants forment un « tapis » sur toute la largeur du canal car ils sont retenus par le râtelier de protection et les piliers de l'évacuateur de crue.

- La longueur horizontale de ce tapis (observée depuis l'amont) varie en fonction du débit (réciproquement de la vitesse d'écoulement) mis en place dans le canal. La tendance est à la réduction de la longueur du tapis avec l'augmentation du débit (Figure 4). Cette observation est apparue pour l'ensemble des configurations testées. L'expression de la longueur du tapis en fonction de la vitesse d'écoulement à la Figure 4c montre une réduction de la longueur du tapis avec l'augmentation de la vitesse d'écoulement, indépendamment des autres paramètres testés. Pour des vitesses proches de $u \approx 0.10$ m/s, la longueur du tapis est comprise entre 0.95 et 1.15 m, alors que pour des vitesses proches de $u \approx 0.40$ m/s, la longueur du tapis est comprise entre 0.70 et 0.90 m.
- L'épaisseur verticale du tapis formé par les bois flottants (observée latéralement à travers une vitre du canal) varie également en fonction du débit. L'épaisseur du tapis augmente en fonction du débit, ce qui explique la réduction de la longueur du tapis, étant donné que le volume de bois flottants bloqués reste constant (Figure 5). La quantification de l'épaisseur verticale fait objet d'une discussion détaillée plus tard.
- L'espacement des barres de râtelier b_r influence le positionnement des premiers bois flottants contre le râtelier. Si l'espacement est petit ($b_r/L_M \leq 0.77$), les bois flottants ont plutôt tendance à rester bloqués uniquement au niveau du râtelier (Figure 6a). Si l'espacement est plus grand ($b_r/L_M > 0.77$), les bois flottants peuvent également s'appuyer directement sur les piliers du déversoir (Figure 6b). Il faut préciser que plus l'épaisseur du tapis est grande, moins les bois flottants sont libres de manière individuelle.

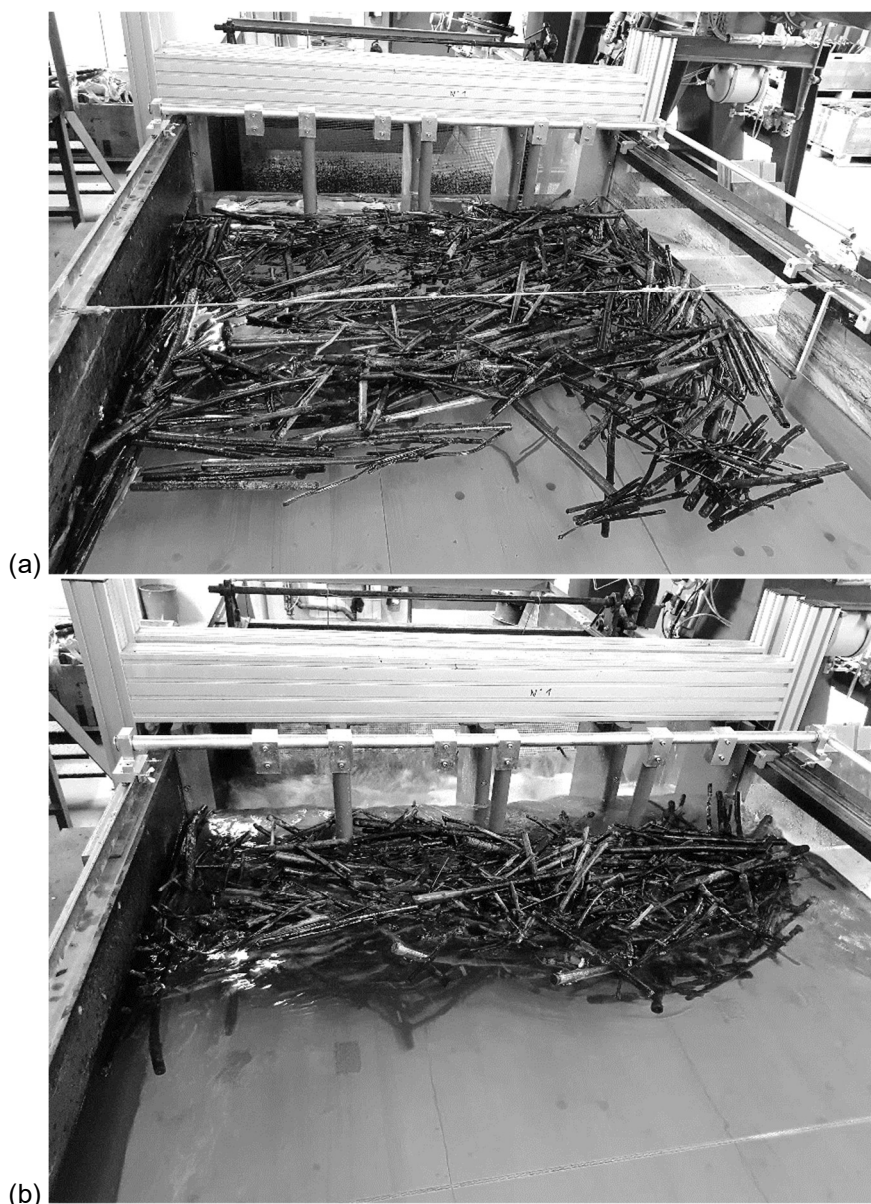
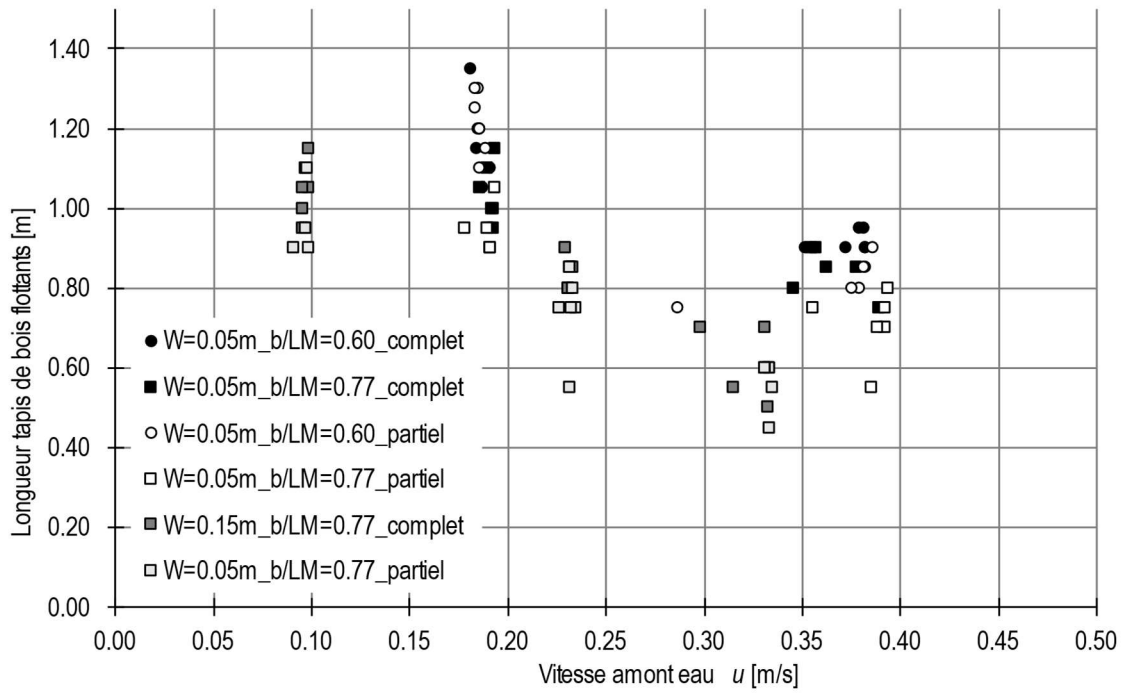


Figure 4. [Suite sur page suivante]



(c)

Figure 4. Volume de bois flottants bloqués sur modèle, vue depuis l'amont : pour (a) $\chi \approx 0.33$ (test 128) le tapis formé par les bois flottants est relativement long (extension vers l'amont), (b) $\chi \approx 1$ (test 131) le tapis est court. (c) Schéma de la longueur du tapis sur le modèle en fonction de la vitesse (dans les dimensions du modèle). Le tapis formé par les bois flottants est plus compact et court si la vitesse de l'écoulement augmente, pour des conditions autrement identiques.

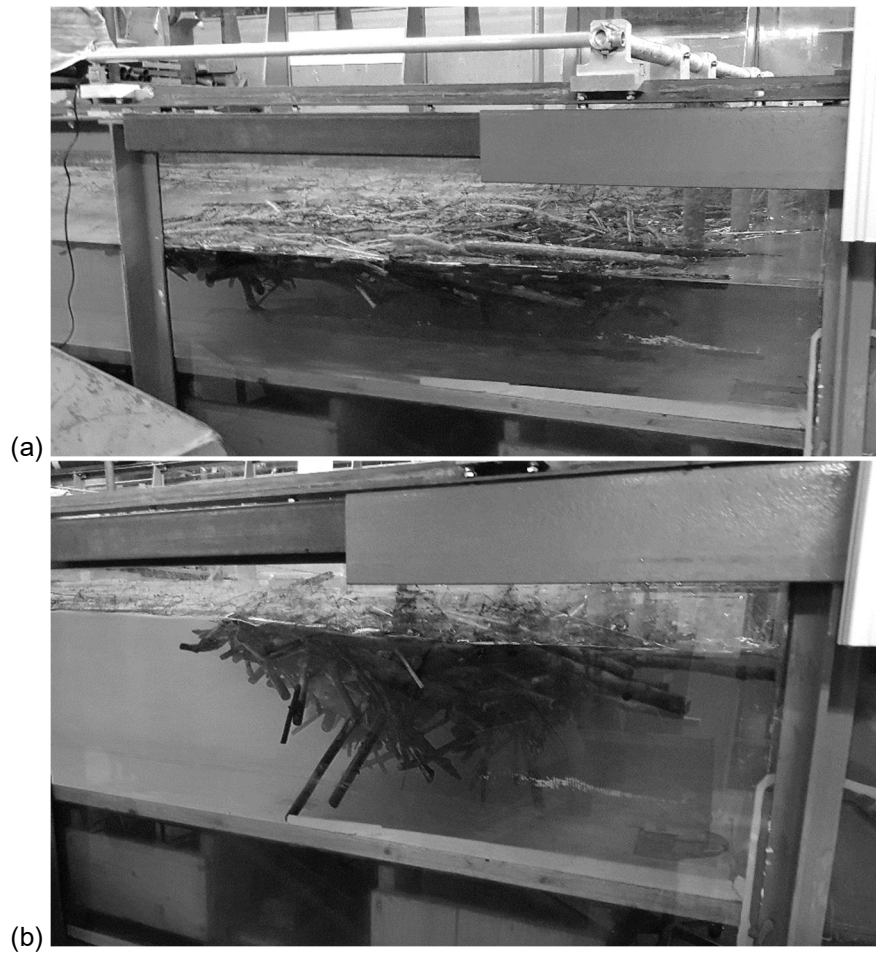


Figure 5. Vue latérale (verticale) du volume des bois flottants bloqués. Pour (a) $\chi \approx 0.33$ (test 139) l'épaisseur verticale du tapis formé par les bois flottants est faible et pour (b) $\chi \approx 1$ (test 143) importante, pour des conditions autrement identiques.

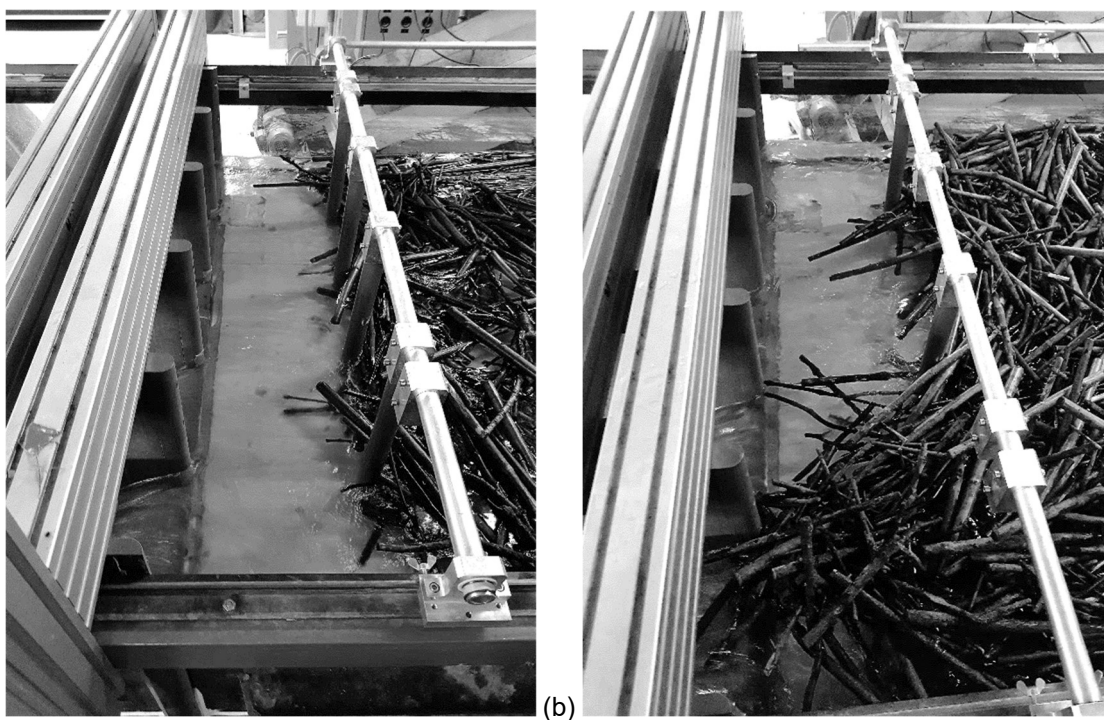


Figure 6. Vue de la zone entre les piliers du déversoir et le râtelier : Pour (a) $b/L_M=0.60$ (râtelier complet, test 14) les bois flottants ne dépassent que légèrement du râtelier, et (b) $b/L_M=1.29$ (râtelier partiel, test 69) les bois flottants s'appuient partiellement contre les piliers du déversoir, pour des conditions autrement identiques.



4.2 Surélévation amont

4.2.1 Fonctionnement hydraulique (eau sans bois ni râtelier)

La mise en place d'un faux-fonds dans le canal (diminution de la hauteur de la pelle W) a pour conséquence de ne plus respecter la condition suivante de Vischer et Hager (1999) qui mentionne que la hauteur de crête W doit être égale ou supérieure au double de la charge H :

$$W \geq 2H \quad (1)$$

Dès lors, l'effet de la vitesse amont doit être pris en considération dans le calcul du débit Q selon l'équation 2 (équation de Poleni complétée) :

$$Q = C_d b_e \sqrt{2g \left[\left(h + \left(\frac{u^2}{2g} \right)^3 \right) - \left(\frac{u^2}{2g} \right)^3 \right]} \quad (2)$$

Avec C_d étant le coefficient de déversoir (Equation 6), b_e la largeur hydraulique (Equation 3) des passes, g l'accélération gravitationnelle, h la hauteur d'eau (*différent* de la charge H suite à la vitesse de l'écoulement) et u la vitesse amont (Equation 4).

