

Master of Science HES-SO in Engineering
Civil Engineering (CE), Hydraulic Engineering

FORCE APPLIQUEE SUR UN RÂTELIER POUR UNE APPARITION EXTRÊME DE BOIS FLOTTANTS

Loïc Bénet

Sous la direction du
Prof. Dr. Michael Pfister
HEIA-FR, HES-SO

Expert externe
Jean-Claude Kolly
Groupe E

Fribourg, HES-SO//Master, Mars 2022, Version pour le BFE

Table des matières

Table of Contents

1	CONTEXTE.....	1
1.1	ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE	2
1.2	CARACTÉRISTIQUE	2
1.3	POTENTIEL DE DANGER.....	2
1.4	MESURE D'ATTÉNUATION	3
1.5	FORCE CONTRE LES RÂTELIER.....	4
1.6	BESOIN DE RECHERCHE ET QUESTION-CLÉS	11
2	MÉTHODE	13
2.1	MODÈLE RÉDUIT	13
2.2	VALIDATION	18
2.3	DESCRIPTIF DES ESSAIS	21
3	FORCE DE L'EAU	27
3.1	MESURE MOMENT	27
3.2	VITESSE D'APPROCHE	27
3.3	COEFFICIENT DE TRAINÉE.....	30
4	FORCE DES BOIS FLOTTANTS.....	35
4.1	OBSERVATIONS GÉNÉRALES	35
4.2	VISUALISATION ET TRAITEMENT DES DONNÉES.....	38
4.3	FORCE SUR UN RÂTELIER COMPLET	40
4.4	RÂTELIER PARTIEL.....	53
4.5	COMPARAISON AVEC LA LITTÉRATURE	55
5	RECOMMANDATION.....	59
5.1	FORCE DES BOIS FLOTTANTS : APPROCHE DÉVELOPPÉE.....	59
5.2	FORCE DES BOIS FLOTTANTS : APPROCHE PRAGMATIQUE.....	61
5.3	FORCE TOTALE	61
6	FAIBLES QUANTITÉS DE BOIS FLOTTANTS	63
7	LIMITE ET PERSPECTIVE.....	67
8	CONCLUSION	69
8.1	CONTEXTE.....	69
8.2	MODÈLE PHYSIQUE.....	69
8.3	FORCE HYDRODYNAMIQUE	70
8.4	FORCE AVEC DES BOIS FLOTTANTS	71
8.5	RECOMMANDATION.....	73
9	BIBLIOGRAPHIE.....	75

10 ANNEXES	77
10.1 ANNEXE 1A : PARAMÈTRES TESTÉS POUR LE RÂTELIER COMPLET.....	77
10.2 ANNEXE 1B : RÉSULTATS POUR LE RÂTELIER COMPLET.....	78
10.3 ANNEXE 2A : PARAMÈTRES TESTÉS POUR LE RÂTELIER PARTIEL	80
10.4 ANNEXE 2B : RÉSULTATS POUR LE RÂTELIER PARTIEL	81
10.5 ANNEXE 3A : PARAMÈTRES TESTÉS POUR LES PLUS FAIBLES APPARITIONS DE BOIS FLOTTANTS.....	83
10.6 ANNEXE 3B : RÉSULTATS POUR LES PLUS FAIBLES APPARITIONS DE BOIS FLOTTANTS.....	83

Nomenclature

A	surface perpendiculaire à l'écoulement de la barre de râtelier immergée (ici, $A=D_B(H+0.15)$, Figure 14) [m ²]
A_B	section d'obstruction par le bois flottants à la barre de râtelier (équation 21) [m ²]
A_C	section libre d'écoulement par NCHRP (2000) [m ²]
A_O	section obstruée par des bois flottants par NCHRP (2000) [m ²]
ΔA	réduction de la section d'écoulement, équation (18) [m ²]
a	avancement du râtelier (par rapport au front vertical du déversoir, équations 6 à 8) [m]
b	largeur d'une passe [m]
B	largeur du canal [m]
C_d	coefficient du déversoir [-]
C_W	coefficient de trainée [-]
C_{WB}	coefficient de trainée résultant d'un blocage de bois flottants avec un débit (équation 20) [-]
C_{WC}	coefficient de trainée calculé selon Cheng 2013) (équation14) [-]
C_{WE}	coefficient de trainée de la poussée de l'eau sur le modèle réduit (équation 17) [-]
D	diamètre des troncs [m]
D_B	diamètre des barres du râtelier (ici $D_B=0.04\text{m}$) [m]
D_M	diamètre maximale des troncs [m]
Δt	intervalle de temps où la vitesse du tronc est réduite à zéro (USCE, 1997) [s]
Δz	différence entre 2 points de mesure de la vitesse [m]
e	facteur d'enveloppe (équation 24) [-]
F_B	force produite par un blocage de bois flottants contre un râtelier (équation 18) [N]
f_B	force produite par un blocage de bois flottants contre un râtelier par barre de râtelier (équation 19) [N]
F_C	force calculée par le coefficient de trainée calculé pour la poussée de l'eau (équation 15) [N]
F_D	force des bois flottants mesurée par NCHRP (2000) [N]
F_E	force de la poussée de l'eau mesurée dans le modèle réduit (équation17) [N]
$F_{i,max}$	force d'impact maximale développée par Haehnel et Daly (2004) [N]
F_k	force des troncs produite sur la structure par Kälin et al. (2005) [kN]
F_P	force propre initiale au système de mesure [N]
F_T	force totale mesuré dans le modèle réduit [N]
F	nombre de Froude [-]
F_0	nombre de Froude dans le réservoir (amont) [-]
g	accélération de la gravité [m/s ²]
H	charge du déversoir [m]
H_D	charge de dimensionnement du déversoir (ici $H_D=0.15\text{ m}$) [m]
H_R	charge de référence (sans bois, capacité libre) [m]
ΔI	quantité d'énergie échangée (équation 22) [J]
L	longueur des troncs [m]
L_M	longueur des troncs les plus longs (ici $L_M=0.433\text{ m}$) [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 (ici $l_R=0.40\text{m}$) [m]
I_T	force d'impact (USCE, 1997) [N]

m	masse de bois flottants ajoutés (Haehnel et Daly, 2004) [kg]
M_C	moment calculé théorique (équation 16) [Nm]
M_R	moment mesuré dans le modèle pour la poussée de l'eau (équation 10) [Nm]
M_T	masse du tronc (USCE, 1997) [kg]
n	nombre de passes ouvertes [-]
n_B	nombre de barres de râtelier [-]
ρ	masse volumique de l'eau (ici $\rho=1'000\text{kg/m}^3$) [kg/m^3]
Q	débit [m^3/s]
r	facteur pour le type de râtelier choisi (équation 24) [-]
R^2	coefficient de détermination [-]
R	nombre de Reynolds [-]
S	ratio de surface obstruée de bois flottants par NCHRP (2000) [-]
T	force de trainée selon Gippel et al. (1996) [N]
Θ	orientation du bois flottants par rapport au pont selon Majtan et al. (2021) [°]
σ	écart-type, ici des forces mesurées par la jauge de contrainte [N]
u	vitesse (Haehnel et Daly, 2004) [m/s]
U_x	composante horizontale de la vitesse par Dorthe (2021) [m/s]
U_B	vitesse horizontale à la surface de l'eau à l'emplacement de la barre du râtelier [m/s]
U_M	vitesse moyenne horizontale le long de la barre du râtelier par Dorthe (2021) [m/s]
U_o	vitesse dans le réservoir (amont) [m/s]
U_1	vitesse d'approche en amont pour Gippel et al. (1996) [m/s]
ΔU	réduction de la vitesse d'écoulement (équation 21) [m/s]]
μ	moyenne de la force mesurée pour un palier de débit [N]
V_B	vitesse d'écoulement contractée à la suite du blocage de bois flottants par NCHRP (2000) [m/s]
V_c	volume caractéritique de bois flottants selon Schalko (2019) [m^3]
V_s	volume de bois flottants spécifiques bloqués [m^3]
V_T	vitesse d'approche (USCE, 1997) [m/s]
ν	viscosité cinématique de l'eau (ici $\nu=1.31*10^{-6}\text{m}^2/\text{s}$) [m^2/s]
W	décalage vertical entre le fond du canal et la crête du déversoir (ici, $W=0.42\text{ m}$) [m]
X	charge relative, équation 11 [-]
z	profondeur d'écoulement dans le canal [m]

Résumé

Les bois flottants sont transportés dans les cours d'eau par des phénomènes naturels. Pour les besoins de la civilisation, des barrages ont été installés sur les cours d'eau. Le libre passage des bois flottants est donc potentiellement perturbé. Les bois flottants peuvent rester bloqués dans le réservoir à proximité des évacuateurs de crue des barrages. Avec la présence de volumes extrêmes de bois flottants et des débits de crue, le fonctionnement des évacuateurs de crue peut être limité par l'obstruction formée par les bois flottants.

Les connaissances sur les bois flottants sont grandes et la littérature scientifique à disposition est dense. La définition des bois flottants, les phénomènes de transport et la composition sont bien documentés. Les conséquences des blocages des bois flottants contre les évacuateurs de crue ont déjà fait l'objet d'études et des observations *in situ* sont également disponibles.

L'obstruction de bois flottants aux évacuateurs de crue provoque une surélévation du niveau du réservoir qui peut être limitée par des mesures de protection. Par exemple, un râtelier retient les bois flottants légèrement en amont de l'évacuateur de crue et la section critique d'écoulement est laissée libre de toute obstruction.

Il faut également souligner l'importance écologique des bois flottants dans les cours d'eau. Leur présence participe à créer des milieux alluviaux diversifiés. Afin qu'ils ne soient pas retenus au barrage (et éliminés), par conséquent l'aval des cours d'eau se retrouve sans bois flottants, un râtelier, appelé partiel, a montré lors de précédentes études un potentiel pour faciliter leur passage des ouvrages d'accumulation.

Cette étude se concentre sur les forces provoquées par le blocage de bois flottants, dans des conditions extrêmes (débit, volume de bois flottants, largeur étroite des ouvertures) contre les râteliers de protection qu'ils soient partiels ou complets situés en amont des évacuateurs de crue des barrages. Le but est d'apporter une réponse pragmatique aux ingénieurs en charge du dimensionnement de ces ouvrages de protection et de connaître quels sont les paramètres-clés qui influencent la force provoquée par les bois flottants.

Un modèle physique, situé à la PL-LCH de l'EPFL, a été utilisé pour les expériences. Il s'agit d'un canal rectangulaire avec un déversoir standard situé à l'aval. Un système de mesure de force avec une jauge de contrainte qui représente un râtelier de protection a été positionné en amont du déversoir. Un volume de bois flottants défini comme caractéristique et extrême a été ajouté dans le canal selon le protocole d'essai établi. Les paramètres définis comme clés ont fait l'objet d'une variation systématique afin d'étudier leurs d'influences. Le fonctionnement du modèle a été préalablement vérifié et calibré.

Les essais ont montré des comportements différents entre les râteliers complets et partiels. Tout le volume de bois flottants est retenu contre le râtelier complet alors qu'une partie du volume est retenue contre le râtelier partiel (car l'autre partie vient s'appuyer contre les piliers de l'évacuateur de crue). Les forces mesurées sont donc plus importantes pour le râtelier complet que partiel.

Les forces mesurées au râtelier (uniquement la part des bois flottants) ont été traduites de manière additionnelle sous la forme d'un coefficient de trainée C_{WB} par barre de râtelier. Dans la limite des conditions testées, l'analyse des résultats a montré que le coefficient de trainée C_{WB} est fonction de l'espacement relatif des barres de râteliers b_r/L_M (rapport entre la distance entre les barres de râteliers est la longueur maximale des troncs).

Dans une approche développée, trois zones ont été identifiées en fonction de l'espacement relatif b_r/L_M pour définir le coefficient de trainée C_{WB} . Une approche pragmatique propose de prendre en considération un coefficient de trainée constant $C_{WB}=17$.

Pour déterminer l'effort subi par une barre de râtelier, il faut intégrer le coefficient de traînée C_{WB} choisi dans le calcul de la force de trainée, sans oublier d'ajouter la part de la force hydrodynamique.

Cette étude ajoute une connaissance supplémentaire sur le comportement des bois flottants dans des conditions extrêmes contre les barres de râteliers de protection situés en amont des évacuateurs de crue des barrages et apporte aux ingénieurs praticiens une base pour le dimensionnement des râteliers.

Mots-clés : barrage, bois flottants, conditions extrêmes, force, râtelier de protection

1 Contexte

La gestion des bois flottants dans les cours d'eau est d'une importance cruciale. D'une part, les bois flottants sont sources de richesse pour les écosystèmes alluviaux. Ils participent également à la diversité morphologique et hydraulique des cours d'eau. D'autre part, les bois flottants qui se trouvent dans les bassins versants à proximité des cours d'eau sont transportés par les crues en direction des retenues. Une quantité importante de bois flottants peut alors s'accumuler contre les ouvrages de sécurité des barrages comme des évacuateurs de crue. Les accumulations de bois flottants peuvent entraîner des conséquences négatives sur le fonctionnement des ouvrages hydrauliques et conséquemment aussi sur la sécurité des barrages.

L'étude proposée dans ce rapport est une suite consécutive à deux phases précédentes d'expérimentations sur modèle réduit et d'analyses sur le comportement des bois flottants aux évacuateurs de crue.

La première étape a eu pour objectif de quantifier la surélévation du niveau d'eau dans le réservoir à la suite d'un blocage complet et total par des bois flottants contre les piliers sur un déversoir standard comme ouvrage d'entrée d'un évacuateur de crue. L'étude s'est concentrée sur des événements extrêmes, avec un débit de crue de dimensionnement, un volume de bois flottants très importants et des faibles largeurs entre les piliers. Une obstruction peut être une menace importante pour les barrages et leurs évacuateurs de crue car la section d'écoulement libre est réduite par le blocage des bois flottants. En plus de l'étude et la documentation sur l'obstruction de l'entrée d'un évacuateur de crue, trois mesures constructives sont proposées pour réduire (voire éliminer) l'effet de surélévation de la retenue à la suite d'une obstruction. Les mesures constructives ont donné satisfaction pour le maintien de la capacité hydraulique. En revanche, les mesures proposées (sauf la suppression totale des piliers) retiennent les bois flottants en amont des évacuateurs de crue. Les bois flottants sont donc enlevés mécaniquement après la crue et leur apport écologique manque dans le cours d'eau à l'aval du barrage.

La deuxième étape a eu pour but tout en contrôlant la surélévation du niveau d'eau d'y associer le potentiel écologique des bois flottants en les aidant à franchir le déversoir. L'étude a porté sur un râtelier partiel installé en amont de l'évacuateur de crue sur le même modèle réduit. Le type d'apparition des bois flottants est varié allant des petits tas de troncs individuels à des volumes extrêmes similaires à la première étape. La forme du râtelier partiel, son emplacement et la probabilité de blocage ont été documentés et analysés, ainsi que la capacité hydraulique (et indirectement la surélévation de la retenue). Le râtelier partiel a permis de réduire la probabilité de blocage avec l'apparition de petits tas de troncs individuels pour une certaine position en amont du râtelier, ce qui correspond à une augmentation de la valeur écologique. Le blocage de bois flottants contre le râtelier partiel et les piliers de l'évacuateur de crue diminue la capacité hydraulique en référence d'une situation sans bois flottants. La combinaison du râtelier partiel (pour le passage des bois flottants, écologie) avec une prolongation de la tête des piliers dans le réservoir (contrôler le niveau d'eau, sécurité) résulte d'une meilleure efficacité hydraulique et d'une augmentation de la valeur écologique.

La présente troisième étude se concentre sur l'estimation des forces produites par un blocage de bois flottants contre les barres de râteliers (complets ou partiels) pour permettre le dimensionnement statique des éléments. Les essais se déroulent sur le même modèle réduit. Un système de mesure de force est installé et lié au râtelier étudié. L'étude se concentre sur les conditions extrêmes en termes de débit de crue, de volume de bois et de largeurs étroites entre les piliers de l'évacuateur de crue. Ce sont les conditions les plus défavorables pour les ouvrages hydrauliques.

Peu d'approches pratiques existent pour le dimensionnement statique des râteliers complets et partiels positionnés en amont de évacuateurs de crue exposés à des bois flottants. Cette étude apportera une connaissance supplémentaire liée au comportement des bois flottants pour les conditions extrêmes (mentionnées dans ce rapport).

1.1 Etude bibliographique

La littérature sur les bois flottants est très conséquente et vaste. Les thèmes abordent autant la production de bois flottants dans les bassins versants, que le transport dans les milieux fluviaux, la valeur écologique, les conséquences aux ouvrages hydrauliques ou encore les moyens de protection.

L'étude de littérature présentée se concentre principalement sur les connaissances déjà à disposition sur la thématique des forces engendrées par les bois flottants sur des structures, typiquement des râteliers (chapitre 1.5). Les trois premiers sous-chapitres 1.2 à 1.4 apportent quelques définitions et descriptions sur les conséquences des bois flottants, et le sous-chapitre 1.5 décrit des études de références dans le domaine des forces sur les structures, en particulier les râteliers, par des bois flottants.

1.2 Caractéristique

La définition des bois flottants est essentielle à l'étude sur le sujet. Plusieurs auteurs (Braudrick et al., 1997, Ruiz-Villanueva et al., 2016 et Wohl et al., 2016) se mettent d'accord sur la description suivante. Un bois flottant est défini comme « grand » lorsqu'il possède une longueur supérieure à 1.00 m et un diamètre plus grand que 0.10 m.

Les bois flottants se retrouvent dans un cours d'eau à la suite de différents processus tels que l'érosion des berges, les glissements, les coulées de boue de versant, les avalanches, les chablis, la pression de la neige et les glissements du manteau neigeux, d'après Rickli et Hess (2009). Les bois flottants peuvent être mobilisables s'ils se trouvent directement dans la section d'écoulement du cours d'eau, à proximité sur les berges ou encore s'ils sont emportés par divers processus dans le secteur.

Les dimensions des bois flottants sont extrêmement variables et influencées tout au long du transport par divers paramètres comme la pente de la rivière, le débit, la taille et la quantité de roches, de galets et/ou de blocs rocheux bordant le lit du canal et les interactions entre eux. De manière générale, les bois flottants se décomposent en plus petits éléments.

Si la définition de la forme et de la taille des bois flottants est complexe, le type d'apparition l'est aussi. Les régimes de transport sont classés par la littérature de la manière suivante : « un-congested » (troncs individuels), « congested » (groupes petits à moyens) ou « hyper-congested » (apparition extrême). Le caractère « extrême » considéré dans cette étude se concentre sur une apparition de bois flottants « hyper-congested », autrement dit, l'ensemble de la section d'écoulement est couvert par des bois flottants.

Des relevés liés aux inondations sont disponibles et ont été utilisés dans cette étude pour la définition des caractéristiques des bois flottants. Toutes les informations à ce sujet sont présentées au chapitre 2.1.4.

1.3 Potentiel de danger

Pour les divers besoins de la civilisation, des ouvrages hydrauliques sont implantés dans les cours d'eau. Le passage de l'eau est altéré par ces ouvrages tout comme celui des sédiments, des bois flottants ou même de la faune.