Vischer et Hager (1999) calcule une largeur effective b_e pour prendre en compte l'influence des piliers (zones de séparation hydrauliquement inactives) sur l'écoulement :

$$b_e = b - 2K_p H \quad (3)$$

Avec b la largeur d'ouverture des passes, K_p un facteur de réduction et H la charge hydraulique. La vitesse amont u est calculée de la manière suivante (application de la continuité) :

$$u = \frac{Q}{B(W + h)} \quad (4)$$

Avec W la hauteur de crête du déversoir (la pelle), h la hauteur d'eau (entre la crête du déversoir et la surface d'eau) et $B=1.5$ m la largeur totale du canal.

Avec les valeurs mesurées sur le modèle réduit, il est possible de définir un coefficient de déversoir C_d (transformation de l'Equation 2) :

$$C_d = \frac{Q}{b_e \sqrt{2g \left[\left(h + \left(\frac{u^2}{2g} \right)^3 \right) - \left(\frac{u^2}{2g} \right)^3 \right]}} \quad (5)$$



Vischer et Hager (1999) définissent un coefficient de déversoir C_d pour des conditions libres, c'est-à-dire sans effets de la vitesse amont (charge cinétique) ni aval (noyé) :

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

Ce coefficient est applicable pour la plus grande pelle testée dans les essais des études précédentes, étant $W=0.42$ m, car $W>2H$. Cette condition n'est plus respectée pour $W=0.05$ et 0.15 m, donc C_d reste à être adapté selon la discussion ci-dessous. Le débit relatif χ est défini comme :

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

Avec H la charge hydraulique d'un certain débit et H_D étant la charge de dimensionnement du déversoir (ici $H_D=0.15$ m). La Figure 7 montre la corrélation entre les valeurs de C_d mesurées (sur le modèle réduit, Equation 5) et calculées (selon Vischer et Hager 1999, Equation 6). Les pelles sont séparées par une nuance de gris (gris foncé pour $W=0.15$ m et gris clair pour $W=0.05$ m). Il reste à noter que les tests des études précédentes ont été effectués avec une pelle de $W=0.42$ m, ce qui correspond à une situation libre (idéale) et suit la théorie de Vischer et Hager (1999).

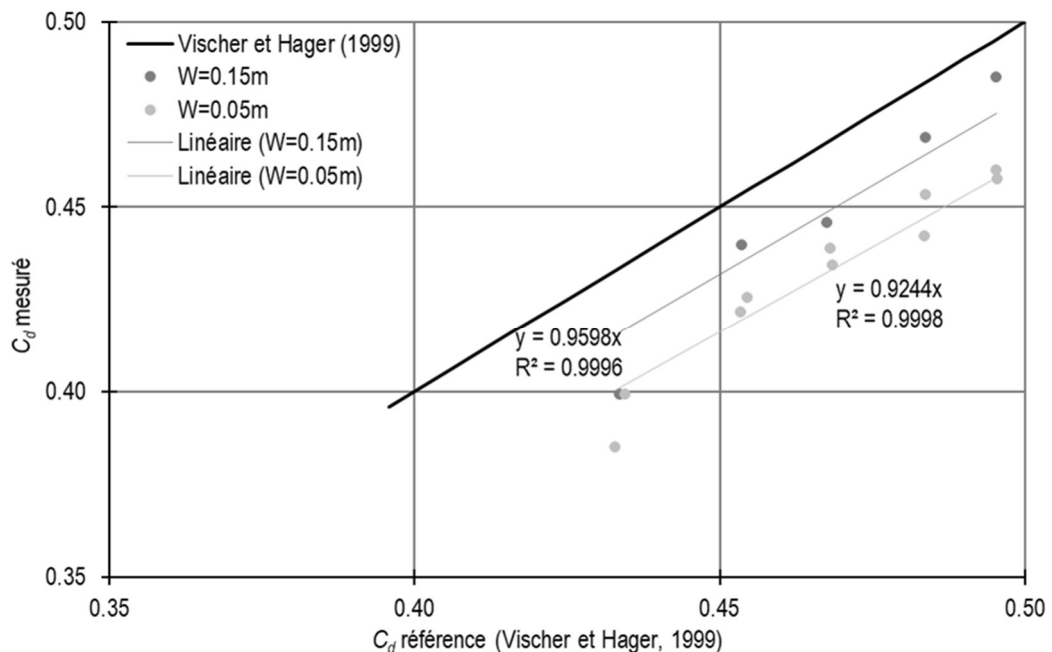


Figure 7. Relation entre les coefficients de déversoir C_d calculés selon Vischer et Hager (1999, Equation 6) et les coefficients de déversoir C_d mesurés sur le modèle (Equation 5), pour l'étude de l'influence des différentes pelles W .



Sur la Figure 7, un écart quasiment linéaire est constaté entre les valeurs de référence (ligne noire) et les valeurs mesurées (nuances de gris). Cet écart est distinct pour chaque pelle W . Exprimé linéairement, le coefficient du déversoir avec $W=0.15$ m vaut 96% du C_d avec une grande pelle, et 92% pour $W=0.05$ m.

La Figure 8 présente un coefficient de réduction linéaire $C_{H/W}$ du coefficient de déversoir C_d (précédemment observée à la Figure 7) en fonction de la hauteur de crête relative H_D/W . Sur la base des valeurs observées, l'Equation 8 est proposée avec la condition de bord suivante : Pour $H_D/W=0.5$, $C_{H/W}=1$ le critère de Vischer et Hager est respecté (Equation 1).

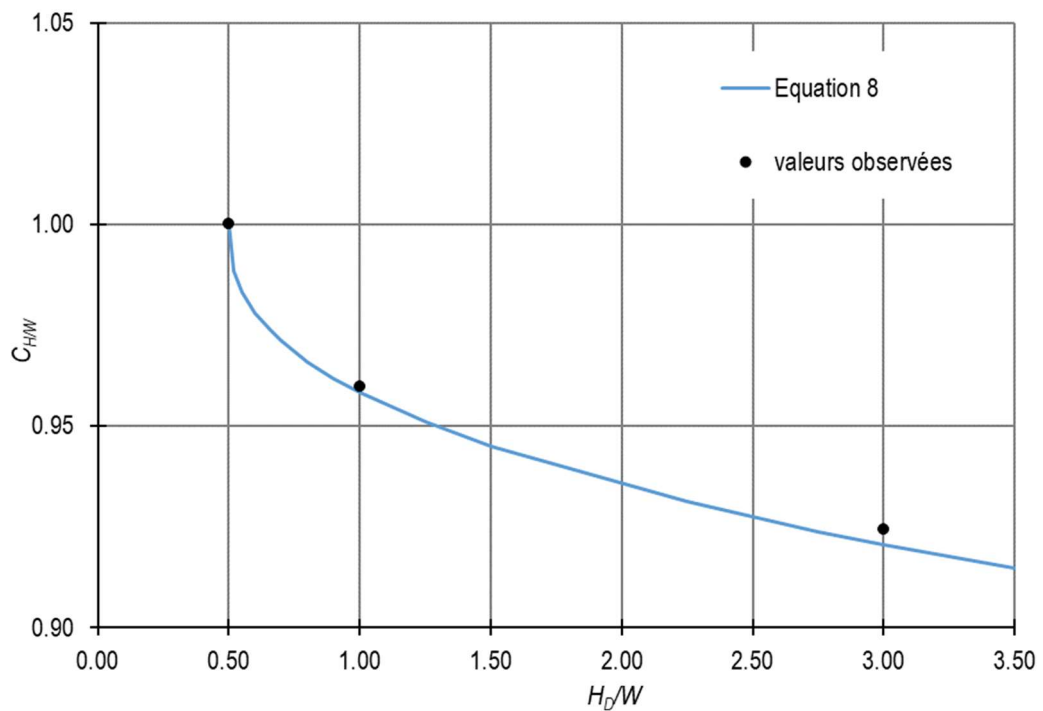


Figure 8. Définition de l'Equation 8 sur la base des valeurs observées pour exprimer un coefficient de réduction $C_{H/W}$ liée au coefficient de déversoir C_d en fonction de la hauteur de crête relative H_D/W .

La tendance proposée pour le coefficient de réduction $C_{H/W}$ est la suivante (Figure 8) :

$$C_{H/W} = \left[1 - 0.055 \left(\frac{H_D}{W} - 0.5 \right)^{0.4} \right] \quad (8)$$

Avec H_D la charge de dimensionnement du déversoir et W la pelle du déversoir. L'équation 8 est valide pour $0.5 < H_D/W \leq 3$, domaine des valeurs étudiées sur le modèle réduit.

Le coefficient de déversoir calculé devient alors pour des « faibles » pelles ($W < 2H$, ajout du coefficient de réduction $C_{H/W}$ pour le coefficient de déversoir C_d selon l'Equation 6) :



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

Finalement, pour valider la modification apportée au calcul du coefficient de déversoir C_d , la Figure 9 montre la corrélation entre les coefficients de déversoir calculés (Equation 9) et mesurés (Equation 5). La corrélation est bonne avec un coefficient de détermination $R^2 \approx 1$.

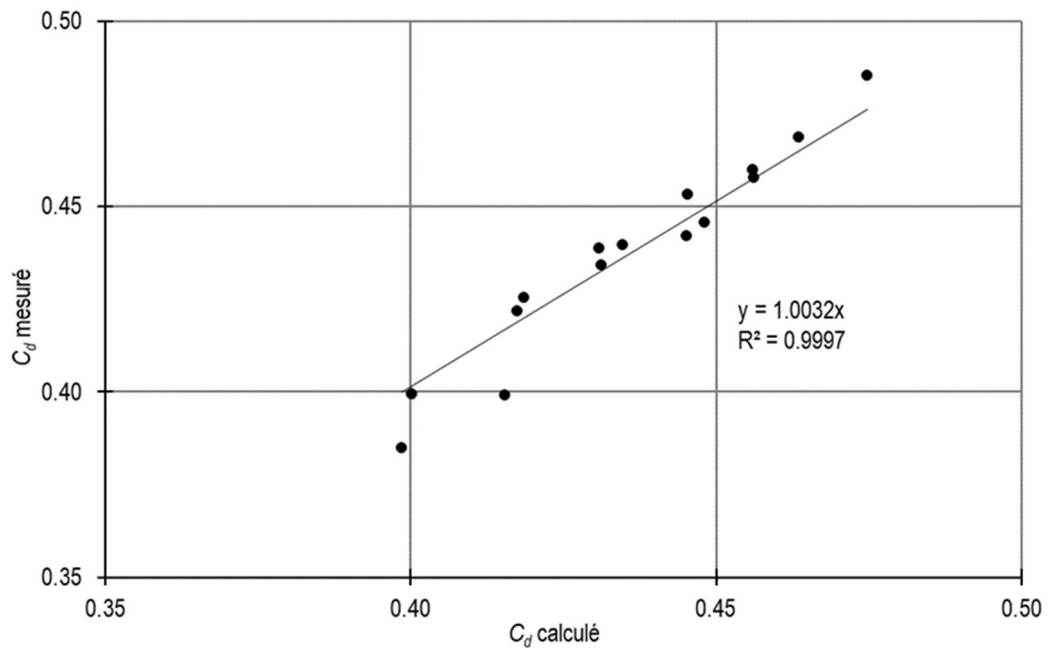


Figure 9. Corrélation entre les coefficients de déversoir C_d calculés (équation 9) et mesurés (équation 5).

4.2.2 Avec bois flottants mais sans râtelier

Globalement, les valeurs C_d mesurées (Equation 5, avec du bois) sont apparues *a priori* hétérogènes en fonction des largeurs effectives testées b/L_M .

Pour rappel, des parois ont été installés sur les 2 côtés du déversoir afin de réduire la largeur de déversement pour obtenir la configuration $b/L_M=0.40$, produisant des vitesses sur le déversoir et dans le canal qui étaient différentes suites aux largeurs variables. Conséquemment, la largeur relative $b/L_M=0.40$ n'est plus considérée dans des analyses.

Il s'agit dans un premier temps des tests sans râtelier avec un blocage d'un volume extrême de bois flottants (données dans l'annexe), pour connaître l'effet d'un blocage sans mise en place de râtelier. Les données de Pfister et Bénét (2021) ont été utilisées pour la hauteur de crête effective $H_D/W=0.35$ (grande pelle de $W=0.42$ m), avec seulement les valeurs de tests des conditions étudiées ici, c'est-à-dire volume de bois maximale de $4V$ (Pfister et al. 2019) et des largeurs effectives de $b/L_M=0.60$ et $b/L_M=0.77$.

La Figure 10 montre le coefficient de déversoir C_d en fonction du débit relatif χ avec des nuances de gris pour chaque hauteur de crête du déversoir effective H_D/W : Noir pour $H_D/W=0.35$ (grande pelle),



gris foncé pour 1 (moyenne pelle), et gris clair pour 3 (faible pelle). Il est observé que les coefficients de déversoir C_d pour un déversoir complètement obstrué par des bois flottants sont proches d'une constante en fonction du débit relatif χ par pelle relative H_D/W . Pfister et al. (2019) ont déjà fait ce constat dans le cadre d'une approche avec des conditions de bord dites « réservoir » pour $H_D/W=0.35$ (grande pelle).

La pelle relative de $H_D/W=3$ (correspondante à la petite pelle de $W=0.05$ m, gris clair) présente les plus petits coefficients de déversoir C_d . Cette observation s'explique par des vitesses d'approche plus élevées qui ont plus de capacité à former des blocages de bois flottants sur toute la hauteur d'écoulement, ce qui perturbe beaucoup plus l'écoulement au déversoir.

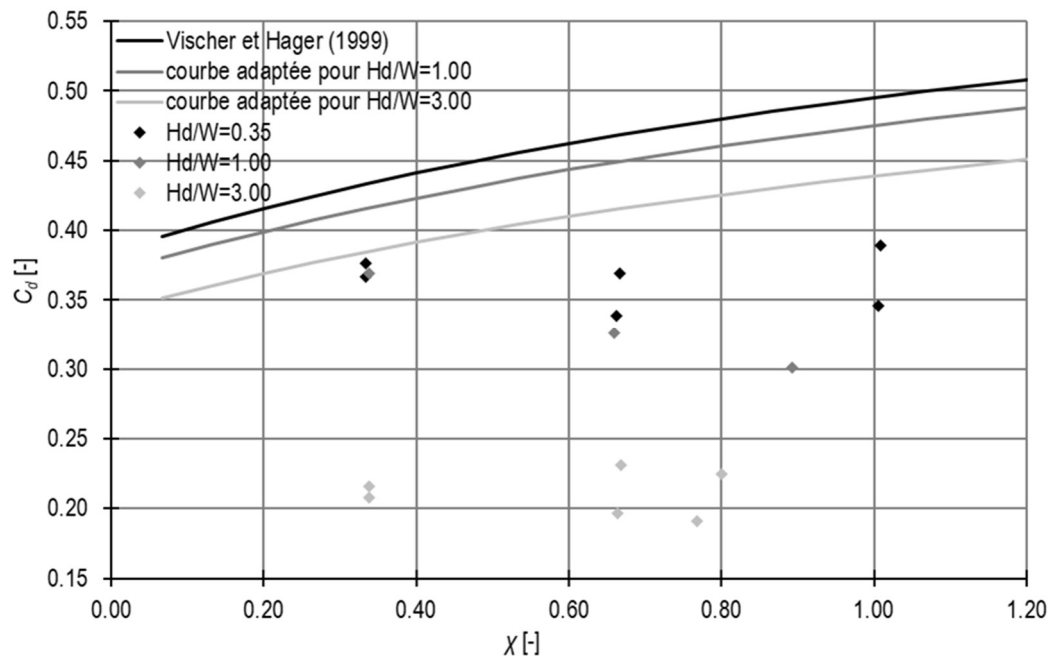


Figure 10. Coefficients de déversoir C_d en fonction du débit relatif χ , pour les différentes pelles relatives, avec $H_D/W=0.35$ en noir, $H_D/W=1$ en gris foncé et $H_D/W=3$ en gris clair. Courbes : sans bois flottants ; points : avec bois flottants.