L'ouvrage influence le transport des bois flottants et des sédiments, typiquement avec un stockage à la suite d'une décélération des vitesses d'écoulement à une retenue. Ceci est une observation typique des réservoirs induits par des barrages. Les bois flottants s'accumulent dans la retenue et se positionnent à l'évacuateur de crue du barrage durant la crue à cause du courant prononcé. Les troncs les plus longs présentent un risque élevé d'obstruer l'ouvrage et de réduire sa capacité d'évacuation du débit.

Par souci économique, les évacuateurs de crue sont des ouvrages optimisés dans leur fonctionnement hydraulique. Une perturbation par des bois flottants réduit leur efficience et génère un stockage d'eau supplémentaire dans la retenue (la crue ne peut pas quitter le réservoir comme prévu). Par conséquent, le niveau de l'eau dans la retenue augmente. Si le niveau admissible maximal est dépassé, l'eau peut se déverser sur la crête du barrage et potentiellement éroder la fondation du barrage.

Des bois flottants qui obstruent un évacuateur de crue représentent donc un risque élevé pour la sécurité des barrages et particulièrement pour une digue. La Figure 1 montre le barrage de Palagnedra après un tel événement, fréquemment discuté dans le domaine (Bruschin et al. 1981).



Figure 1. Obstruction de l'évacuateur de crue par des bois flottants sur le barrage de Palagnedra (STK 2017).

Les potentielles obstructions par des bois flottants lors des crues extrêmes peuvent limiter les fonctionnalités et les capacités de décharges des ouvrages hydrauliques, selon Godtland et Tesaker (1994). Une étude sur modèle réduit a montré que les petites (étroites) ouvertures (largeurs faibles des passes de l'évacuateur de crue) sont plus sensibles au risque d'obstruction. Godtland et Tesaker (1994) recommandent une largeur de passes d'au moins 80% de la longueur des plus grands bois flottants présents dans le bassin versant pour limiter le blocage à 10 à 20% du volume de bois flottants total.

D'autres éléments peuvent influencer le blocage des bois flottants. Pour Furlan (2019), les grands débits (grandes hauteurs d'eau sur la crête du déversoir) ont tendance à réduire les blocages, les troncs appelés « longs » bloquent de manière plus systématique que les troncs appelés « courts » sous les mêmes conditions et le nombre de passes ouvertes à l'évacuateur de crue influence l'obstruction.

Dans le cadre d'une obstruction totale à un évacuateur de crue, Pfister et al. (2019) étudient le coefficient de déversoir C_d . Son comportement s'approche d'une constante pour des conditions testées a priori indépendantes du débit (jusqu'au débit de conception), de la largeur des ouvertures (inférieures au critère de Godtland et Tesaker, 1994) et un volume de bois flottants caractéristique (plus grand que celui nécessaire à l'accumulation décisive).

1.4 Mesure d'atténuation

Pour limiter les conséquences des obstructions de bois flottants aux évacuateurs de crue, des mesures d'atténuation sont disponibles. Pfister et al. (2021) citent quelques travaux sur le sujet :

- Hartung et Knauss (1976) : Un déversoir brisant et orientant les troncs les plus longs dans la direction de l'écoulement et des solutions pour retenir les bois flottants dans le réservoir et maintenir ainsi l'entrée libre.
- Schmocke et Weitbrecht (2013) : Une vue d'ensemble des mesures de rétention de bois flottants dans les grandes rivières alpines, comme par exemple un système de bypass.
- Perham (1986) : Des mesures pour maintenir les grilles libres aux entrées des évacuateurs de crue.
- Schmocke et Hager (2013) : Un modèle physique sur l'accumulation de bois flottants sur les râteliers.
- Hartlieb et Bezzola (2000) et Lange et Bezzola (2006) : Un résumé des grilles et des filets construits.
- Möller et al. (2009) : Un concept d'une galerie à déversoir latéral pour la Matteschwelle à Berne.
- Pfister (2010) : Un râtelier longitudinal avec une zone de stockage pour les bois flottants
- Pfister et al. (2019) : Diverses mesures constructives pour améliorer l'efficacité hydraulique au déversoir comme la prolongation de la tête des piliers dans le réservoir, la suppression des piliers et la mise en place d'un râtelier complet ou partiel.

Pfister et al. (2021) ont étudié la mise en place d'un râtelier partiel en amont de l'évacuateur de crue. Le râtelier partiel (Figure 2) a pour but de favoriser l'alignement des bois flottants (forcer la rotation) dans le sens de l'écoulement, en particulier les plus grands troncs pour qu'ils puissent franchir l'ouvrage. Le râtelier joue à la fois

un rôle écologique (les bois flottants restent dans le cours d'eau) et un rôle sécuritaire (la capacité hydraulique est quasiment maintenue au déversoir). Les résultats obtenus diffèrent en fonction de l'apparition de bois flottants (un-congested, congested ou hyper-congested) et de la position du râtelier en amont du déversoir. Comme le critère sécuritaire reste déterminant, Pfister et al. (2021) propose également de coupler le râtelier partiel avec une prolongation de la tête des piliers dans le réservoir pour maintenir la capacité hydraulique.



Figure 2. Exemple de râtelier partiel testé par Pfister et al. (2021).

1.5 Force contre les râteliers

Gippel et al. (1996) ont mené une série d'expériences sur modèle réduit pour déterminer les caractéristiques du coefficient de traînée C_w de bois flottants dans les cours d'eau. Les coefficients de traînée C_w ont été déterminés à partir de l'équation (1) en mesurant la force de traînée T avec un dynamomètre.

$$C_w = \frac{T}{0.5\rho LD U_1^2} \quad (1)$$

Où ρ est la masse volumique de l'eau, L la longueur des bois flottants, D le diamètre des bois flottants et U_1 la vitesse moyenne d'approche de l'eau en amont de l'objet considéré. Il est à noter que la surface projetée LD est typiquement inconnue lors du dimensionnement statique du râtelier.

Des modèles de bois flottants cylindriques ont été construits à partir de tuyaux fermés en PVC avec $D=0.025, 0.048$ et 0.076 m et une longueur de $L=0.33$ à 1.00 m. De même, un modèle en forme d'arbre de 1.00 m de long, à trois branches, a été assemblé à partir de longueurs de tuyaux en PVC de différentes tailles. Les expériences ont été menées pour trois nombres de Froude ($0.35, 0.47$ et 0.63) dans un canal de 2.00 m de large. Les angles d'orientation des bois flottants par rapport à l'écoulement allaient de 0 à 180° (par convention, 0° est parallèle à l'écoulement et 90° est perpendiculaire à la direction de l'écoulement).

La rotation d'un bois flottant de 90° par rapport à la direction de l'écoulement a eu un effet important sur le coefficient de traînée C_w , et le rapport longueur/diamètre des bois flottants a eu une importance mineure sur le coefficient de traînée (Figure 3). Les coefficients de trainée C_w sont compris entre 0.35 et 1.25 sur la Figure 3.

Le coefficient de traînée C_w a été mesuré à différents angles d'orientation par rapport à l'écoulement, ainsi qu'à quatre stades de l'assemblage. Avec la présence de branches, le coefficient de traînée varie moins avec la rotation. Le coefficient de traînée global est plus faible pour l'arbre complet par rapport à celui du bois flottant cylindrique, ce qui s'explique par le fait que le coefficient de traînée est exprimé par rapport à la surface projetée. L'ajout d'un composant de ramifications au bois flottant a augmenté la force de traînée totale, mais le coefficient de traînée a été abaissé parce que l'augmentation de la surface projetée a entraîné une diminution de la force de traînée.

Selon les conditions expérimentales, une variation du coefficient de traînée C_w a été observée en fonction de la hauteur de l'écoulement (la distance du lit et de la surface de l'eau, Figure 4). La hauteur (axe x de la figure) a été exprimée en hauteur relative, c'est-à-dire la distance entre la base du bois flottant et le fond du lit en proportion de

la hauteur totale de l'écoulement. Le coefficient de traînée C_W s'approche de 5 pour une faible hauteur relative d'écoulement et diminue ensuite avec l'augmentation de la hauteur relative.

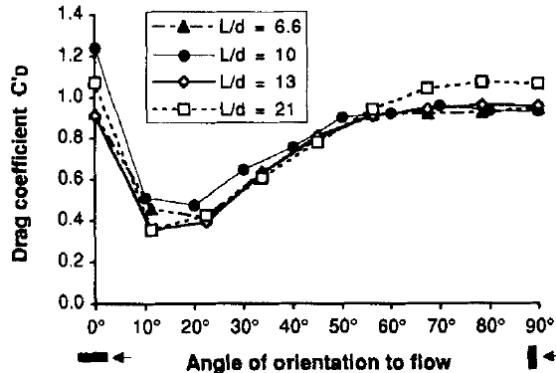


Figure 3. Coefficient de traînée C_W (C_D dans la figure) en fonction de l'orientation des bois flottants (Gippel et al., 1996).

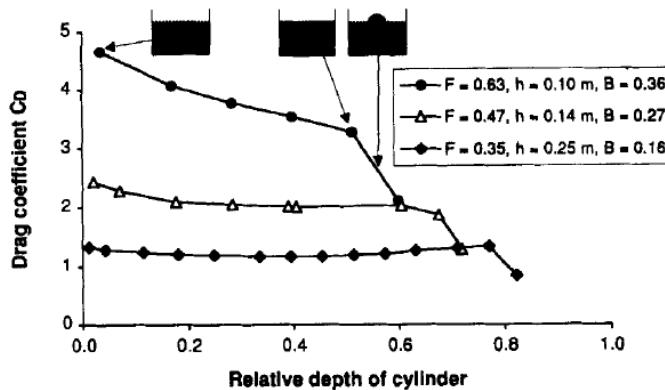


Figure 4. Coefficient de traînée C_W (C_D dans la figure) en fonction de la hauteur d'eau relative (Gippel et al., 1996).