En appliquant la même approche que Pfister et al. (2019), c'est-à-dire calculer une valeur moyenne des coefficients de déversoir C_d diminué de l'écart-type pour chaque pelle relative H_D/W , les valeurs suivantes sont obtenues (moyenne des points de la Figure 10) :

- $C_d=0.345$ pour $H_D/W=0.35$; Pfister et al. (2019) recommande $C_d=0.36$, mais ici seules les valeurs pour $b/L_M=0.60$ et $b/L_M=0.77$, avec un volume extrême (de 4V) sont prises en considération.
- $C_d=0.298$ pour $H_D/W=1$.
- $C_d=0.196$ pour $H_D/W=3$.



La Figure 11 montre les coefficients de déversoir C_d (obtenus selon l'approche de Pfister et al. 2019) en fonction de la pelle relative H_D/W . Les points résultants du modèle réduit sont indiqués en noir et une équation est proposée (Equation 10) avec les conditions de bords suivantes :

- Pour $H_D/W=0.5$ nous assumons $C_d=0.345$. Cette valeur n'est pas testée mais il s'agit d'une distinction entre des conditions d'approche de type réservoir et de type canal selon le critère de Vischer et Hager (Equation 1).
- L'équation est valable pour $0.5 < H_D/W < 3$, domaine des valeurs étudiés sur le modèle réduit.

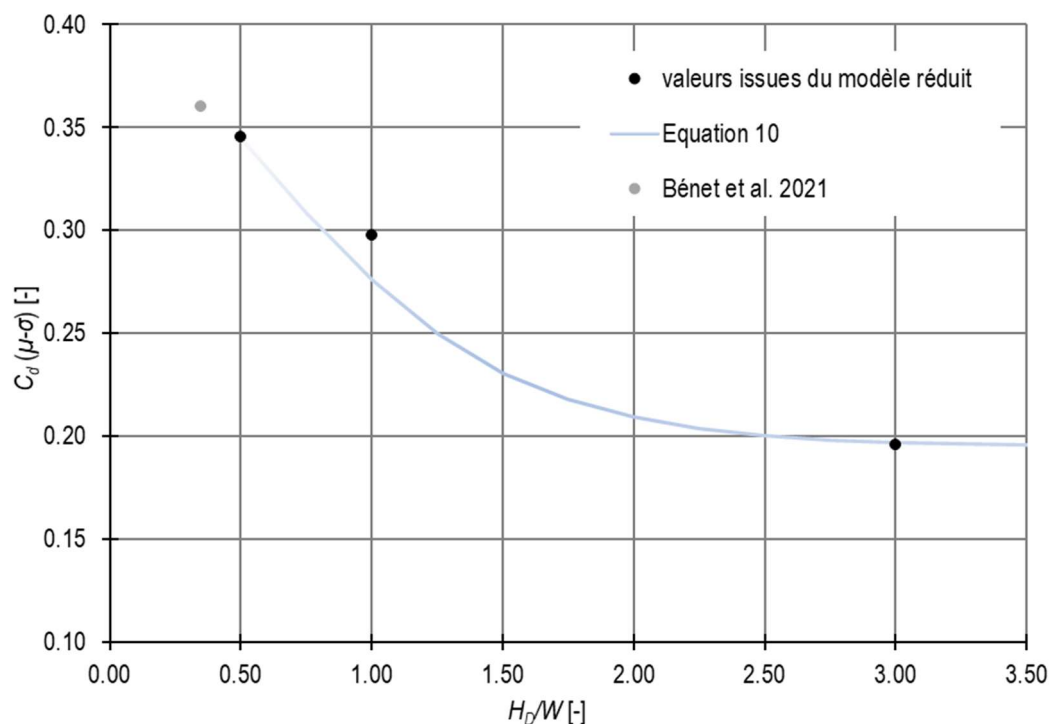


Figure 11. Coefficients de déversoir C_d (définies selon l'approche de Pfister et al. 2019) avec bois flottants (apparition extrême) mais sans râtelier, suivant les observations sur le modèle réduit. Les valeurs sont montrées en fonction de la pelle relative H_D/W .

La tendance proposée à la Figure 11 est la suivante ($R^2=0.97$) :

$$C_d = 0.345 - 0.15 \tanh\left(\frac{H_d}{W} - 0.5\right) \quad (10)$$

Avec H_D la charge de dimensionnement du déversoir et W la hauteur de la pelle. L'équation 10 est valide pour $0.5 < H_D/W \leq 3$. Elle permet d'estimer un coefficient de déversoir C_d « obstrué » en fonction de la pelle relative H_D/W pour un volume extrême de bois flottants bloqué à l'entrée d'un déversoir sans contre-mesures constructives. A noter que C_d correspond à la valeur moyenne des coefficients de déversoir C_d diminué de l'écart-type, ce qui est certainement plutôt sécuritaire.

Si $H_D/W < 0.5$ on observe $C_d=0.345$ (Pfister et al. 2019).



La Figure 8 suggère que le coefficient C_d pour de l'eau uniquement et sans bois flottants baisse de 8% si la pelle relative H_D/W monte de 0.5 à 3. Lorsque des bois flottants sont présents, la diminution est beaucoup plus sévère, notamment d'environ 43% (selon Figure 11).

L'Equation 10 s'applique pour tous pelles, débits et largeurs des passes relatives testés (avec bois flottants mas sans râteliers).

4.2.3 Râtelier complet avec bois flottants

Il est maintenant question de la surélévation du plan d'eau en présence d'un râtelier complet ($b/L_M \leq 0.77$, une barre de râtelier en amont de chaque pilier) installé en amont du déversoir. L'ensemble des données utilisées est disponible à l'annexe. Les données des travaux de Pfister et Bénét (2021) ont été reprises pour la pelle relative $H_D/W=0.35$.

La Figure 12 montre les coefficients de déversoir C_d en fonction du débit relatif χ pour chaque pelle relative. Les symboles utilisés représentent les configurations suivantes :

- Symboles ronds : $b/L_M=0.60$
- Symboles carrés : $b/L_M=0.77$
- Symboles noirs : râtelier proche
- Symboles gris : râtelier intermédiaire
- Symboles blancs : râtelier distant
- Symboles rouges : pas de râtelier mis en place (chapitre 4.2.2)
- Symboles bleus : données reprises de Pfister et Bénét (2021)

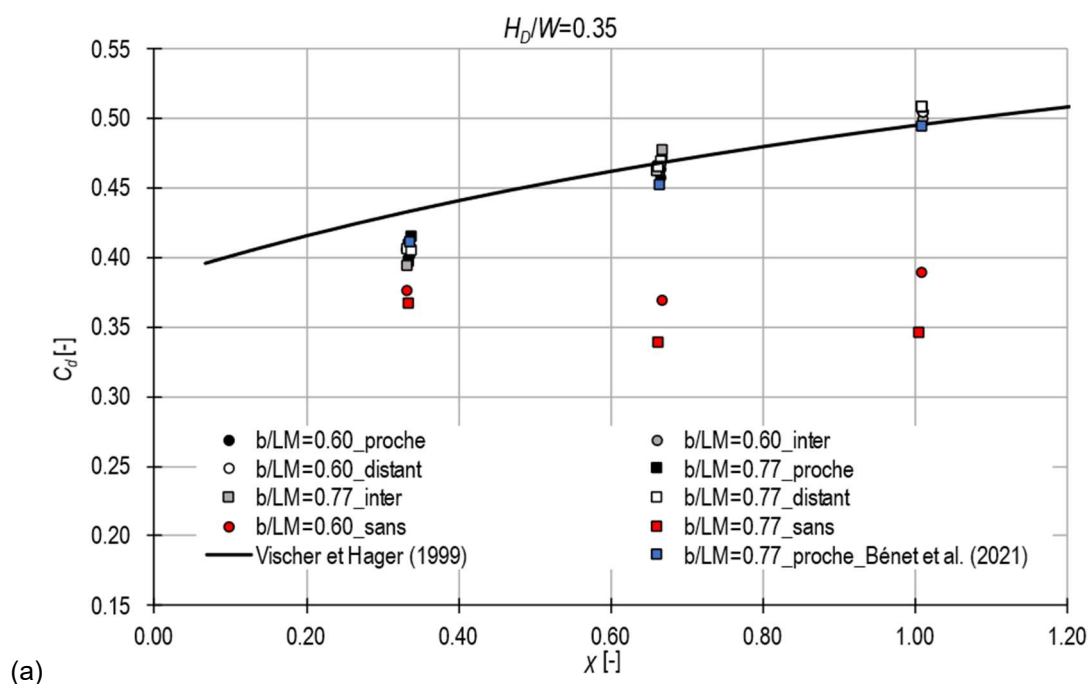


Figure 12. [Suite sur page suivante]

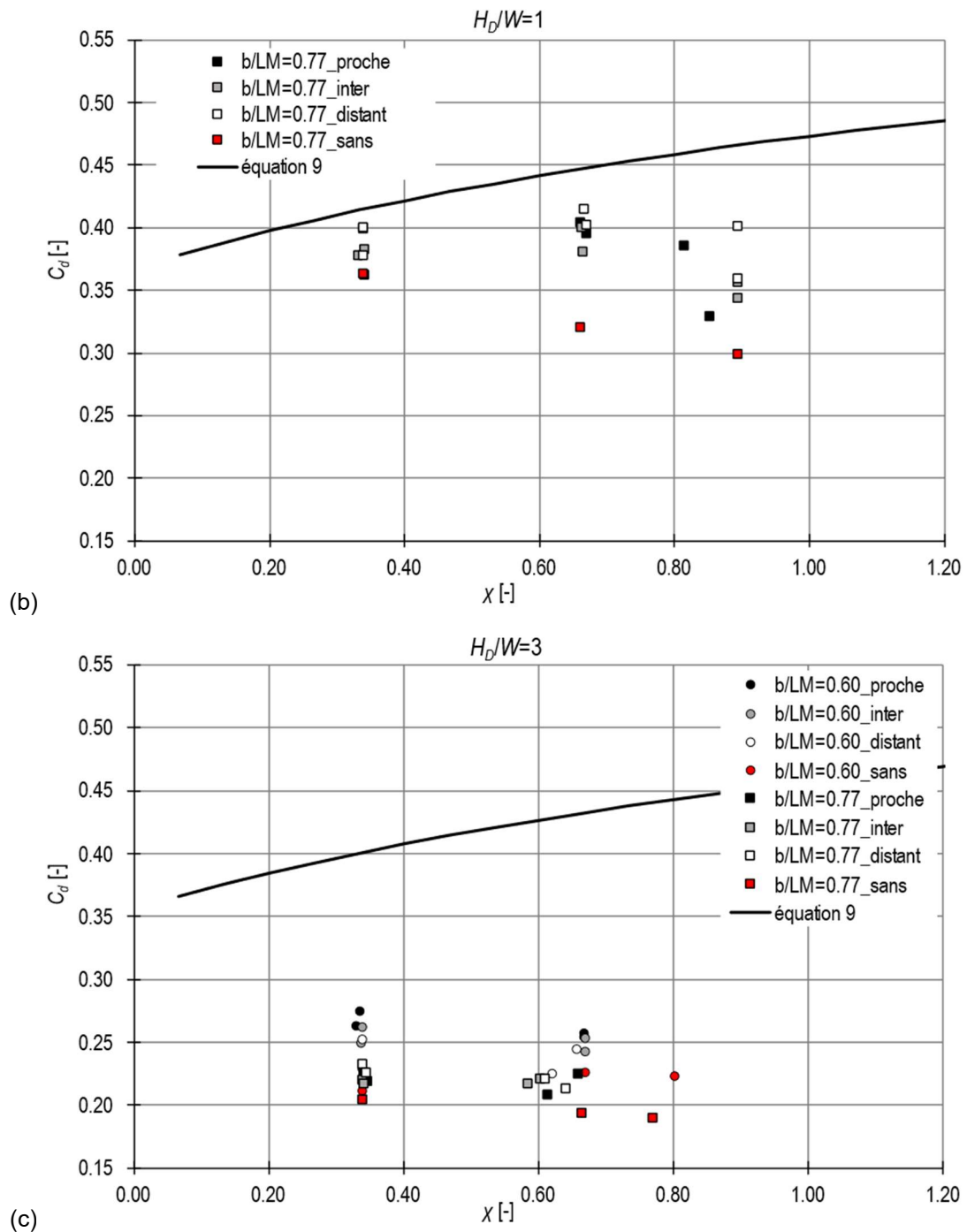


Figure 12. Coefficients de déversoir C_d en fonction du débit relatif χ avec un râtelier complet, pour $H_D/W=$ (a) 0.35, (b) 1 et (c) 3.

Sur la Figure 12, les éléments suivants sont illustrés :

- Pour $H_D/W=0.35$ (Figure 12a, « grande » pelle de $W=0.42$ m), la mise en place d'un râtelier complet permet de quasiment maintenir les coefficients de déversoir C_d à une situation sans



bois flottants. La section de contrôle hydraulique est au déversoir (section critique) et une courbe de tarage « libre » apparaît.

- Pour $H_D/W=1$ (Figure 12b, « moyenne » pelle), la mise en place d'un râtelier complet permet de légèrement améliorer les coefficients de déversoir C_d en comparaison à une situation sans râtelier. Cependant, les coefficients de déversoir C_d sont plutôt faibles et plutôt proches d'une constante (ne sont plus fonction du débit relatif χ). La section de contrôle hydraulique reste indéterminable, étant influencée par le râtelier obstrué et le déversoir sous l'influence de la vitesse d'approche. Les coefficients de déversoir observés sont généralement compris entre $0.34 \leq C_d \leq 0.41$. La valeur limite du cas avec bois mais sans râtelier est chez $C_d=0.298$ (Figure 11)
- Pour $H_D/W=3$ (Figure 12c, « petite » pelle de $W=0.05$ m), la mise en place d'un râtelier complet n'a quasiment plus d'effet sur les coefficients de déversoir C_d comparé à une situation sans bois flottants. Les coefficients de déversoir C_d sont faibles et proches d'une constante. Ils ne sont plus fonction du débit relatif χ . La section de contrôle hydraulique se trouve au râtelier bloqué (et n'est plus contrôlée par le déversoir). Les coefficients de déversoir observés sont généralement compris entre $0.20 \leq C_d \leq 0.28$. La valeur limite du cas avec bois mais sans râtelier est chez $C_d=0.196$ (Figure 11).
- La largeur relative des passes b/L_M n'a pas d'influence significative sur les coefficients de déversoir C_d .
- La position du râtelier a (Figure 3, étant proche, intermédiaire ou distant) n'a pas d'effets significatifs sur le coefficient C_d .