USCE (1997) donne une approche pour le calcul des forces d'impact des différents éléments en bois dans les centrales au fil de l'eau. Les charges de conception sur les petits râteliers (qui empêchent les bois flottants de pénétrer dans la prise d'eau) dépendent de la pression d'eau imposée lorsque la structure est fortement obstruée par des bois flottants. Elle dépend également de l'importance relative de l'installation, de l'espacement des barres et de la possibilité d'un nettoyage fréquent. Si les déchets comprennent de gros bois flottants, les forces d'impact doivent être prises en compte. Une formule approximative (Equation 2) qui peut être employée pour estimer la force d'impact d'un tronc est :

$$I_T = \frac{M_T}{g} \frac{V_T}{\Delta t} = \frac{M_T}{32} \frac{3.2}{0.1} \approx M_T \quad (2)$$

Où I_T est la force d'impact (impulsion), g accélération due à la gravité (en ft/s²), M_T la masse du tronc, V_T la vitesse d'entrée (en ft/s) et Δt l'intervalle de temps pendant lequel la vitesse du tronc est réduite à zéro en raison de l'impact (en secondes).

NCHRP (2000) regroupe trois études sur des forces produites par des bois flottants contre les piliers et les tabliers de pont. Trois types de piliers ont été étudiés, comme illustré à la Figure 5 (la direction de l'écoulement est horizontale par rapport au schéma des piliers). Un seul pilier était positionné au milieu d'un canal trapézoïdal d'une largeur de fond de 3.05 m, la pente des berges était de 1 : 2.

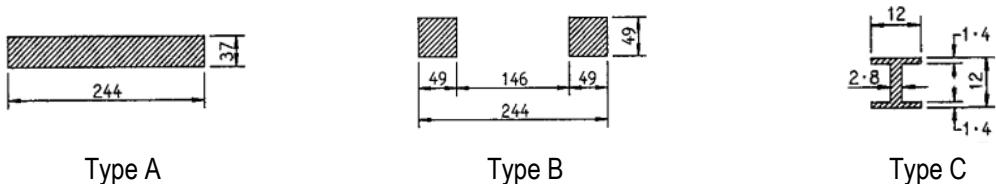


Figure 5. Schéma des trois types de piliers utilisés dans l'étude NCHRP (2000).

Les bois flottants utilisés étaient des troncs d'une longueur de 0.61 m avec des diamètres compris entre 0.0127 et 0.0254 m. Plusieurs apparitions de bois flottants ont été testées : les troncs les plus longs uniquement, les troncs les plus longs mélangés avec des bois flottants plus fins et le mélange de bois flottants bloqués dans une membrane pour permettre le blocage. La Figure 6 montre un blocage de bois flottants contre un pilier.

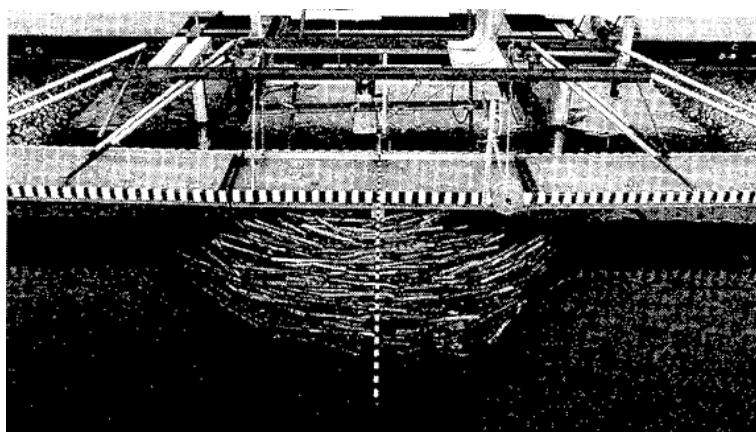


Figure 6. Blocage de bois flottants contre un pilier (NCHRP, 2000).

Les expériences ont étudié séparément la force hydrodynamique de l'eau et la force produite par les bois flottants. En plus de la variation du type de pilier et de l'apparition de bois flottants, la hauteur de dans le canal, le nombre de Froude et les vitesses d'approche sont variés. Les vitesses et la hauteur d'eau sont mesurés dans la même section à 0.5 m en amont et à l'aval de l'ouvrage. La fréquence d'acquisition des données (forces, vitesses et hauteurs d'eau) est fixée entre 10 et 16 Hz.

Sur la base des expériences, NCHRP (2000) calcule un coefficient de trainée C_w sur la base de l'équation (3) :

$$C_w = \frac{F_D}{0.5\rho A_O V_c^2} \quad (3)$$

Où F_D est la force des bois flottants mesurée, ρ la masse volumique de l'eau, A_O la section obstruée par les bois flottants et V_c la vitesse d'écoulement contractée à la suite du blocage de bois flottants.

Un ratio de surface obstruée S est donné avec l'équation (4) et est utilisé à la Figure 7 et la Figure 8 :

$$S = \frac{A_O}{A_O + A_C} \quad (4)$$

Où A_O est la section obstruée par des bois flottants et A_C la section libre d'écoulement (section où la vitesse d'écoulement contractée V_B est mesurée).

NCHRP (2000) propose une enveloppe conservatrice d'un coefficient de trainée C_w pour la force des bois flottants en fonction d'un ratio de surface obstruée S à la Figure 7. Pour le dimensionnement d'un ouvrage, la force hydrostatique de l'eau doit être ajoutée à la force de blocage des bois flottants.

Les observations suivantes sont visibles à la Figure 7 :

- Pour des petits ratios de surface obstruée $S \leq 0.36$, le coefficient de trainée C_w est relativement constant.
- Le coefficient de trainée C_w diminue en fonction du ratio S pour $0.36 < S \leq 0.77$.
- Le coefficient de trainée C_w diminue plus légèrement en fonction du ratio S pour $S > 0.77$.

NCHRP (2000) émet les recommandations suivantes (Figure 8) selon l'enveloppe représentée à la Figure 7. NCHRP (2000) estime un coefficient de trainée C_W pour un pilier avec un blocage de bois flottants à l'amont. Cependant, la section obstruée par des bois flottants et la vitesse de l'écoulement contractée sont des paramètres inconnus par l'ingénieur pour un dimensionnement. La FHWA (2005) mentionne les études de NCHRP (2000) avec des exemples de calculs.

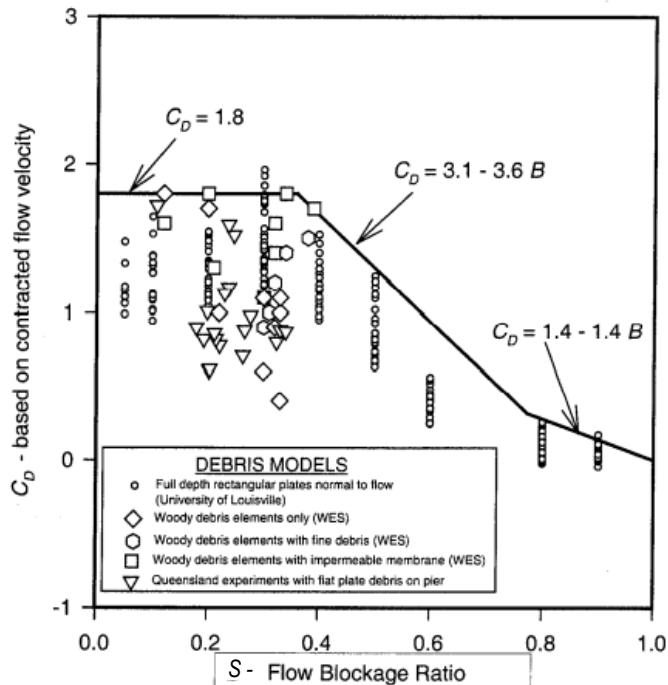


Figure 7. Coefficient de trainée C_W (C_D dans la figure) exprimé en fonction d'un ratio de surface obstruée S selon NCHRP (2000).

S - Range	Fr - Range	C_D
$S < 0.36$	$Fr < 0.4$	$C_D = 1.8$
$S < 0.36$	$0.4 < Fr < 0.8$	$C_D = 2.6 - 2.0 Fr$
$0.36 < S < 0.77$	$Fr < 1$	$C_D = 3.1 - 3.6 B$
$S > 0.77$	$Fr < 1$	$C_D = 1.4 - 1.4 B$

Figure 8. Tableau de recommandation du NCHRP (2000) pour l'évaluation du coefficient de trainée C_W (C_D dans la figure) et ration du surface obstruée S .

Haehnel et Daly (2004) ont étudié en laboratoire la force d'impact maximale des bois flottants contre des obstacles. Les tests ont également étudié l'influence de la géométrie de collision, déterminée par l'orientation des bois flottants lors de l'impact, sur les forces d'impact maximales.

Les expériences sont réalisées dans un canal de 1.22 m de large, 0.61 m de haut et 36.6 m de long. Les troncs ont été lâchés à 7.60 m en amont du point d'impact, afin d'atteindre la vitesse d'écoulement avant l'impact. Par convention, une orientation de 0° d'impact correspondant à un tronc dont l'axe est parallèle à l'écoulement et donc une orientation de 90° à un tronc perpendiculaire à l'écoulement. Si le tronc ne frappe pas la cible d'impact, le test est répété. Des troncs de taille réelle ont été testés dans un bassin d'essai de 9.10 m de large, de 32.4 m de profond et de 337 m de long. Comme l'eau est stationnaire dans le bassin, c'est le chariot d'essai qui est mobile et vient impacter les troncs.

Haehnel et Daly (2004) ont développé une équation simplifiée et linéaire (Equation 6, sur la base d'une considération de la quantité de mouvement) pour définir l'enveloppe de la force d'impact maximale $F_{i,max}$ en N :

$$F_{i,max} = 1500u\sqrt{m} \quad (5)$$

Où u est la vitesse et m la masse des éléments de bois flottants.

La Figure 9 montre l'équation (5) avec les données des essais. La force d'impact maximale $F_{i,max}$ est représentée en fonction de la vitesse « augmentée ».

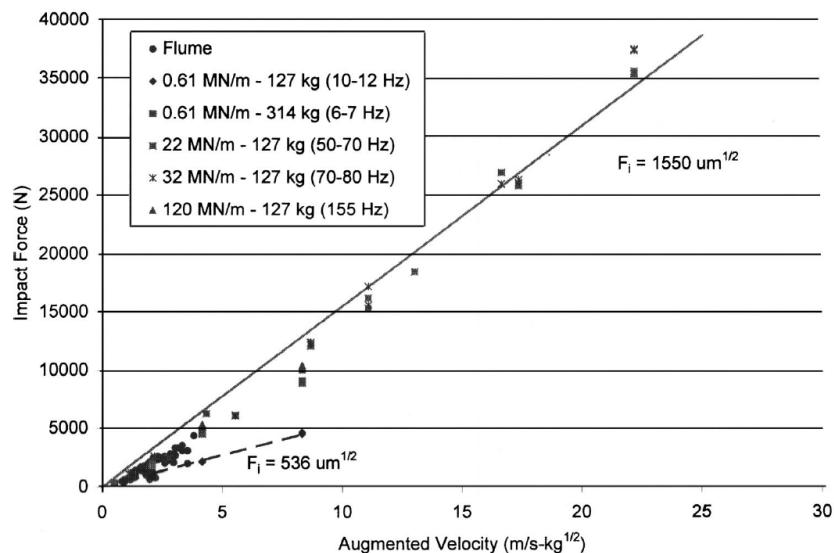


Figure 9. Force d'impact maximale en fonction de la vitesse "augmentée" (Haehnel et Daly, 2004).

L'angle d'impact a un effet significatif sur la force d'impact maximale. Bien que les considérations de masse ajoutée suggèrent que les forces maximales devraient se produire pour un impact central à 90°, il apparaît que la flexion d'un tronc long et mince lors de l'impact réduit considérablement la force. La force maximale de l'impact est associée au fait que le bois frappe la structure à son extrémité, avec l'axe long du tronc parallèle à la direction de l'écoulement et normal à la structure. Les effets de l'excentricité réduisent progressivement la force d'impact maximale au fur et à mesure que l'on augmente l'excentricité.

Kälin et al. (2005) étudient la résistance statique d'une structure hydraulique en acier soumise à l'impact d'un tronc individuel. Ils définissent un tronc standard ($D=0.5$ m et $L=5.8$ m), ainsi qu'une force de $F_k=10$ kN produite par l'impact du tronc directement appliquée sur la structure. L'étude est dirigée sur les caractéristiques mécaniques de la structure et non sur l'installation de mesures constructives ou les forces des bois flottants contre ces dernières.

La vitesse, la direction et l'orientation du tronc sont définis comme les paramètres à étudier. L'expérience a montré que les bois flottants peuvent endommager les structures. Pour influencer le passage des bois flottants, l'ouverture des vannes peut être ajustée. Il n'est pas recommandé que des personnes se trouvent au-dessus de la vanne lors des manipulations, car des troncs peuvent les heurter.

Nistor et al. (2017) passent en revue les recherches les plus récentes sur le mouvement et les charges des bois flottants provoqués par les tsunamis et identifient les orientations futures de la recherche afin de contribuer à l'élaboration d'un plan d'action. Les bois flottants entraînés par l'écoulement peuvent entraîner des charges supplémentaires et des effets sur les structures, en particulier lorsque les bois flottants forment un "barrage" devant la structure ou entre les colonnes, ce qu'on appelle l'accumulation de bois flottants. Les barrages de bois flottants peuvent entraîner une augmentation de la vitesse d'écoulement car ils tendent à rediriger l'écoulement. Ils sont de nature très diversifiée.

L'ensemble de la littérature actuelle couvre les processus fondamentaux d'impact sur les structures verticales, soit à partir de stratégies expérimentales ou analytiques. L'étude des bois flottants dans le contexte de l'ingénierie des tsunamis a été difficile à réaliser en raison de la nature aléatoire du transport des bois flottants. Pour déterminer les charges de bois flottants maximales, les conditions limites doivent être soigneusement prises en compte dans le cadre de la procédure expérimentale. Il est généralement recommandé de viser des échelles aussi grandes que possible pour modéliser de façon précise la charge maximale de bois flottants. Le problème des échelles expérimentales s'étend à la dynamique des bois flottants et aux charges d'impact, pour lesquelles peu de recherches ont été menées pour déterminer les échelles minimales auxquelles l'impact peut se produire.

Spreizer et al. (2019) ont équipé des éléments en bois de capteurs d'accélération et les ont laissés entrer en collision avec des obstacles dans un modèle physique pour enregistrer les mouvements détaillés tels que l'orientation, la rotation et l'accélération.

Les expériences ont eu lieu dans un canal de 6.3 m de long et 1.5 m de large avec un parcours sinueux, des conditions de lit vivant et des remblais fixes. À environ 4 m en aval de l'entrée, un pont avec une seule rangée de piliers représente un prototype de « section transversale restreinte ». Les capteurs intelligents ont été installés dans les bois flottants, présentant des dimensions de 0.267 m de longueur et 0.022 m de diamètre.

La profondeur d'écoulement a été définie au double du diamètre des bois flottants. La fréquence de mesure des capteurs était de 100 Hz. Un suivi vidéo a été fait pour suivre le mouvement des bois flottants. Les tests d'impact ont été considérés comme réussis lorsque le bois flottant a frappé la pile du pont de plein fouet, c'est-à-dire que la longueur du bois flottant était orientée normalement au pont.

Les auteurs décrivent un test expérimental avec les analyses suivantes. Au cours de l'expérience, le bois flottant heurta la paroi du canal ce qui donna lieu à une accélération légèrement inférieure à $4g$ dans la direction principale. Le bois flottant poursuivit son parcours vers l'aval avec un alignement parallèle à la direction de l'écoulement. Elle subit un impact frontal avec la pile de pont, puis un rebond et enfin elle se posa contre la pile de pont. La Figure 10 montre les accélérations enregistrées par les capteurs lors des contacts avec la pile de pont.

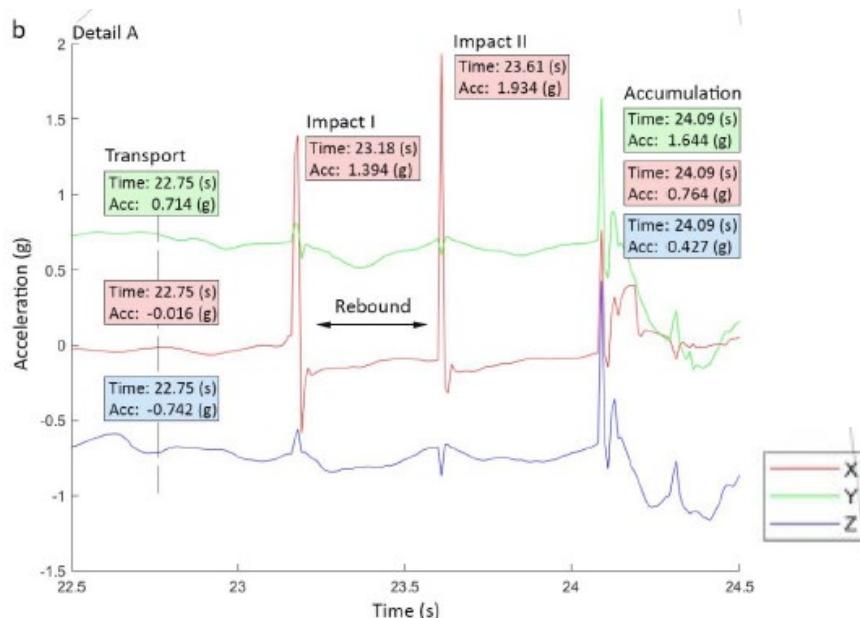


Figure 10. Accélération enregistrée dans le temps avec les trois impacts sur la pile de pont.

À la Figure 10, il est constaté que les deux premiers impacts se sont déroulés de manière frontale, car la variation de l'accélération a été mesurée dans la direction x (longueur du bois flottant). Ensuite, le bois flottant s'est bloqué perpendiculairement à la pile de pont, avec une variation importante de l'accélération enregistrée dans la direction y. Les données révèlent que le deuxième impact après le rebond est d'une amplitude supérieure d'environ 30% à celle du premier impact. L'accélération mesurée lors du second impact est légèrement inférieure à $2g$.

Wüthrich et al. (2020) ont analysé sur la base d'une modélisation physique l'impact et la résistance à l'écoulement à la suite de l'accumulation de bois flottants et de déchets provenant de la civilisation (des conteneurs cargos), principalement pour les bâtiments.

Une onde unique (« surge ») se propageant sur un lit horizontal sec a été générée. Les propriétés hydrodynamiques de l'onde générée se sont avérées très similaires à une vague de rupture de barrage. Le canal de propagation avait une longueur de 15.5 m et une largeur de 1.4 m. La vague du lit sec s'est propagée sur un canal horizontal et lisse avec une célérité frontale de 2.35 m/s et une hauteur maximale de 0.13 m.

Un bâtiment a été inséré dans le canal, constitué d'un cube en aluminium de 0.3 m de côté, représentant à l'échelle une maison résidentielle à trois étages. Des fronts de bâtiment ont été installés à gauche et à droite du bâtiment considéré afin de représenter une rangée de bâtiments typiques pour des villes au bord de la mer. Il est à noter

que ces façades n'ont fait qu'augmenter le rapport de blocage mais n'étaient pas reliées au bâtiment central ni à la plaque de force de mesure.