De manière générale, la mise en place d'un râtelier complet permet des meilleurs coefficients de déversoir C_d comparés une situation sans râtelier pour une « grande » pelle de $W=0.42$ m.

Cependant, la pelle relative H_D/W est un paramètre déterminant sur l'efficacité du râtelier pour C_d . Les autres paramètres étudiés n'ont pas montré de grands effets sur le coefficient de déversoir C_d .

4.2.4 Râtelier partiel avec bois flottants

Dans ce chapitre, il est question de la surélévation du plan d'eau en présence d'un râtelier partiel ($0.77 < b/L_M \leq 1.54$). L'ensemble des données utilisées est disponible à l'annexe. Les données des travaux de Pfister et Bénet (2021) ont été reprises pour la hauteur de crête relative $H_D/W=0.35$.

La Figure 13 montre les coefficients de déversoir C_d en fonction du débit relatif χ pour chaque pelle relative $H_D/W=$ (a) 0.35, (b) 1 et (c) 3. Les symboles utilisés représentant les différentes configurations sont semblables à la Figure 12.

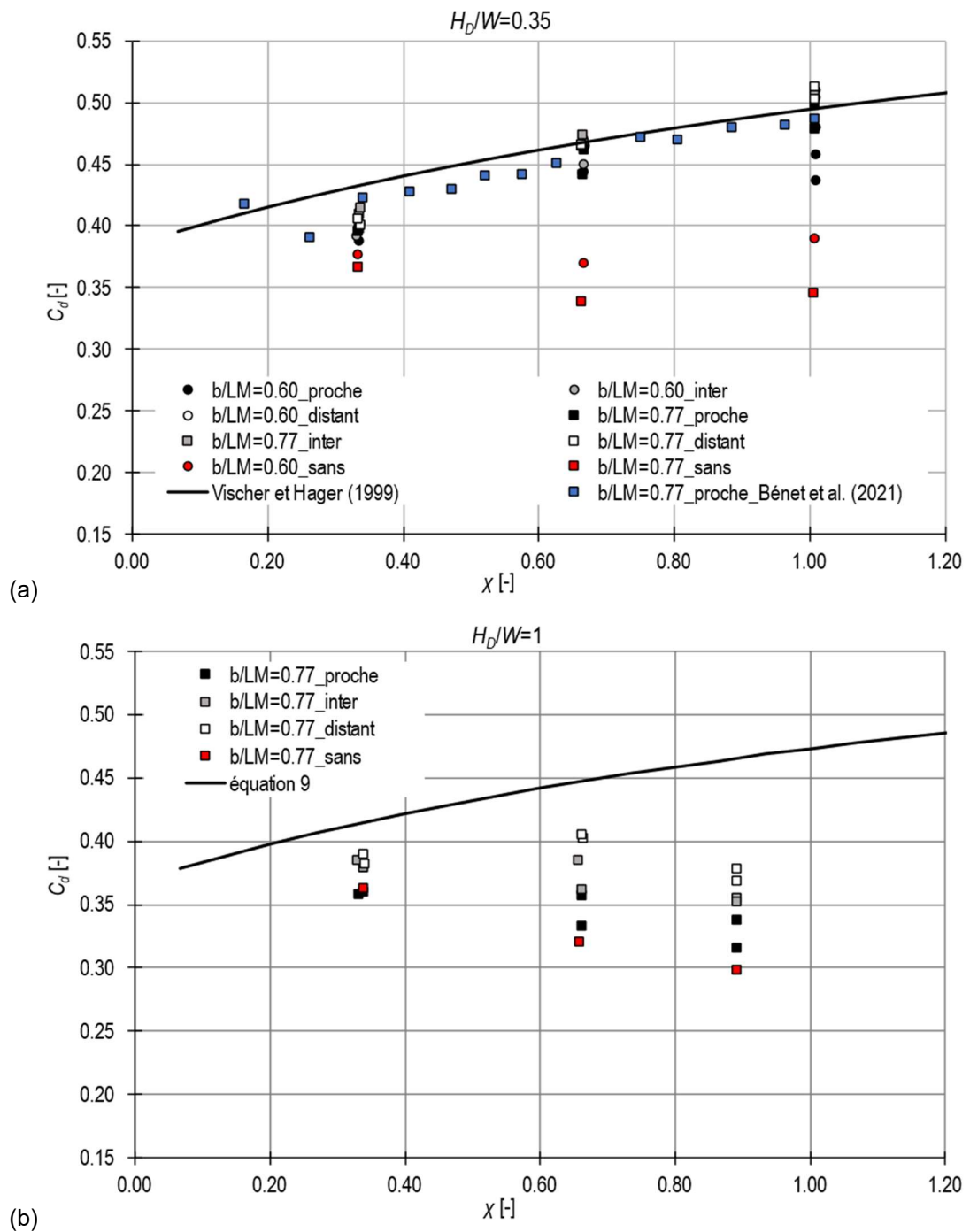


Figure 13. [Suite sur page suivante]

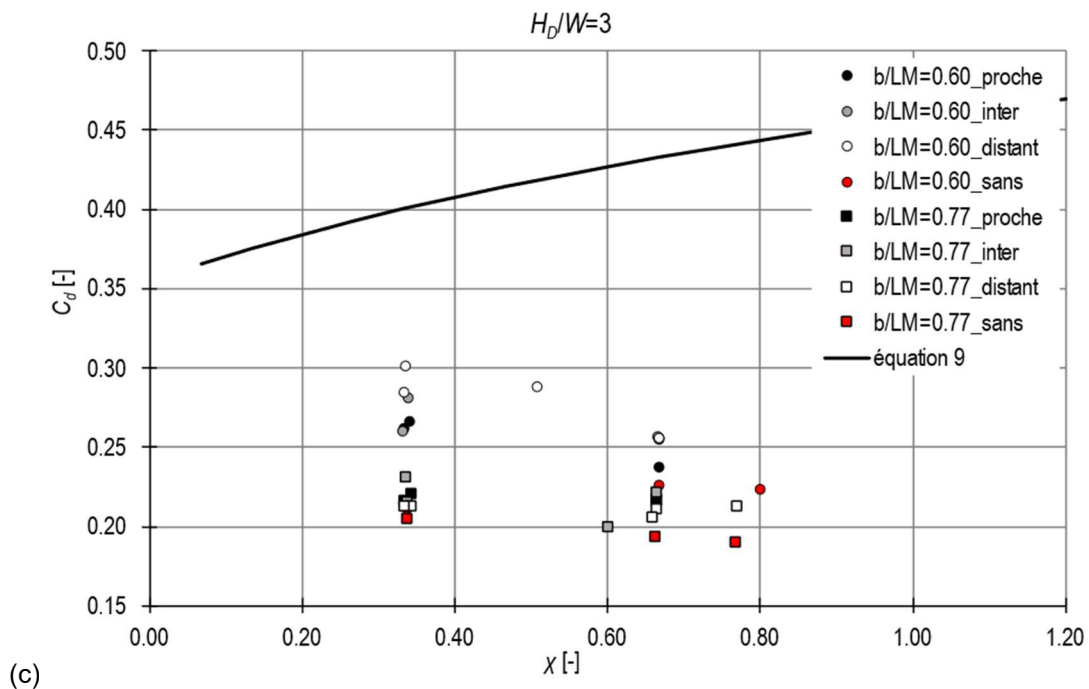


Figure 13. Coefficients de déversoir C_d en fonction du débit relatif χ avec un râtelier partiel. $H_D/W=$ (a) 0.35, (b) 1 et (c) 3.

Sur la Figure 13, les mêmes enseignements peuvent être tirés que pour le cas du râtelier complet à la Figure 12. Il n'y a pas de différences significatives en ce qui concerne les coefficients de déversoir C_d entre le râtelier complet et le râtelier partiel.

De manière générale, la mise en place d'un râtelier partiel permet de garantir de meilleurs coefficients de déversoir C_d (comparés une situation sans râtelier), comme pour le râtelier complet. Cependant, les coefficients de déversoir C_d obtenus sont variables suivant la pelle relative H_D/W , avec un déplacement de la section de contrôle hydraulique entre le déversoir ($H_D/W=0.35$) et le râtelier ($H_D/W=3$).

4.3 Force sur râtelier

4.3.1 Surface obstruée

La méthode de calcul des forces est similaire à celle de Pfister et al. (2022), avec les éléments suivants :

- La force relative à la poussée des bois flottants est obtenue avec la soustraction de la force hydrodynamique et de la force propre au système de mesure (toutes deux également mesurée dans le protocole d'essai). Il s'agit d'une valeur moyenne calculée sur la durée de l'essai, car les forces sont proches d'une constante dans le temps pour chaque configuration testée.
- Pour convertir la force mesurée à la jauge de contrainte en une force au râtelier des bois flottants F_B , il faut multiplier la force mesurée à la jauge de contrainte par le rapport l_R/l (Figure 3a) avec l_R le bras de levier de référence du système de mesure (ici, l_R compris entre 0.4 m et 0.9 m) et l le bras de levier entre l'axe de rotation du système de mesure de force et le point d'application de la force des bois flottants au râtelier.



- Le point d'application de la force des bois au râtelier est inconnu. Une hypothèse pragmatique est réalisée : Le point d'application correspond à la surface de l'eau pour une situation sans bois flottants et avec un débit identique. Comme il a été observé, d'une part, une surélévation du niveau d'eau en présence de bois flottants et d'autre part, un positionnement sur une certaine épaisseur des bois flottants au râtelier (Figure 5), l'hypothèse du positionnement de la résultante de la force des bois flottants au râtelier semble néanmoins plutôt réaliste.
- Pour obtenir la force par barres de râtelier f_B , il faut diviser la force totale des bois flottants au râtelier F_B par le nombre de barres de râtelier n_B . L'hypothèse d'une distribution homogène de la force entre toutes les barres du râtelier est donc réalisée.

Pour exprimer la force de manière adimensionnelle par le biais du coefficient de trainée C_{WB} , il est nécessaire de s'intéresser à la surface d'obstruction A_B qui est formée par le blocage des bois flottants contre la barre de râtelier. Comme montré à la Figure 5, les bois flottants se bloquent contre les barres du râtelier avec une épaisseur de plusieurs couches de troncs en fonction du débit testé (réciproquement de la vitesse d'approche plus importante). Cette épaisseur de blocage est difficilement quantifiable avec précision, car le phénomène des bois flottants demeure largement aléatoire. La Figure 14 représente la hauteur de blocage de bois flottants h_B divisé par le diamètre maximal des bois flottants D_M , en fonction du nombre de Froude amont F_o (dans le canal, pour une situation avec de l'eau seulement). Les différentes configurations testées sont représentées avec des symboles ronds pour $b/L_M=0.60$ et des symboles carrés pour $b/L_M=0.77$.

Il est à noter que h_B suit des observations sur modèle. Le nombre de troncs en contact direct avec une barre du râtelier est estimée visuellement à travers de la vitre latérale. Ce sont souvent les troncs les plus épais qui touchent les barres. Le nombre de troncs en contact est ensuite multiplié avec D_M pour dériver h_B . La hauteur h_B est alors une mesure virtuelle et correspond au bois (pur), cependant la hauteur verticale de l'obstruction (perméable) inclut aussi des espaces (pores) à travers lesquelles l'eau coule. La hauteur de l'obstruction « visuelle » est normalement le double ou plus de h_B (bois sans pores).

Pour déterminer une hauteur de blocage h_B de bois flottants, un facteur P est défini selon trois zones distinctes (ligne noire sur la Figure 14, limite testée $0.06 \leq F_o \leq 0.36$) visible au Tableau 1. Ce facteur P correspond en principe à un multiple de D_M , étant $P=h_B/D_M$ selon la colonne droite du Tableau 1. La largeur de blocage est déterminée selon la condition géométrique de l'équation 11 pour permettre le calcul de la surface d'obstruction A_B .

$$\begin{aligned} \text{si } b_r \leq L_M \text{ alors } A_B &= P D_M b_r \\ \text{si } b_r > L_M \text{ alors } A_B &= P D_M L_M \end{aligned} \tag{11}$$

où b_r est l'espacement entre les barres de râtelier, L_M la longueur maximale des bois flottants, D_M le diamètre maximal des bois flottants et h_B la hauteur de blocage des bois flottants (rapport $P=h_B/D_M$ selon le Tableau 1).

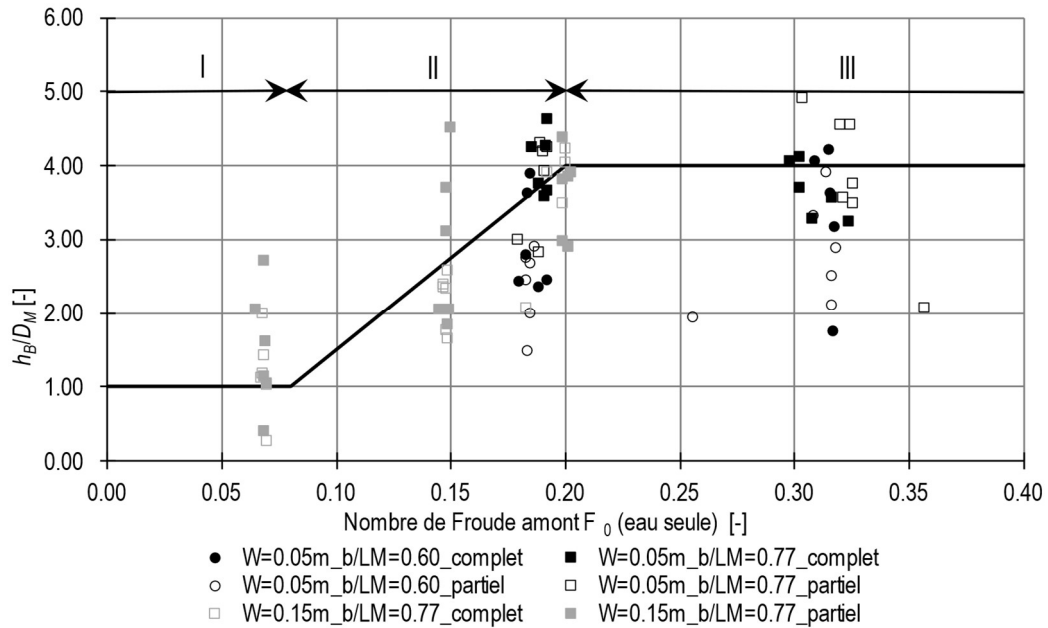


Figure 14. Hauteur maximale de blocage de bois flottants h_B divisé par le diamètre maximal des bois flottants D_M , en fonction du nombre de Froude amont F_o (Froude pour une situation avec de l'eau seule, Tableau 1).

Tableau 1. Définition de $P=h_B/D_M$ en fonction du nombre de Froude amont F_o (pour une situation avec de l'eau seule, Figure 14).