Des parallélépipèdes en bois représentaient des conteneurs. Les dimensions étaient de 0.058 par 0.058 par 0.120 m. Les bois flottants contenaient des poteaux et de gros rondins de bois de différentes longueurs. La distribution caractéristique des bois flottants a été choisie sur la base d'une enquête réalisée par Bezzola et Hegg (2007).

Tous les bois flottants n'ont pas percuté le bâtiment simultanément. Après le premier impact, une partie des bois flottants est restée attachée à la structure, formant un barrage de bois flottants, tandis que la configuration a permis à certains bois flottants de s'écouler autour du bâtiment. Au cours de ce processus, un rouleau turbulent, aéré et recirculant s'est produit sur la façade amont du bâtiment. Au cours de la recirculation, certains bois flottants sont restés constamment attachés au bâtiment, tandis que d'autres ont été incorporés dans le rouleau de recirculation, modifiant ainsi constamment le barrage de bois flottants agissant sur le bâtiment. Les bois flottants ont une plus grande tendance à s'emboîter comparativement aux conteneurs cargos, créant ainsi un effet d'entraînement et un barrage de bois flottants plus solide.

Les conteneurs étaient caractérisés par des forces d'impact élevées, atteignant jusqu'à 8-10 fois la force de référence horizontale maximale (mesurée sans bois flottants, Figure 11a). Après une courte phase de transition caractérisée par une remise en place des conteneurs, la phase d'impact a été suivie par une phase hydrodynamique, avec un comportement similaire à celui de la configuration sans conteneurs. Ce phénomène est attribué à la nature non imbriquée et poreuse des conteneurs, qui limite la formation d'un « barrage » de conteneurs cohérent devant le bâtiment.

Contrairement aux conteneurs, les bois flottants ont montré des forces d'impact limitées (Figure 11b), alors que la force hydrodynamique post-impact était presque deux fois plus élevée que celle induite par la vague sans bois flottants. Cette augmentation de la force hydrodynamique post-impact est attribuée à la formation d'un « barrage » de bois flottants devant le bâtiment.

La Figure 11 montre de manière normalisée la force contre le bâtiment en fonction du temps. Sur la Figure 11a (configuration avec conteneurs), une force d'impact initiale est visible et la force post-pic est proche du cas initial sans bois flottants. Sur la Figure 11b (configuration avec bois flottants), une force d'impact initiale n'est pas visible et la force post-impact est supérieure du cas initial sans bois flottants (proche du double).

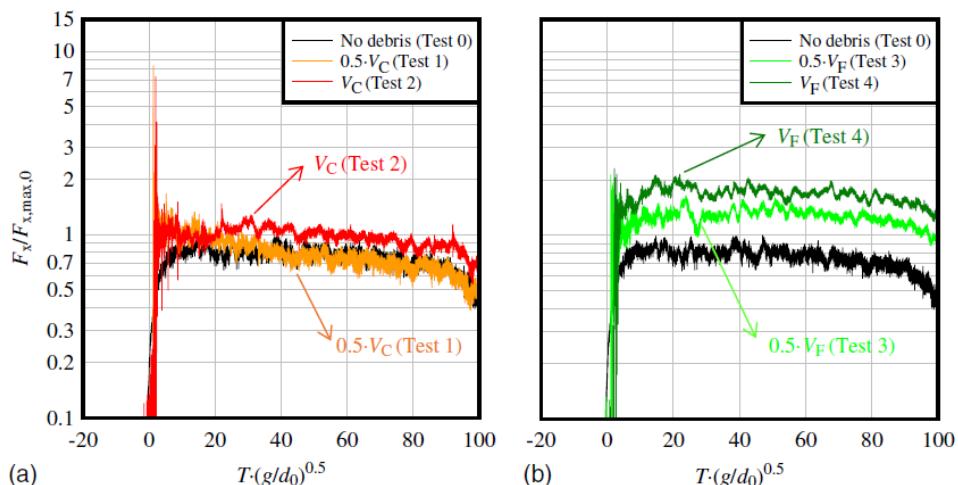


Figure 11. Force mesurée contre le bâtiment en fonction du temps. (a) configuration avec des conteneurs et (b) avec des bois flottants (Wüthrich et al., 2020).

Wüthrich et al. (2020) ont montré que les forces d'impact de pointe instantanées augmentent d'un facteur de 2 pour les bois flottants à un facteur de 8-10 pour les conteneurs, par rapport à la force maximale de l'impact pour des vagues d'eau pure sans bois flottants. L'augmentation de la force mesurée pendant la phase hydrodynamique post-impact était négligeable pour les conteneurs. Cependant, elle est devenue importante pour les bois flottants en raison de leur porosité relativement faible et de leur nature imbriquée. La formation d'un « barrage » de bois flottants

a généré une force hydrodynamique moyenne jusqu'à un facteur de 2, par rapport aux vagues d'eau pure (référence), ce qui correspond à une réduction de la porosité du bâtiment.

Majtan et al. (2021) ont effectué des simulations numériques (dont le fonctionnement est vérifié) pour étudier les forces exercées par un tronc (un seul bois flottant) sur des ponts en arc en maçonnerie à portée unique.

La géométrie du pont a été choisie de manière que la portée et le rapport entre la portée et l'élévation soient représentatifs de nombreuses formes de ponts en arc en maçonnerie au Royaume-Uni. Sur la base de ce constat, le prototype d'arche comprenait une portée de 8 m, un rapport de 0.25 entre la hauteur et la portée et la largeur dans le sens de l'écoulement est de 4 m. Les conditions hydrauliques ont été fixées sur la base de la profondeur d'écoulement et liée au rapport de submersion des composants structurels (la culée, le fût de l'arche et le mur d'allège). Les dimensions d'un bois flottant (représentant un tronc d'arbre d'une densité de 740 kg/m³) ont été désignées par rapport à la longueur de la travée du pont et au rapport diamètre-longueur du bois flottant de 0.059. L'effet de l'impact d'un bois flottant a été examiné avec deux orientations initiales du bois θ ; où $\theta=0^\circ$ représente une collision latérale du bois flottant avec le pont (l'axe du tronc est parallèle à l'arche du pont) et $\theta=90^\circ$ une collision frontale (l'axe du tronc est perpendiculaire).

La Figure 12 montre, à titre d'exemple, l'évolution de la pression en fonction du temps à l'emplacement du pic d'impact du bois flottant pour une orientation des bois flottants de $\theta=0^\circ$ et $\theta=90^\circ$ et le cas des conditions hydrodynamiques seules.

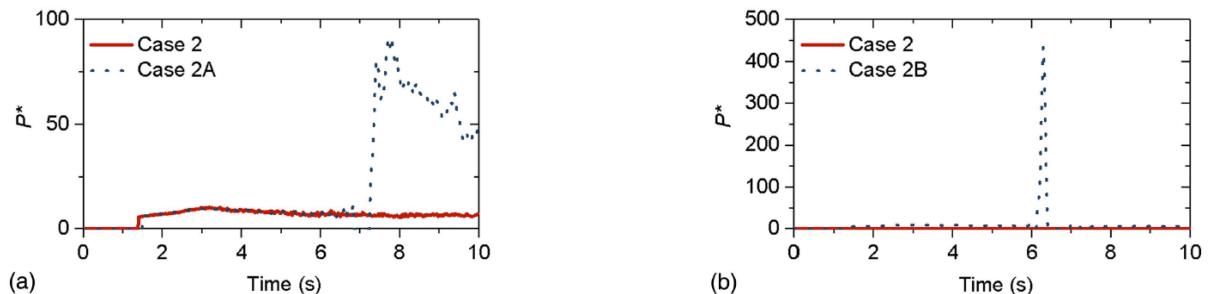


Figure 12. Pressions d'impact en fonction du temps, avec le cas de référence (eau seule en rouge) et la présence du bois flottant (en pointillé) : (a) orientation du bois flottant $\theta=0^\circ$ et (b) $\theta=90^\circ$ (Majtan et al., 2021).

La présence de bois flottants entraîne des pressions supérieures en comparaison des conditions hydrodynamiques (uniquement de l'eau) seules. L'influence de l'orientation du bois flottant est significative et interprétée comme suit : l'orientation de $\theta=90^\circ$ entraîne des pressions d'impact maximales et sur une durée d'impact très courte. L'orientation de $\theta=0^\circ$ produit des pressions d'impact moins élevées et sur une durée plus longue.

Les résultats révèlent que les charges induites par les inondations combinées avec un transport de bois flottants pouvaient être importantes et potentiellement endommager les structures existantes enjambant les cours d'eau. Bien que cette étude ait examiné avec succès l'effet d'un seul bois flottant en dérive, d'autres études doivent être menées sur l'accumulation de bois flottants à l'intérieur de l'écoulement.

1.6 Besoin de recherche et question-clés

L'étude de littérature a montré que les bois flottants sont des éléments présents dans les cours d'eau et peuvent provoquer des obstructions dangereuses. 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. Les aspects suivants résultent de l'étude bibliographique :

- La force maximale qui apparaît lors d'une obstruction avec des bois flottants résulte de la réduction de perméabilité (de section) et pas de l'impact lui-même.

- Lors de l'impact d'une masse solitaire et majeure (conteneur, débris de civilisation), la force maximale est détectée au moment de l'impact, cependant la phase stationnaire après l'impact (obstruction) génère des forces moins importantes.
- L'angle d'impact des bois flottants en rivière contre des ouvrages hydrauliques (par exemple les piles de pont) influence la force maximale, réciproquement le coefficient de trainée C_w .
- La hauteur relative (rapport entre la distance de la base du bois flottant et le fond du lit et la hauteur de d'écoulement) influence le coefficient de trainée C_w . Des petites hauteurs relatives ont tendance à présenter les plus grands coefficients de trainée C_w .
- L'enveloppe de la force d'impact maximale de bois flottants peut être exprimée avec une équation linéaire simplifiée sur la base de la vitesse d'approche et de la masse des bois flottants.
- Une enveloppe conservatrice de coefficients de trainée C_w dans le cadre d'un blocage de bois flottants contre des piliers de pont peut être exprimée en fonction d'un ratio de surface obstruée S . Le nombre de Froude a une influence sur le coefficient de trainée C_w pour des ratios $S \leq 0.36$.