Zone	Froude amont (eau seule) F_o	$P=h_B/D_M$	
I.	$F_o \leq 0.08$	1	selon Pfister et al. (2022)
II.	$0.08 < F_o < 0.20$	$25F_o - 1$	
III.	$F_o \geq 0.20$	4	

4.3.2 Définition du coefficient de trainée

La force f_{WB} par barre de râtelier pour une présence de bois flottants est alors exprimé de la manière suivante :

$$f_{WB} = C_{WB} \rho A_B \frac{U_B^2}{2} \quad (12)$$

où est f_{WB} est la force produite par des bois flottants (uniquement, sans effet de l'eau) sur une seule barre de râtelier, ρ la masse volumique de l'eau ($\rho=1'000 \text{ kg/m}^3$), A_B la surface d'obstruction par les bois flottants contre la barre de râtelier (Equation 11 et Tableau 1) et U_B la vitesse (composante horizontale) à la surface de l'eau à l'emplacement du râtelier. Les coefficients C_{WB} sont discutés dans le prochain chapitre.



4.3.3 Coefficient de trainée pour râtelier complet

Comme dans Pfister et al. (2021), la force imposée des bois flottants sur une barre de râtelier est présentée par le coefficient de trainée C_{WB} . À la Figure 15, le coefficient de trainée C_{WB} est montré en fonction de l'espacement relatif des barres de râtelier b_r/L_M pour le râtelier complet ($b_r/L_M < 0.80$, Figure 3b). Les symboles utilisés représentent les configurations suivantes :

- Symboles ronds : $b/L_M = 0.60$
- Symboles carrés : $b/L_M = 0.77$
- Symboles noirs : râtelier proche
- Symboles gris : râtelier intermédiaire
- Symboles blancs : râtelier distant

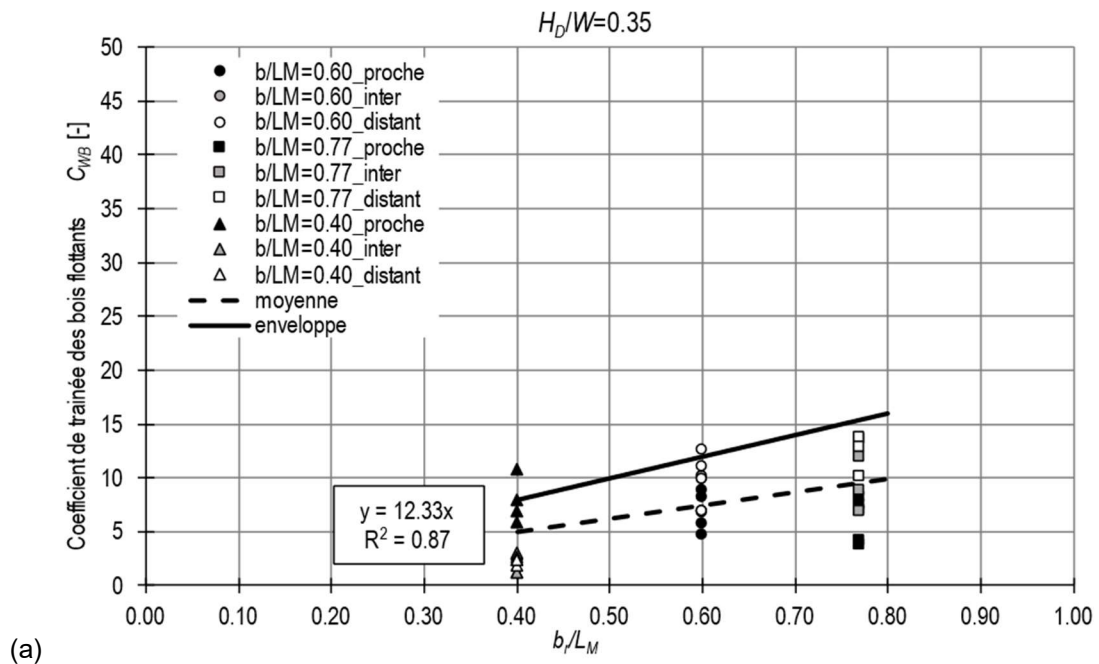


Figure 15. [Suite sur page suivante]

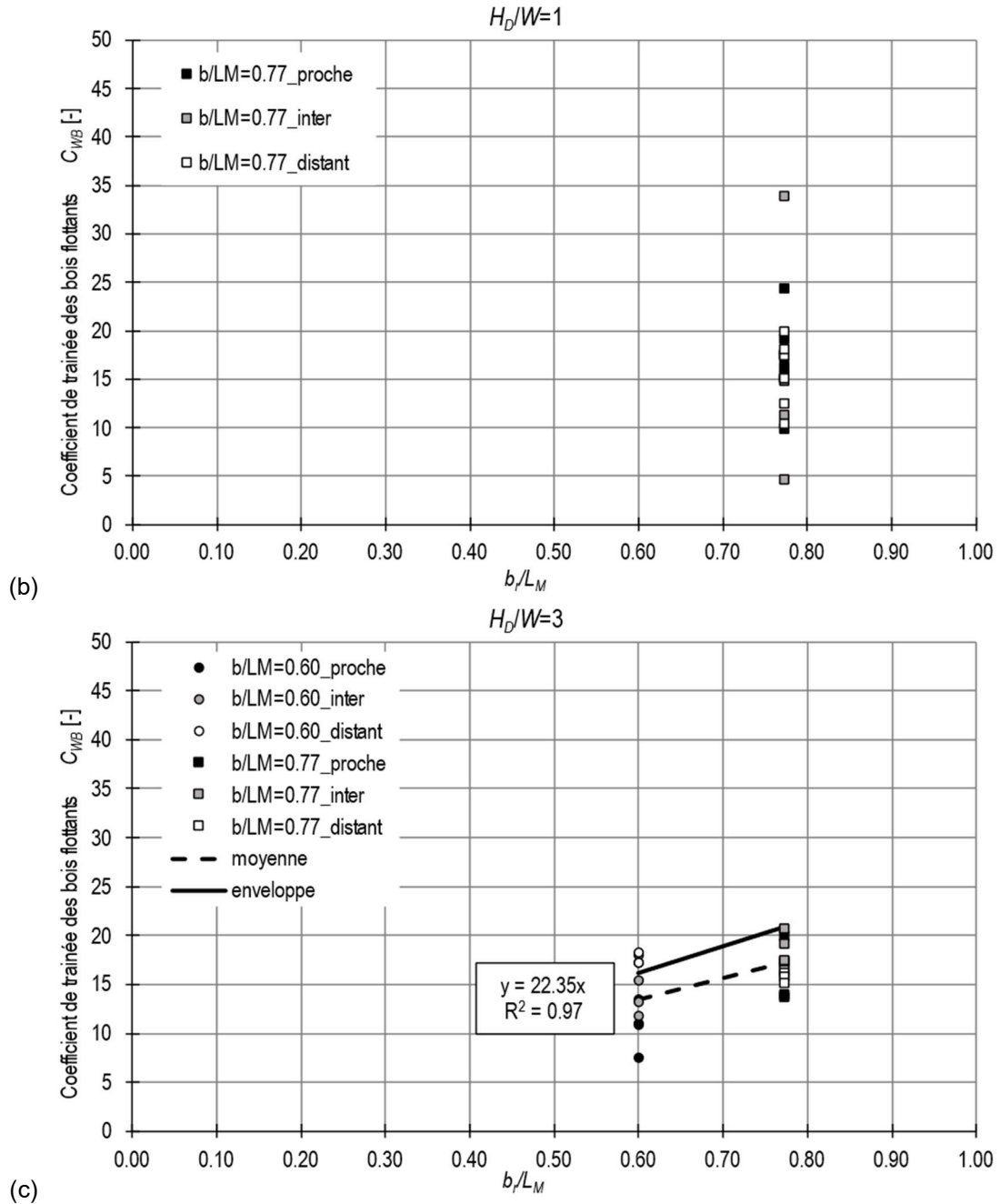


Figure 15. Coefficient de trainée C_{WB} en fonction de l'espacement relatif des barres de râtelier b_r/L_M pour le râtelier complet, pour $H_D/W=$ (a) 0.35 (Pfister et al. 2022), (b) 1 et (c) 3.

On constate à la Figure 15 :

- La position du râtelier (proche, intermédiaire ou distant) n'a pas de grandes influences sur le coefficient de trainée C_{WB} .
- Les coefficients de trainée C_{WB} sont légèrement supérieurs pour $H_D/W=1$ comparés à $H_D/W=3$ (pour une configuration similaire $b/L_M=0.77$). Cela peut s'expliquer par la définition de la surface d'obstruction A_B (plus précisément la hauteur d'obstruction des bois flottants h_B) qui est



légèrement sous-estimée (Figure 14). De ce fait, les coefficients de trainée C_{WB} sont plus grands.

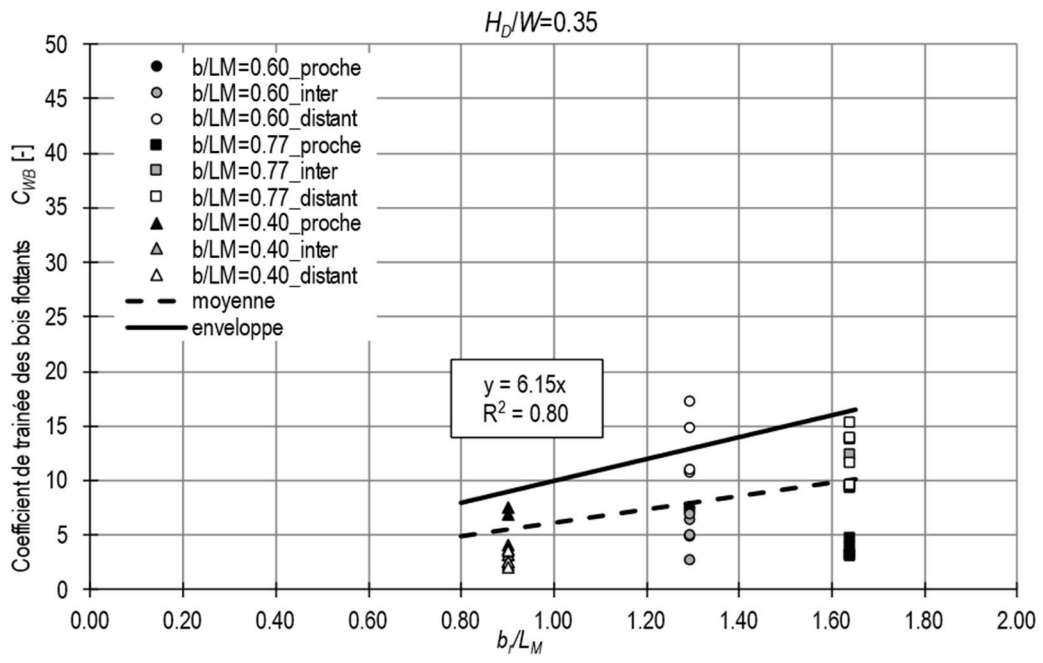
- Pour $H_D/W=3$, les coefficients de trainée C_{WB} sont quasiment linéairement fonction de l'espacement relatif des barres de râtelier b_r/L_M . L'équation moyenne (en trait tillé) vaut $C_{WB}=22.35b_r/L_M$, pour un coefficient de détermination $R^2=0.97$.
- Il est possible d'exprimer une enveloppe des coefficients de trainée C_{WB} (trait plein) en fonction de l'espacement relatif des barres de râtelier b_r/L_M , avec r un facteur de râtelier qui dans le cadre du râtelier complet ($b_r/L_M \leq 0.80$) étant $r=1$:

$$C_{WB} = 27r \left(\frac{b_r}{L_M} \right) \quad (13)$$

Seuls quelques points pour une largeur relative des passes de $b/L_M=0.60$ avec un râtelier distant sont situés en dessus de l'enveloppe.

4.3.4 Coefficient de trainée pour râtelier partiel

À la Figure 16, le coefficient de trainée C_{WB} est montré en fonction de l'espacement relatif des barres de râtelier b_r/L_M pour le râtelier partiel ($b_r/L_M > 0.80$). Les symboles utilisés sont celles de la Figure 15.



(a)
Figure 16. [Suite sur page suivante]

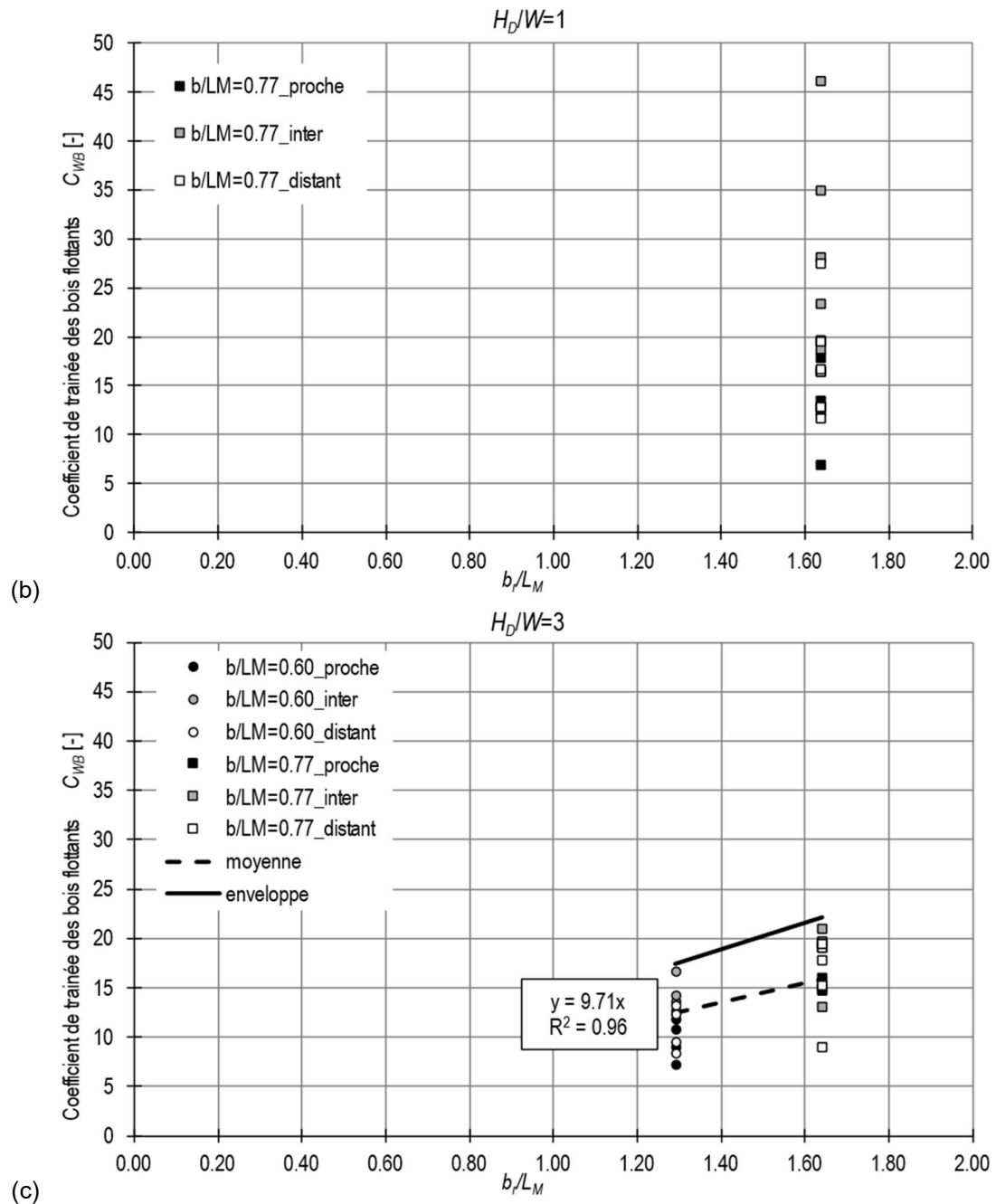


Figure 16. Coefficient de trainée C_{WB} en fonction de l'espacement relatif des barres de râtelier b_r/L_M pour le râtelier partiel, pour $H_D/W=$ (a) 0.35 (Pfister et al. 2022), (b) 1 et (c) 3.

On constate à la Figure 16 que le râtelier partiel a un comportement quasiment identique au râtelier complet :

- Pas d'effet majeure de la position du râtelier (proche, intermédiaire ou distant) sur le coefficient de trainée C_{WB} .



- Les coefficients de trainée C_{WB} sont supérieurs pour $H_D/W=1$ comparés à $H_D/W=3$ (pour une configuration similaire $b/L_M=0.77$). Comme déjà mentionnée précédemment, cela provient de la définition de la surface d'obstruction A_B .
- Pour $H_D/W=3$, les coefficients de trainée C_{WB} sont linéairement fonction de l'espacement relatif des barres de râtelier b/L_M . L'équation moyenne (en trait tillé) vaut $C_{WB}=9.17b/L_M$, pour un coefficient de détermination $R^2=0.96$.
- Il est possible d'exprimer une enveloppe des coefficients de trainée C_{WB} (trait plein) en fonction de l'espacement relatif des barres de râtelier b/L_M , selon l'équation 13, cette fois-ci avec un facteur de râtelier qui dans le cadre du râtelier partiel $r=0.5$.

Le comportement des râteliers étudiés présente des similitudes pour l'expression d'un coefficient de trainée C_{WB} en fonction de l'espacement relatif des barres de râtelier b/L_M selon l'équation 13 dans les limites des conditions testées ici :

- Nombre de Froude amont (pour une situation avec de l'eau seule) compris entre $0.06 \leq F_o \leq 0.36$.
- Hauteur relative de la crête du déversoir de comprise entre $0.35 (0.50) \leq H_D/W \leq 3$.
- Largeur relative des passes de $b/L_M=0.60$ et $b/L_M=0.77$ (la largeur relative des passes $b/L_M=0.40$ n'a pas été prise en compte dans les analyses en raison des effets de bord dus à la réduction de la largeur d'écoulement).
- Débit relatif compris entre $0.33 \leq \chi \leq 1$.
- 3 positions de râtelier (proche intermédiaire et distant).
- Espacement relatif des barres de râtelier b/L_M compris entre $0.60 \leq b/L_M \leq 1.64$.

4.3.5 Discussion

Pfister et al. (2022) ont étudiés la force provoquée par un blocage de bois flottants contre une barre de râtelier par le biais d'un coefficient de trainée C_{WB} pour des conditions d'approche dites réservoir ($H_D/W \leq 0.5$). Il est donc intéressant de comparer les données avec celles de cette étude, effectuée dans les conditions dites canal dites $H_D/W > 0.5$.

Il a été observé que les forces de trainée sur une barre de râtelier augmentent si l'écoulement amont est plus rapide, c'est-à-dire du type canal. Au niveau de l'équation de trainée (équation 13), cela est considéré via la vitesse U_B (composante horizontale) à la surface de l'eau à l'emplacement du râtelier plus grande, et aussi via une augmentation de la surface d'obstruction A_B (équation 11) via le facteur P qui augmente en fonction de F_o . La définition de la hauteur de blocage des bois flottants h_B contre la barre de râtelier est donc adapté. Si pour Pfister et al. (2022) $P=h_B/D_M=1$ selon les observations su modèle physique avec un réservoir en amont, la rapport h_B/D_M est compris dans cette étude entre $1 < h_B/D_M < 4$ selon la Figure 14, ce qui augmente la surface d'obstruction et conséquemment la force de trainée.

La Figure 17 montre les coefficients de trainée C_{WB} déduit du modèle réduit (mesure de force) en fonction de l'espacement relatif des barres de râtelier b/L_M avec $H_D/W=0.35$ en noir (données de Pfister et al. 2022), $H_D/W=1$ en gris foncé et $H_D/W=3$ en gris clair. Les tendances moyennes et les enveloppes sont également représentées pour $H_D/W=0.35$ et $H_D/W=3$.

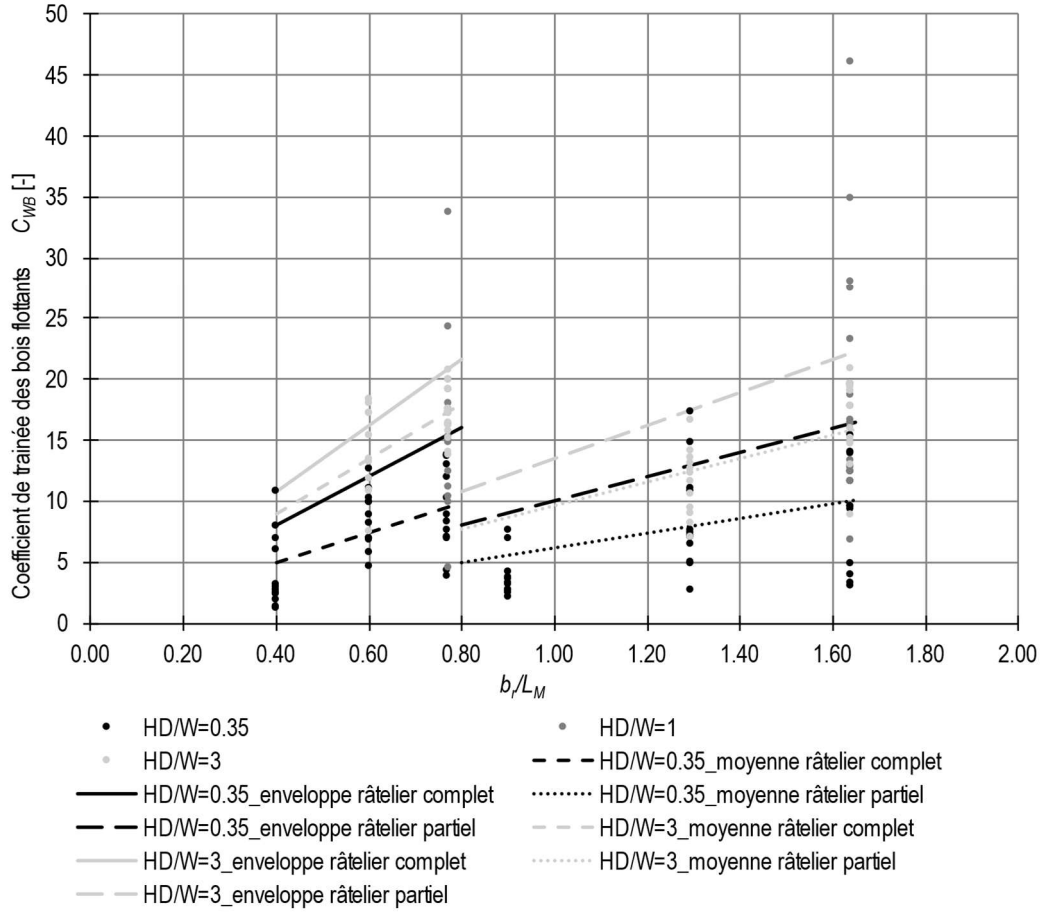


Figure 17. Coefficient de trainée C_{WB} en fonction de l'espacement relatif des barres de râtelier b_r/L_M pour $H_D/W=0.35$, $H_D/W=1$ et $H_D/W=3$ avec représentation des tendances moyennes et des enveloppes.

On constate à la Figure 17 que les coefficients de trainée C_{WB} sont fonction de l'espacement relatif des barres de râtelier b_r/L_M pour toutes les hauteurs de crête relative H_D/W . Une différence entre le râtelier complet ($b_r/L_M \leq 0.80$) et le râtelier partiel ($b_r/L_M > 0.80$) est visible à $b_r/L_M = 0.80$ (critère de Godtland et Tesaker, 1994).

Les coefficients de trainée C_{WB} sont plus grands pour $H_D/W=3$ que pour $H_D/W \leq 0.50$ (0.35). Pour le râtelier complet ($b_r/L_M \leq 0.80$), la tendance moyenne pour $H_D/W=0.35$ est de $C_{WB} = 12.33 b_r/L_M$ alors que pour $H_D/W=3$, $C_{WB} = 22.35 b_r/L_M$. Pour le râtelier partiel ($b_r/L_M > 0.80$), la tendance moyenne pour $H_D/W=0.35$ est de $C_{WB} = 6.15 b_r/L_M$ alors que pour $H_D/W=3$, $C_{WB} = 9.71 b_r/L_M$.

Cette augmentation est également visible dans l'expression des enveloppes. Pour $H_D/W=3$, un facteur de 27 est recommandé dans l'équation 13, alors que Pfister et al. (2022) recommande un facteur de 20 pour $H_D/W \leq 0.50$ (0.35). Les tests réalisés pour $H_D/W=1$ ont plutôt une tendance similaire à $H_D/W=3$ pour la définition de l'enveloppe. Comme déjà mentionné, une sous-estimation de la surface d'obstruction A_B (Figure 14), qui montre des grandes variations, est la conséquence de grands coefficients de trainée C_{WB} . Il est alors recommandé de considérer des coefficients de trainées plus élevés pour une situation de canal. La majorité des mesures est couverte avec une valeur pragmatique



de $C_{WB}=23$, étant 35% de plus comparé à la situation avec un réservoir en amont. La différence entre type réservoir et canal est liée au nombre de Froude amont, avec une limite d'environ $F_o \approx 0.1$.



5 Conclusion

5.1 Surélévation amont

L'étude a relevé les éléments suivants pour les conditions étudiées avec une hauteur de crête du déversoir relatives comprise entre $0.5 \leq H_D/W \leq 3$:

- Eau sans bois ni râtelier : Proposition d'un coefficient de réduction $C_{H/W}$ pour le coefficient de déversoir C_d (selon Vischer et Hager, 1999) en fonction de la pelle relative H_D/W (nécessaire dès que la vitesse d'approche influence la courbe de tarage, typiquement si $H < 2W$), pour une situation sans bois flottants, avec la mise en place d'un déversoir standard dans des conditions d'approche dites canal.
- Eau avec bois mais sans râtelier : Quantification de la surélévation amont (sans mesures particulières) provoquées par un blocage d'un volume extrême de bois flottants au déversoir par l'expression d'un coefficient de déversoir C_d qui est en fonction de H_D/W . Les autres paramètres clés étudiés n'ont pas d'effet significatif. Le coefficient de déversoir C_d diminue avec l'augmentation de H_D/W , cela s'explique par le fait qu'avec l'augmentation de la vitesse d'écoulement amont (plus de pression), les bois flottants se bloquent avec une plus importante épaisseur contre le déversoir et perturbent l'écoulement de manière encore plus significative.
- Eau avec bois et râtelier : Avec la mise en place d'un râtelier, les coefficients de déversoir C_d sont meilleurs que sans râtelier, ce qui signifie qu'un râtelier limite la surélévation. La position du râtelier et la largeur relative des passes b/L_M n'ont pas d'influence significative sur les résultats obtenus. Cependant, cette amélioration constatée des coefficients de déversoir C_d , diminue avec l'augmentation de H_D/W , la section de contrôle hydraulique évolue en fonction de H_D/W ; pour de « petits » $H_D/W \approx 0.5$, la courbe de tarage est plutôt contrôlée par le déversoir alors que pour des « grands » $H_D/W \approx 3$ la section de contrôle est plutôt contrôlée par le râtelier.
- Pas de différences significatives entre la mise en d'un râtelier complet ou partiel pour limiter la surélévation amont.

5.2 Force

Les éléments suivants peuvent être mentionnés pour cette étude toujours dans une hauteur de crête du déversoir relatives comprise entre $0.5 \leq H_D/W \leq 3$:

- La force provoquée par un blocage d'un volume extrême de bois flottants contre une barre de râtelier peut être exprimée de manière adimensionnelle par un coefficient de trainée C_{WB} .
- Une définition de la surface d'obstruction A_B est alors nécessaire. Une estimation pragmatique, mais certes difficile, est proposée pour le rapport entre la hauteur maximale de blocage de bois flottants (bois pur, sans porosité) h_B et le diamètre maximal des bois flottants D_M , en fonction du nombre de Froude amont F_o pour une situation avec de l'eau seule (limite testée $0.06 \leq F_o \leq 0.36$).
- Les coefficients de trainée C_{WB} sont linéairement fonction de l'espacement relatif des barres de râtelier b_r/L_M (limite testée $0.60 \leq b_r/L_M \leq 1.64$). Une tendance moyenne, ainsi qu'une équation pour une enveloppe, sont proposées.
- Une différence entre la râtelier complet ($b_r/L_M \leq 0.80$) et le râtelier partiel ($b_r/L_M > 0.80$) est présente dans l'expression des coefficients de trainée C_{WB} . Ce constat est corrélé avec les observations directement sur le modèle physique car le râtelier complet retient l'ensemble du volume de bois flottants alors qu'une partie du volume est retenue par le râtelier partiel (les



pilliers du déversoir retiennent l'autre partie du volume). L'application d'un facteur de râtelier r dans la définition de l'enveloppe des coefficients de trainée C_{WB} prend en compte cette différence avec $r=1$ pour le râtelier complet et $r=0.5$ pour le râtelier partiel.

- Les coefficients de trainée C_{WB} de cette étude ont été comparés avec les conditions d'approche dites réservoir $H_D/W=0.50$ (0.35) de Pfister et al. (2022). Les coefficients de trainée C_{WB} pour $H_D/W=1$ et $H_D/W=3$ sont supérieurs à ceux de $H_D/W=0.5$ (0.35) en fonction de l'espacement relatif des barres de râtelier b_r/L_M pour la tendance moyenne et la définition des enveloppes. Pfister et al. (2022) recommande un facteur de 20 dans l'équation des coefficients de trainée C_{WB} alors que dans cette étude, il est question d'un facteur de 27 à l'équation 13.