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, et des cas en rivière. Des approches généralisées pour dimensionner un râtelier complet ou partiel sous un impact extrême sur un évacuateur de crue semblent absent !

Les questions de recherche s'orientent dans la direction extrême, c'est-à-dire les cas avec des quantités et dimensions de bois flottants les plus importantes, de grands débits et des passes étroites. Ce sont dans ces conditions que la sécurité des ouvrages peut être mise en péril, comme le montre l'étude du barrage de Palagnedra. Beaucoup de paramètres sont inconnus pour l'ingénieur lors du dimensionnement d'un râtelier sur un évacuateur de crue. Cette étude se concentre sur le fait d'exprimer un coefficient de trainée C_w avec des paramètres connus dans le cadre d'une entrée d'un évacuateur de crue (profil standard avec piliers) situé dans des conditions de réservoir. Les questions de recherche suivantes en découlent :

- Quelle est la force des bois flottants produite sur un râtelier (en amont de l'entrée d'un évacuateur de crue) obstrué ?
- Plus précisément : Comment 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 contribuent-ils à la force ?
- Quels paramètres sont déterminants et comment faut-il les normaliser afin de les prendre en compte ?
- Une différence entre un râtelier « complet » et « partiel » est-elle observée ?
- Peut-on comparer le cas d'apparition extrême des bois flottants avec des apparitions de plus faibles quantités ?
- Quelle est la variation des résultats des forces, une valeur qui est par expérience élevée pour des phénomènes liés aux bois flottants ?
- Est-il possible de mettre les résultats obtenus en lien avec les observations documentées dans la littérature pour des situations relativement similaires ?

2 Méthode

2.1 Modèle réduit

2.1.1 Choix de la méthode

L'étude de littérature (chapitre 1.1) montre que la plupart des auteurs a utilisé la modélisation physique pour appréhender le comportement des bois flottants. La modélisation numérique est complexe avec l'ensemble des incertitudes et interactions des bois flottants et des cas de calibrations sont rares. Les observations in situ de phénomènes extrêmes sont liées à des ouvrages précis. Il est donc difficile d'en tirer des généralités.

Le choix pour l'étude s'est donc porté sur un modèle physique. Ce type de modélisation a prouvé son bon fonctionnement dans le cadre de la présente question de recherche. Les incertitudes, l'échelle et la diversité des paramètres représentent pour une modélisation correcte des processus un grand défi.

2.1.2 Canal d'essai

Les essais ont été réalisés dans un canal droit horizontal situé à la Plateforme des Constructions Hydrauliques (PL-LCH) de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL). Le canal a déjà été utilisé par les études suivantes : Furlan (2019) et Pfister et al. (2019, 2021).

Le canal mesure 10 m de longueur, 1.50 m de largeur et 0.70 m de hauteur. A l'aval du canal, un déversoir standard est positionné transversalement avec une charge de dimensionnement de $H_D=0.15$ m. In situ, les déversoirs standards sont largement utilisés, ce qui justifie son application dans cette étude. La crête du déversoir se situe à un niveau de $W=0.42$ m, par rapport au fond du canal (Figure 13).

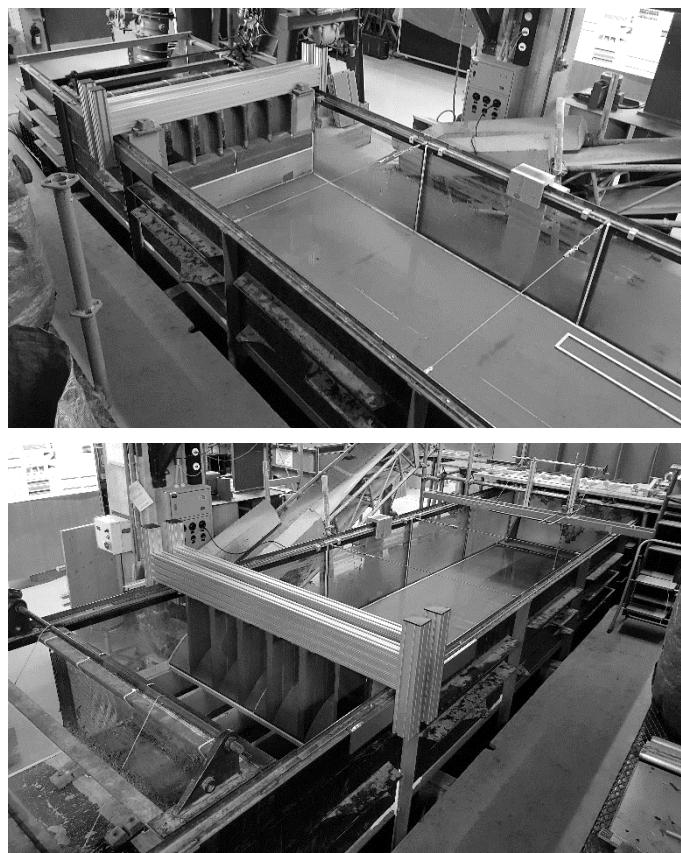


Figure 13. Vues depuis (a) l'amont et (b) l'aval du canal avec le déversoir à l'extrémité en aval, montrant l'une des configurations testées.

Sur la crête du déversoir, des piliers à tête ronde sont disposés. Ils ont une épaisseur de 0.04 m et sont amovibles dans le sens de la largeur du canal afin de créer les largeurs de passes b (des vannes) souhaitées. Les têtes des piliers sont à fleur du front vertical du déversoir- Le déversoir et les piliers ont été fabriqués en PVC et ont donc été considérés comme lisses.

Une vue aval et une vue amont du modèle réduit utilisé sont représentées à la Figure 13 avec une configuration typique étudiée, mais encore sans râtelier. Un schéma est disponible à la Figure 14 avec l'ensemble de la nomenclature appliquée.

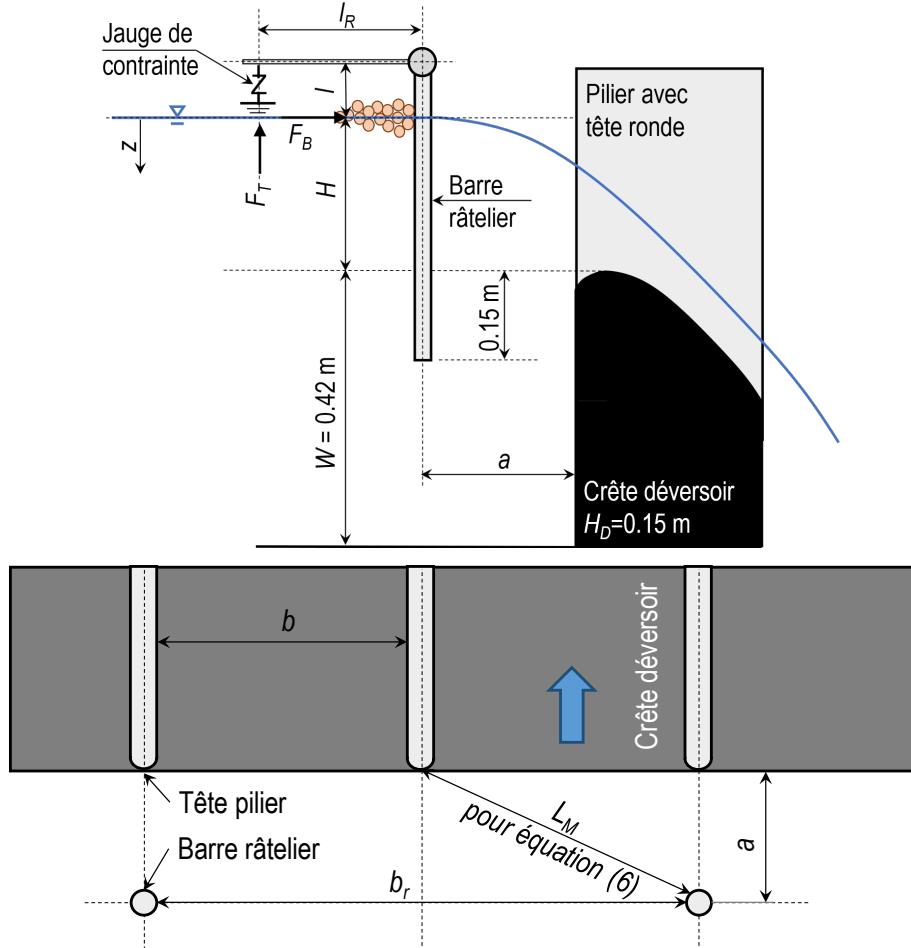


Figure 14. Schéma du déversoir et nomenclature, (a) coupe, et (b) vue en plan, $W=0.42$ m et $H_D=0.15$ m, montré pour un râtelier partiel (une barre devant chaque deuxième pilier).

Les éventuels bois flottants qui franchissent le râtelier et le déversoir sont retenus par une grille métallique à l'aval du canal avant l'entrée dans le réservoir principal du laboratoire.

Afin d'assurer un écoulement homogène le long du canal, un « tranquilizer » a été conçu à l'amont du déversoir (environ 6 m à l'amont). Son but est d'atténuer l'effet lié à la configuration d'entrée du canal et d'assurer un champ de vitesses uniforme. Une grille métallique et des couches de géotextile le constituent. Pour éviter les vagues à la surface, une feuille flottante de mousse de polystyrène a été placée. L'efficacité de cette installation a été démontrée par Furlan (2019).