6 Notation

A	surface d'obstruction [m^2]
A_B	surface d'obstruction par le bois flottants à la barre de râtelier [m^2]
a	avancement du râtelier (par rapport au front vertical du déversoir) [m]
b	largeur d'une passe [m]
B	largeur totale du canal (ici $B=1.50$ m) [m]
b_e	largeur hydraulique d'une passe [m]
b_r	distance entre les barres de râtelier [m]
C_d	coefficient du déversoir [-]
$C_{H/W}$	coefficient de réduction pour le coefficient du déversoir [-]
C_W	coefficient de trainée pour de l'eau uniquement [-]
C_{WB}	coefficient de trainée résultant d'un blocage de bois flottants [-]
D	diamètre des troncs [m]
D_M	diamètre maximale des troncs (ici $D_M=0.022$ m) [m]
F_B	force produite par un blocage de bois flottants contre un râtelier [N]
f_{WB}	force produite par un blocage de bois flottants contre un râtelier par barre de râtelier [N]
F_M	force d'impact maximale développée par Haehnel et Daly (2004) [N]
F_T	force totale mesuré dans le modèle réduit [N]
F_0	nombre de Froude (amont) [-]
g	accélération de la gravité [m/s^2]
h	hauteur d'eau sur la crête du déversoir [m]
h_B	hauteur de blocage des troncs contre le râtelier [m]
H	charge du déversoir [m]
H_D	charge de dimensionnement du déversoir (ici $H_D=0.15$ m) [m]
K_p	facteur de réduction (Vischer et Hager (1999) [-]
L	longueur des troncs [m]
L_M	longueur des troncs les plus longs (ici $L_M=0.433$ m) [m]
l	bras de levier des bois flottants, distance entre l'axe de rotation du système de mesure et la surface de l'eau [m]
l_R	bras de levier de référence du système de mesure de force [m]
m	masse de bois flottants ajoutés (Haehnel et Daly, 2004) [kg]
n_B	nombre de barres de râtelier [-]
ρ	masse volumique de l'eau (ici $\rho=1'000$ kg/m^3) [kg/m^3]
Q	débit [m^3/s]
r	facteur pour le type de râtelier choisi [-]
R^2	coefficient de détermination [-]
u	vitesse amont [m/s]
U_B	vitesse horizontale à la surface de l'eau à l'emplacement de la barre du râtelier [m/s]
W	pelle verticale entre le fond du canal et la crête du déversoir [m]
χ	charge relative [-]
z	profondeur d'écoulement dans le canal [m]



7 Bibliographie

- 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 et discharge efficiency. *Journal of Hydraulic Engineering* 148(8), 06022008.
- 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 lowgodland 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.
- Haehnel, 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 Geschwemmsteppichen: Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit von Stahlwasserbauten. *Wasser Energie Luft* 97(1/2), 11-13.
- 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.
- NCCS (2018). CH2018, *Klimaszenarien für die Schweiz*. National Centre for Climate Services, Zürich.
- 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.
- OFEV (2019). *Schwemmholz in Fliessgewässern*. UW-1910-D. Swiss Federal Office for the Environment, Bern.
- OFEV (2021). *Auswirkungen des Klimawandels auf die Schweizer Gewässer*. UW-2101-D. Swiss Federal Office for the Environment, Bern.
- Pfister, M., Bénet, L. (2021). Des cours d'eau écologiques et des barrages sûrs : le cas des bois flottants (Projet Eco-barrages). *Rapport final HES-SO*, Haute Ecole d'Ingénierie et d'Architecture de Fribourg (HEIA-FR, HES-SO), Fribourg.
- Pfister, M., De Cesare, G., Bénet, L. (2019). Effet des bois flottants bloquant un évacuateur de crue sous des conditions extrêmes. *Rapport final*, Office fédéral de l'énergie OFEN, Berne.
- Pfister, M., De Cesare, G., Bénet, L. (2022). Schwemmholzrechen auf Hochwasserentlastungsanlagen. *Rapport final*, Office fédéral de l'énergie OFEN, Berne.
- Spreitzer, G., Tunnicliffe, J., Friedrich, H. (2019). Using smart sensors for measuring impact forces of large wood. E-proceedings 38th IAHR *World Congress*, September 1-6, 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.
- Vischer, D.L., Hager, W.H. (1999). *Dam Hydraulics*. John Wiley & Sons, Chichester, US.
- 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.

Annexe

Test sans râtelier

Test	Débit	Charge relative (eau)	Largeur passes relative	Espacement barres râtelier relatif	Râtelier	Position râtelier	Pelle	Hauteur d'eau (bois)	Coefficient déversoir (bois)	Froude amont (eau)	Froude amont (bois)	Force râtelier (bois)	Force par barre (bois)	Coefficient trainée (bois)
-	Q	χ	b/L_M	b_r/L_M	-	-	W	h	C_d	F_0	F_0	F_B	f_B	C_{WB}
[-]	[m³/s]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[m]	[m]	[-]	[-]	[-]	[N]	[N]	[-]
A	0.029	0.338	0.60				0.05	0.081	0.211	0.190	0.128			
B	0.085	0.669	0.60				0.05	0.159	0.226	0.311	0.190			
C	0.114	0.801	0.60				0.05	0.194	0.223	0.345	0.201			
D	0.030	0.338	0.77				0.05	0.083	0.205	0.197	0.130			
E	0.087	0.664	0.77				0.05	0.176	0.193	0.321	0.173			
F	0.110	0.769	0.77				0.05	0.208	0.190	0.349	0.179			
G	0.019	0.342	0.40				0.05	0.069	0.274	0.129	0.101			
H	0.056	0.665	0.40				0.05	0.134	0.290	0.207	0.152			
I	0.100	0.949	0.40				0.05	0.198	0.285	0.252	0.172			
J			0.60				0.15			0.000				
K			0.60				0.15			0.000				
L			0.60				0.15			0.000				
M	0.030	0.338	0.77				0.15	0.057	0.363	0.070	0.067			
N	0.086	0.660	0.77				0.15	0.125	0.320	0.148	0.127			

O	0.140	0.893	0.77		0.15	0.180	0.299	0.197	0.157
P	0.020	0.348	0.40		0.15	0.063	0.326	0.047	0.043
Q	0.056	0.661	0.40		0.15	0.133	0.295	0.096	0.079
R	0.113	1.026	0.40		0.15	0.225	0.270	0.144	0.105

Test avec râtelier

Test	Débit	Charge relative (eau)	Largeur passes relative	Espacement barres râtelier relatif	Râtelier	Position râtelier	Pelle	Hauteur d'eau (bois)	Coefficient déversoir (bois)	Froude amont (eau)	Froude amont (bois)	Force râtelier (bois)	Force par barre (bois)	Coefficient trainée (bois)
-	Q	χ	b/L_M	b_r/L_M	-	-	W	h	C_d	F_0	F_0	F_B	f_B	C_{WB}
[-]	[m ³ /s]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[m]	[m]	[-]	[-]	[-]	[N]	[N]	[-]
1	0.029	0.341	0.60	0.60	complet	proche	0.05	0.068	0.274	0.192	0.148	23.82	5.96	10.91
2	0.028	0.336	0.60	0.60	complet	proche	0.05	0.069	0.263	0.188	0.143	23.03	5.76	10.84
3	0.083	0.658	0.60	0.60	complet	proche	0.05	0.148	0.254	0.317	0.205	73.38	18.34	7.44
4	0.085	0.667	0.60	0.60	complet	proche	0.05	0.147	0.257	0.317	0.207	132.55	33.14	13.45
5			0.60	0.60	complet	proche	0.05							
6			0.60	0.60	complet	proche	0.05							
7	0.028	0.333	0.60	0.60	complet	inter	0.05	0.071	0.261	0.180	0.145	22.65	5.66	11.79
8	0.029	0.339	0.60	0.60	complet	inter	0.05	0.073	0.249	0.183	0.140	25.92	6.48	13.24
9	0.085	0.669	0.60	0.60	complet	inter	0.05	0.149	0.253	0.316	0.204	116.39	29.10	15.39
10	0.086	0.672	0.60	0.60	complet	inter	0.05	0.154	0.242	0.315	0.197	135.64	33.91	17.93
11			0.60	0.60	complet	inter	0.05							
12			0.60	0.60	complet	inter	0.05							
13	0.028	0.337	0.60	0.60	complet	distant	0.05	0.073	0.252	0.183	0.142	32.62	8.16	17.20
14	0.029	0.339	0.60	0.60	complet	distant	0.05	0.078	0.229	0.185	0.133	34.97	8.74	18.28
15	0.083	0.656	0.60	0.60	complet	distant	0.05	0.150	0.244	0.309	0.197	157.54	39.38	17.23
16	0.075	0.619	0.60	0.60	complet	distant	0.05	0.149	0.225	0.297	0.181	0.00	0.00	0.00
17			0.60	0.60	complet	distant	0.05							
18			0.60	0.60	complet	distant	0.05							

19	0.028	0.329	0.77	0.77	complet	proche	0.05	0.082	0.219	0.185	0.136	39.08	13.03	19.92
20	0.029	0.335	0.77	0.77	complet	proche	0.05	0.079	0.226	0.188	0.137	34.46	11.49	17.23
21	0.077	0.612	0.77	0.77	complet	proche	0.05	0.155	0.209	0.308	0.176	148.48	49.49	13.96
22	0.086	0.657	0.77	0.77	complet	proche	0.05	0.159	0.225	0.324	0.192	146.24	48.75	13.75
23			0.77	0.77	complet	proche	0.05							
24			0.77	0.77	complet	proche	0.05							
25	0.030	0.339	0.77	0.77	complet	inter	0.05	0.080	0.220	0.192	0.135	38.80	12.93	19.14
26	0.029	0.337	0.77	0.77	complet	inter	0.05	0.081	0.217	0.192	0.134	42.15	14.05	20.72
27	0.071	0.584	0.77	0.77	complet	inter	0.05	0.143	0.217	0.298	0.178	137.13	45.71	17.27
28	0.074	0.601	0.77	0.77	complet	inter	0.05	0.146	0.221	0.302	0.183	138.78	46.26	17.47
29			0.77	0.77	complet	inter	0.05							
30			0.77	0.77	complet	inter	0.05							
31	0.030	0.340	0.77	0.77	complet	distant	0.05	0.077	0.232	0.192	0.139	32.47	10.82	16.38
32	0.030	0.338	0.77	0.77	complet	distant	0.05	0.080	0.226	0.191	0.139	31.65	10.55	16.12
33	0.076	0.609	0.77	0.77	complet	distant	0.05	0.148	0.221	0.302	0.184	142.77	47.59	15.70
34	0.082	0.639	0.77	0.77	complet	distant	0.05	0.160	0.213	0.316	0.182	137.92	45.97	15.17
35			0.77	0.77	complet	distant	0.05							
36			0.77	0.77	complet	distant	0.05							
37	0.019	0.333	0.40	0.40	complet	proche	0.05	0.057	0.365	0.122	0.115	4.07	0.68	3.18
38	0.019	0.337	0.40	0.40	complet	proche	0.05	0.057	0.373	0.122	0.118	3.77	0.63	2.92
39	0.056	0.665	0.40	0.40	complet	proche	0.05	0.115	0.377	0.201	0.181	20.82	3.47	2.11
40	0.057	0.670	0.40	0.40	complet	proche	0.05	0.114	0.385	0.203	0.184	17.71	2.95	1.80
41	0.111	1.014	0.40	0.40	complet	proche	0.05	0.180	0.365	0.255	0.214	67.53	11.26	2.33
42	0.111	1.014	0.40	0.40	complet	proche	0.05	0.179	0.368	0.256	0.216	65.75	10.96	2.26
43	0.019	0.341	0.40	0.40	complet	inter	0.05	0.056	0.374	0.123	0.117	3.25	0.54	2.82
44	0.019	0.338	0.40	0.40	complet	inter	0.05	0.056	0.383	0.121	0.120	3.52	0.59	3.14

45	0.057	0.669	0.40	0.40	complet	inter	0.05	0.110	0.404	0.201	0.191	10.23	1.71	1.34
46	0.056	0.664	0.40	0.40	complet	inter	0.05	0.109	0.407	0.200	0.192	11.15	1.86	1.46
47	0.111	1.014	0.40	0.40	complet	inter	0.05	0.168	0.402	0.256	0.232	32.26	5.38	2.52
48	0.111	1.014	0.40	0.40	complet	inter	0.05	0.167	0.405	0.255	0.234	31.48	5.25	2.46
49	0.019	0.339	0.40	0.40	complet	distant	0.05	0.055	0.381	0.122	0.118	3.16	0.53	2.96
50	0.019	0.334	0.40	0.40	complet	distant	0.05	0.056	0.385	0.121	0.121	3.29	0.55	3.11
51	0.057	0.667	0.40	0.40	complet	distant	0.05	0.107	0.417	0.200	0.195	7.09	1.18	1.08
52	0.056	0.664	0.40	0.40	complet	distant	0.05	0.109	0.408	0.198	0.192	9.54	1.59	1.46
53	0.111	1.014	0.40	0.40	complet	distant	0.05	0.159	0.433	0.256	0.247	19.16	3.19	0.62
54	0.111	1.014	0.40	0.40	complet	distant	0.05	0.164	0.415	0.256	0.239	24.30	4.05	0.78
55	0.028	0.334	0.60	1.29	partiel	proche	0.05	0.071	0.266	0.183	0.147	12.09	6.05	7.05
56	0.029	0.340	0.60	1.29	partiel	proche	0.05	0.070	0.262	0.183	0.144	19.88	9.94	11.64
57	0.085	0.670	0.60	1.29	partiel	proche	0.05	0.148	0.256	0.316	0.206	73.40	36.70	8.94
58	0.085	0.665	0.60	1.29	partiel	proche	0.05	0.156	0.237	0.316	0.194	87.10	43.55	10.61
59			0.60	1.29	partiel	proche	0.05							
60			0.60	1.29	partiel	proche	0.05							
61	0.029	0.344	0.60	1.29	partiel	inter	0.05	0.068	0.280	0.186	0.152	22.57	11.28	13.49
62	0.029	0.338	0.60	1.29	partiel	inter	0.05	0.070	0.260	0.184	0.142	20.73	10.37	12.57
63	0.085	0.666	0.60	1.29	partiel	inter	0.05	0.147	0.256	0.314	0.206	104.55	52.27	16.60
64	0.085	0.667	0.60	1.29	partiel	inter	0.05	0.148	0.255	0.308	0.206	89.03	44.51	14.13
65			0.60	1.29	partiel	inter	0.05							
66			0.60	1.29	partiel	inter	0.05							
67	0.029	0.338	0.60	1.29	partiel	distant	0.05	0.064	0.301	0.185	0.157	14.91	7.46	9.36
68	0.028	0.336	0.60	1.29	partiel	distant	0.05	0.066	0.285	0.183	0.151	20.59	10.30	13.12
69	0.055	0.508	0.60	1.29	partiel	distant	0.05	0.102	0.287	0.256	0.197	62.57	31.29	8.22
70	0.087	0.677	0.60	1.29	partiel	distant	0.05	0.148	0.255	0.318	0.206	93.34	46.67	12.26

71			0.60	1.29	partiel	distant	0.05								-0.12
72			0.60	1.29	partiel	distant	0.05								
73	0.030	0.340	0.77	1.64	partiel	proche	0.05	0.080	0.216	0.192	0.132	33.55	16.78	18.96	
74	0.027	0.316	0.77	1.64	partiel	proche	0.05	0.081	0.221	0.179	0.136	23.72	11.86	14.63	
75	0.088	0.667	0.77	1.64	partiel	proche	0.05	0.165	0.216	0.325	0.186	145.98	72.99	15.93	
76	0.087	0.663	0.77	1.64	partiel	proche	0.05	0.165	0.217	0.325	0.187	135.94	67.97	14.83	
77			0.77	1.64	partiel	proche	0.05								
78			0.77	1.64	partiel	proche	0.05								
79	0.029	0.336	0.77	1.64	partiel	inter	0.05	0.081	0.215	0.189	0.133	33.69	16.85	19.61	
80	0.029	0.335	0.77	1.64	partiel	inter	0.05	0.077	0.231	0.188	0.139	22.12	11.06	12.95	
81	0.075	0.603	0.77	1.64	partiel	inter	0.05	0.157	0.200	0.303	0.168	142.63	71.32	20.84	
82	0.088	0.666	0.77	1.64	partiel	inter	0.05	0.162	0.222	0.324	0.190	132.22	66.11	19.32	
83			0.77	1.64	partiel	inter	0.05								
84			0.77	1.64	partiel	inter	0.05								
85	0.030	0.337	0.77	1.64	partiel	distant	0.05	0.083	0.212	0.190	0.133	31.96	15.98	18.99	
86	0.029	0.335	0.77	1.64	partiel	distant	0.05	0.081	0.213	0.191	0.131	29.95	14.97	17.74	
87	0.087	0.662	0.77	1.64	partiel	distant	0.05	0.168	0.211	0.321	0.183	118.90	59.45	15.17	
88	0.086	0.656	0.77	1.64	partiel	distant	0.05	0.169	0.206	0.320	0.179	151.35	75.67	19.31	
89	0.110	0.769	0.77	1.64	partiel	distant	0.05	0.194	0.213	0.357	0.195	141.12	70.56	8.83	
90			0.77	1.64	partiel	distant	0.05								
91	0.020	0.343	0.40	0.90	partiel	proche	0.05	0.059	0.343	0.124	0.111	1.62	0.54	1.10	
92	0.019	0.338	0.40	0.90	partiel	proche	0.05	0.060	0.336	0.125	0.110	2.05	0.68	1.38	
93	0.057	0.671	0.40	0.90	partiel	proche	0.05	0.119	0.360	0.202	0.175	9.32	3.11	0.85	
94	0.057	0.667	0.40	0.90	partiel	proche	0.05	0.113	0.390	0.204	0.186	13.53	4.51	1.23	
95	0.111	1.014	0.40	0.90	partiel	proche	0.05	0.181	0.363	0.260	0.213	32.47	10.82	1.00	
96	0.111	1.014	0.40	0.90	partiel	proche	0.05	0.177	0.374	0.258	0.218	41.78	13.93	1.29	

97	0.019	0.342	0.40	0.90	partiel	inter	0.05	0.058	0.365	0.123	0.117	3.10	1.03	2.41
98	0.019	0.338	0.40	0.90	partiel	inter	0.05	0.063	0.322	0.123	0.109	4.42	1.47	3.44
99	0.057	0.668	0.40	0.90	partiel	inter	0.05	0.113	0.387	0.202	0.184	9.58	3.19	1.13
100	0.057	0.667	0.40	0.90	partiel	inter	0.05	0.118	0.366	0.204	0.178	18.95	6.32	2.23
101	0.111	1.014	0.40	0.90	partiel	inter	0.05	0.177	0.374	0.258	0.218	39.68	13.23	2.78
102	0.111	1.014	0.40	0.90	partiel	inter	0.05	0.179	0.368	0.260	0.216	46.92	15.64	3.29
103	0.019	0.339	0.40	0.90	partiel	distant	0.05	0.057	0.364	0.124	0.115	4.70	1.57	3.85
104	0.020	0.345	0.40	0.90	partiel	distant	0.05	0.059	0.352	0.125	0.114	5.28	1.76	4.25
105	0.056	0.664	0.40	0.90	partiel	distant	0.05	0.113	0.389	0.201	0.186	19.94	6.65	2.71
106	0.056	0.658	0.40	0.90	partiel	distant	0.05	0.111	0.393	0.202	0.186	18.83	6.28	2.56
107	0.111	1.014	0.40	0.90	partiel	distant	0.05	0.172	0.389	0.258	0.226	56.33	18.78	1.62
108	0.111	1.014	0.40	0.90	partiel	distant	0.05	0.182	0.360	0.256	0.211	79.31	26.44	2.29
109			0.60	0.60	complet	proche	0.15							
110			0.60	0.60	complet	proche	0.15							
111			0.60	0.60	complet	proche	0.15							
112			0.60	0.60	complet	proche	0.15							
113			0.60	0.60	complet	proche	0.15							
114			0.60	0.60	complet	proche	0.15							
115			0.60	0.60	complet	inter	0.15							
116			0.60	0.60	complet	inter	0.15							
117			0.60	0.60	complet	inter	0.15							
118			0.60	0.60	complet	inter	0.15							
119			0.60	0.60	complet	inter	0.15							
120			0.60	0.60	complet	inter	0.15							
121			0.60	0.60	complet	distant	0.15							
122			0.60	0.60	complet	distant	0.15							

123			0.60	0.60	complet	distant	0.15							
124			0.60	0.60	complet	distant	0.15							
125			0.60	0.60	complet	distant	0.15							
126			0.60	0.60	complet	distant	0.15							
127	0.029	0.334	0.77	0.77	complet	proche	0.15	0.054	0.399	0.067	0.068	3.06	1.02	19.09
128	0.030	0.339	0.77	0.77	complet	proche	0.15	0.058	0.362	0.069	0.067	3.89	1.30	24.21
129	0.087	0.662	0.77	0.77	complet	proche	0.15	0.111	0.395	0.149	0.141	42.07	14.02	16.21
130	0.086	0.656	0.77	0.77	complet	proche	0.15	0.108	0.404	0.147	0.140	38.89	12.96	15.26
131	0.130	0.852	0.77	0.77	complet	proche	0.15	0.162	0.329	0.192	0.159	176.07	58.69	17.51
132	0.121	0.813	0.77	0.77	complet	proche	0.15	0.138	0.386	0.183	0.166	92.94	30.98	9.82
133	0.029	0.332	0.77	0.77	complet	inter	0.15	0.055	0.377	0.068	0.066	4.74	1.58	33.75
134	0.030	0.342	0.77	0.77	complet	inter	0.15	0.056	0.382	0.070	0.068	0.64	0.21	4.54
135	0.086	0.660	0.77	0.77	complet	inter	0.15	0.113	0.380	0.148	0.137	32.98	10.99	14.75
136	0.087	0.664	0.77	0.77	complet	inter	0.15	0.109	0.400	0.148	0.140	24.93	8.31	11.15
137	0.140	0.893	0.77	0.77	complet	inter	0.15	0.165	0.344	0.200	0.169	171.41	57.14	17.20
138	0.140	0.893	0.77	0.77	complet	inter	0.15	0.161	0.356	0.199	0.172	148.20	49.40	14.96
139	0.029	0.336	0.77	0.77	complet	distant	0.15	0.054	0.400	0.068	0.068	2.60	0.87	19.86
140	0.030	0.342	0.77	0.77	complet	distant	0.15	0.056	0.377	0.070	0.067	2.27	0.76	17.33
141	0.087	0.665	0.77	0.77	complet	distant	0.15	0.107	0.414	0.149	0.143	21.31	7.10	10.28
142	0.087	0.662	0.77	0.77	complet	distant	0.15	0.110	0.402	0.147	0.142	30.48	10.16	14.95
143	0.140	0.893	0.77	0.77	complet	distant	0.15	0.148	0.401	0.201	0.183	82.58	27.53	12.36
144	0.140	0.893	0.77	0.77	complet	distant	0.15	0.160	0.359	0.200	0.173	120.06	40.02	17.97
145	0.020	0.347	0.40	0.40	complet	proche	0.15	0.057	0.391	0.046	0.045	0.82	0.14	2.96
146	0.019	0.340	0.40	0.40	complet	proche	0.15	0.057	0.372	0.045	0.043	-0.70	-0.12	-2.51
147	0.058	0.676	0.40	0.40	complet	proche	0.15	0.110	0.415	0.097	0.092	14.84	2.47	6.82
148	0.056	0.665	0.40	0.40	complet	proche	0.15	0.110	0.411	0.094	0.091	18.64	3.11	9.06

149	0.113	1.026	0.40	0.40	complet	proche	0.15	0.176	0.393	0.144	0.129	80.58	13.43	8.69
150	0.111	1.014	0.40	0.40	complet	proche	0.15	0.171	0.403	0.142	0.130	87.69	14.61	9.64
151	0.020	0.343	0.40	0.40	complet	inter	0.15	0.053	0.400	0.045	0.043	-0.04	-0.01	-0.28
152	0.019	0.334	0.40	0.40	complet	inter	0.15	0.055	0.395	0.044	0.044	0.48	0.08	3.38
153	0.057	0.668	0.40	0.40	complet	inter	0.15	0.105	0.444	0.095	0.095	3.08	0.51	2.67
154	0.057	0.667	0.40	0.40	complet	inter	0.15	0.106	0.439	0.095	0.095	5.39	0.90	4.67
155	0.111	1.016	0.40	0.40	complet	inter	0.15	0.157	0.457	0.142	0.139	18.26	3.04	3.30
156	0.112	1.017	0.40	0.40	complet	inter	0.15	0.159	0.450	0.142	0.138	23.91	3.99	4.35
157	0.020	0.343	0.40	0.40	complet	distant	0.15	0.056	0.389	0.045	0.044	-0.64	-0.11	-4.91
158	0.019	0.336	0.40	0.40	complet	distant	0.15	0.054	0.391	0.044	0.043	1.38	0.23	10.62
159	0.057	0.666	0.40	0.40	complet	distant	0.15	0.105	0.446	0.094	0.095	5.45	0.91	5.36
160	0.057	0.666	0.40	0.40	complet	distant	0.15	0.106	0.439	0.094	0.095	6.50	1.08	6.39
161	0.113	1.023	0.40	0.40	complet	distant	0.15	0.157	0.462	0.142	0.141	20.49	3.42	4.29
162	0.111	1.015	0.40	0.40	complet	distant	0.15	0.159	0.449	0.141	0.138	29.06	4.84	6.14
163			0.60	1.29	partiel	proche	0.15							
164			0.60	1.29	partiel	proche	0.15							
165			0.60	1.29	partiel	proche	0.15							
166			0.60	1.29	partiel	proche	0.15							
167			0.60	1.29	partiel	proche	0.15							
168			0.60	1.29	partiel	proche	0.15							
169			0.60	1.29	partiel	inter	0.15							
170			0.60	1.29	partiel	inter	0.15							
171			0.60	1.29	partiel	inter	0.15							
172			0.60	1.29	partiel	inter	0.15							
173			0.60	1.29	partiel	inter	0.15							
174			0.60	1.29	partiel	inter	0.15							

175			0.60	1.29	partiel	distant	0.15							
176			0.60	1.29	partiel	distant	0.15							
177			0.60	1.29	partiel	distant	0.15							
178			0.60	1.29	partiel	distant	0.15							
179			0.60	1.29	partiel	distant	0.15							
180			0.60	1.29	partiel	distant	0.15							
181	0.030	0.338	0.77	1.64	partiel	proche	0.15	0.057	0.359	0.069	0.065	0.94	0.47	6.78
182	0.030	0.342	0.77	1.64	partiel	proche	0.15	0.058	0.361	0.070	0.067	2.45	1.22	17.70
183	0.084	0.649	0.77	1.64	partiel	proche	0.15	0.118	0.358	0.145	0.134	28.79	14.40	13.34
184	0.086	0.660	0.77	1.64	partiel	proche	0.15	0.124	0.333	0.148	0.129	43.52	21.76	19.56
185	0.140	0.893	0.77	1.64	partiel	proche	0.15	0.167	0.338	0.201	0.167	112.57	56.28	12.33
186	0.140	0.893	0.77	1.64	partiel	proche	0.15	0.175	0.316	0.201	0.161	149.68	74.84	16.40
187	0.030	0.339	0.77	1.64	partiel	inter	0.15	0.056	0.380	0.069	0.068	5.58	2.79	46.07
188	0.027	0.322	0.77	1.64	partiel	inter	0.15	0.054	0.385	0.065	0.066	4.23	2.11	34.90
189	0.088	0.667	0.77	1.64	partiel	inter	0.15	0.117	0.362	0.150	0.134	54.88	27.44	28.01
190	0.088	0.665	0.77	1.64	partiel	inter	0.15	0.111	0.385	0.148	0.137	44.99	22.49	23.27
191	0.140	0.893	0.77	1.64	partiel	inter	0.15	0.161	0.356	0.199	0.172	159.59	79.80	18.70
192	0.140	0.893	0.77	1.64	partiel	inter	0.15	0.162	0.353	0.199	0.171	108.94	54.47	12.76
193	0.030	0.338	0.77	1.64	partiel	distant	0.15	0.055	0.390	0.068	0.068	2.19	1.10	19.40
194	0.030	0.340	0.77	1.64	partiel	distant	0.15	0.056	0.382	0.069	0.068	3.10	1.55	27.46
195	0.087	0.663	0.77	1.64	partiel	distant	0.15	0.109	0.402	0.149	0.141	22.90	11.45	12.80
196	0.086	0.659	0.77	1.64	partiel	distant	0.15	0.108	0.405	0.149	0.141	20.62	10.31	11.58
197	0.140	0.893	0.77	1.64	partiel	distant	0.15	0.154	0.379	0.199	0.178	93.36	46.68	16.32
198	0.140	0.893	0.77	1.64	partiel	distant	0.15	0.157	0.369	0.202	0.175	95.75	47.87	16.63
199	0.020	0.347	0.40	0.90	partiel	proche	0.15	0.056	0.373	0.046	0.042	1.74	0.58	5.61
200	0.018	0.330	0.40	0.90	partiel	proche	0.15	0.056	0.394	0.043	0.045	0.30	0.10	0.96

201	0.056	0.664	0.40	0.90	partiel	proche	0.15	0.110	0.410	0.094	0.091	7.46	2.49	3.23
202	0.056	0.662	0.40	0.90	partiel	proche	0.15	0.114	0.396	0.094	0.091	13.37	4.46	5.84
203	0.111	1.013	0.40	0.90	partiel	proche	0.15	0.165	0.424	0.142	0.134	27.20	9.07	2.67
204	0.112	1.020	0.40	0.90	partiel	proche	0.15	0.181	0.374	0.145	0.125	38.65	12.88	3.71
205	0.018	0.331	0.40	0.90	partiel	inter	0.15	0.054	0.391	0.043	0.043	1.58	0.53	9.98
206	0.019	0.339	0.40	0.90	partiel	inter	0.15	0.057	0.393	0.044	0.046	1.43	0.48	9.04
207	0.057	0.669	0.40	0.90	partiel	inter	0.15	0.106	0.436	0.095	0.094	10.16	3.39	7.91
208	0.057	0.667	0.40	0.90	partiel	inter	0.15	0.104	0.445	0.095	0.094	8.10	2.70	6.35
209	0.112	1.018	0.40	0.90	partiel	inter	0.15	0.162	0.438	0.142	0.136	49.69	16.56	8.03
210	0.111	1.011	0.40	0.90	partiel	inter	0.15	0.164	0.429	0.142	0.135	48.18	16.06	7.84
211	0.019	0.336	0.40	0.90	partiel	distant	0.15	0.055	0.397	0.044	0.044	0.05	0.02	0.35
212	0.019	0.341	0.40	0.90	partiel	distant	0.15	0.055	0.398	0.045	0.044	2.51	0.84	17.36
213	0.057	0.667	0.40	0.90	partiel	distant	0.15	0.105	0.442	0.095	0.095	9.59	3.20	8.32
214	0.056	0.664	0.40	0.90	partiel	distant	0.15	0.105	0.441	0.094	0.094	9.68	3.23	8.52
215	0.111	1.016	0.40	0.90	partiel	distant	0.15	0.162	0.436	0.142	0.136	52.42	17.47	9.86
216	0.112	1.021	0.40	0.90	partiel	distant	0.15	0.163	0.436	0.143	0.136	51.03	17.01	9.50