2.1.3 Instrumentation de mesure

Les instruments des mesures ci-dessous ont été utilisés dans cette étude :

- Un limnimètre gradué au millimètre (précision de mesure ± 1 mm) situé à 4 m en amont du déversoir, sert à mesurer le niveau d'eau dans le canal (obtention de la charge H définie à la crête du déversoir), visible sur la Figure 13b.

- Un débitmètre magnétique inductif (précision de mesure $\pm 0.5\%$ FS) 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. L'ensemble de ce système est décrit en détail au chapitre 2.1.5.

2.1.4 Bois flottants

Un grand volume hétérogène de bois flottants a été constitué pour l'étude. Toujours en lien avec les précédentes études (Pfister et al., 2019, 2021), la composition du volume accentue les bois flottants plutôt longs dans le cadre des phénomènes extrêmes. Les précédentes études sur la surélévation du niveau d'eau (Pfister et al., 2019) à la suite de l'obstruction par des bois flottants d'un évacuateur de crue ont démontré que le volume de bois utilisé est caractéristique des phénomènes extrêmes.

La description des bois flottants utilisés se base sur l'étude de référence suivante selon Rickli et Hess (2009). Les auteurs ont caractérisé dans le lit des cours d'eau sur 10 secteurs distincts de 1'000 m la classe de longueurs en fonction du nombre de troncs (Figure 15).

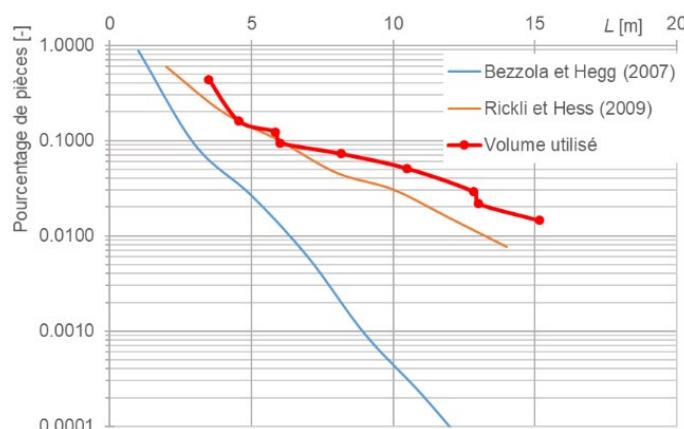


Figure 15. Comparaison entre la caractéristique des bois flottants utilisés dans cette étude et des relevés in situ (Pfister et al., 2019).

Pour une utilisation pratique, les bois flottants sont divisés en neuf classes de longueurs (classes A à I, Figure 16, Tableau 1). Si par exemple une échelle géométrique est définie à 1:35, la longueur des éléments est comprise entre $L=0.100$ m et $L_M=0.433$ m, traduit in situ entre 3.5 m et 15.2 m. In situ, le volume constitué représente 1'640 m³ de bois massif. Un facteur entre longueur des troncs et leur diamètre de $L/D \approx 20$ est appliqué. Un nombre total de troncs de 2'760 en résulte et 80 souches sont ajoutées.

Dans la suite de cette étude, il est souvent mentionné un rapport entre la largeur des passes testée b (Figure 14) et la longueur des troncs les plus longs ($L_M=0.433$), le rapport b/L_M .



Figure 16. Illustration des troncs par classes (Pfister et al. 2021, Tableau 1).

Tableau 1. Caractéristique des bois flottants utilisés dans cette étude, nombre de troncs par classe et volume dans les dimensions du modèle (Figure 16, Pfister et al., 2021).

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

2.1.5 Système de mesure de force sur râtelier

En amont du déversoir, un système a été mis en place pour mesurer les forces des bois flottants contre ladite structure. Le système peut être assimilable à un râtelier en amont du déversoir.

Le système est constitué comme suit (Figure 17) :

- Des barres de râtelier en PVC d'un diamètre de 0.04 m sont rigidement connectées à un axe en travers et libre de rotation. Les barres sont amovibles dans le sens de la largeur du canal et peuvent être supprimées afin de créer la configuration souhaitée du râtelier. L'extrémité des barres (pour la partie immergée) s'arrête 0.15 m en-dessous de la crête du déversoir (Figure 14a).

- L'axe de rotation prend appui sur les rails métalliques des parois extérieures du canal d'essai. L'axe de rotation peut être déplacé à la distance souhaitée en amont du déversoir. L'axe de rotation est connecté à un bras de levier (côté droit du modèle).
- Le bras de levier (Figure 18) est relié à une jauge de contrainte (HT Sensor, TAS501M+SiC-A2) positionnée à 0.40 m de l'axe de rotation. Cette jauge de contrainte reprend conséquemment les forces (plus précisément les moments) appuyés contre le râtelier.
- La jauge de contrainte est fixée sur le rail de la paroi extérieure du canal. La jauge de contrainte a une capacité maximale de 5 kg et une précision de $\pm 0.1\% \text{ FS}$ (5 grammes). Les masses mesurées sont directement reliées à un ordinateur et collectées à la fréquence choisie (ici, 0.2 Hz avec ~ 250 ou ~ 500 points de mesure selon la durée, chapitre 2.3.4).

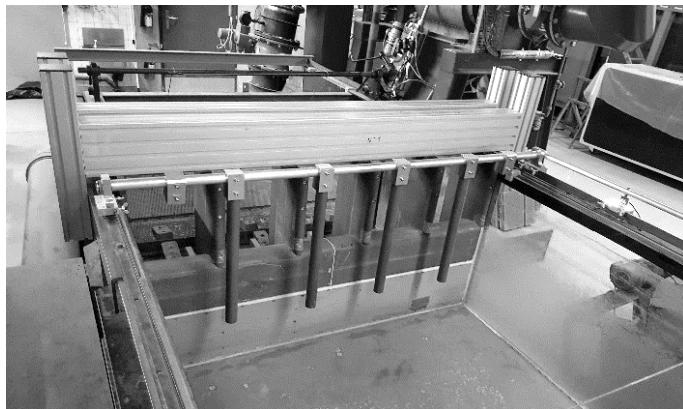


Figure 17. Système de mesure de force en amont du déversoir pour une configuration typique.

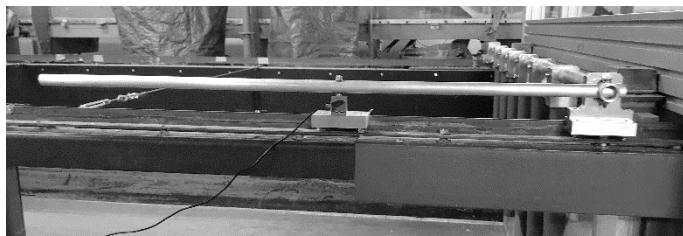


Figure 18. Bras de levier (ici $l_R=0.40 \text{ m}$) entre l'axe de rotation (à droite) et la jauge de contrainte.

Les masses mesurées par le système précédemment décrit sont ensuite traduites en force par la multiplication de l'accélération gravitationnelle $g=9.81$, puis adaptées via les différents bras de leviers. Tous les calculs sont précisément expliqués au chapitre 4.2.

2.1.6 Râtelier testé

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 (chapitre 2.3.1, Figure 24).

L'avancement du râtelier en amont de la face verticale du déversoir a est choisi en fonction de la largeur des passes b et partiellement aussi de la longueur du tronc le plus grand L_M , visible à la Figure 14b (Tableau 2). La définition des distances a étudiées est semblable à Pfister et al. (2021).

Pour la position 1 (appelée « **distant** »), le râtelier est positionné dans le but d'avoir la dimension maximale des troncs $L_M=0.433 \text{ m}$ disponible « ouverte » pour le passage des troncs entre la barre du râtelier et le pilier du déversoir (Figure 14b) comme exprimé à l'équation (6),

$$\text{Position 1} \quad a_1 = \sqrt{L_M^2 - b^2} \quad (6)$$

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

$$\text{Position 2} \quad a_2 = \frac{1}{2} \left[\frac{b}{2} + \sqrt{L_M^2 - b^2} \right] \quad (7)$$

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

$$\text{Position 3} \quad a_3 = \frac{b}{2} \quad (8)$$

Le Tableau 2 montre l'avancement du râtelier en amont de la face verticale du déversoir a en fonction de la largeur des passes b et de la position choisie.

Tableau 2. Avancement a du râtelier en amont de la face verticale du déversoir similaire à Pfister et al. (2021).

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

2.2 Validation

2.2.1 Courbe de tarage du déversoir

Bien que l'étude s'intéresse à la problématique des bois flottants et particulièrement de leurs forces aux ouvrages exposés, il faut s'assurer du fonctionnement correct du modèle réduit.

Les charges H et les débits Q sont directement mesurés sur le modèle, fonctionnant uniquement avec un débit d'eau sans bois flottants. Les coefficients du déversoir C_d sont obtenus en appliquant l'équation de Poleni

$$Q = C_d n b \sqrt{2gH^3} \quad (9)$$

avec C_d comme coefficient du déversoir, n le nombre de passes ouvertes, b est la largeur individuelle d'une passe ouverte (Pfister et al., 2021, à noter que la zone inactive suite la séparation du courant aux piliers est soustraite), et g l'accélération de la gravité.

Les coefficients de déversoirs déduits directement des mesures selon l'équation (9) sont mis en relation avec ceux dérivés par la littérature, en particulier selon l'équation de Vischer et Hager (1999) :

$$C_d = \frac{2}{3\sqrt{3}} \left(1 + \frac{4\chi}{9 + 5\chi} \right) \quad (10)$$

Les coefficients de déversoir C_d calculés selon Vischer et Hager (1999) sont exprimés en fonction de la charge relative χ :

$$\chi = \frac{H}{H_D} \quad (11)$$

avec H la charge exprimée pour le débit installé et H_D la charge de dimensionnement du profil du déversoir standard (dans cette étude, $H_D=0.15$ m).

La Figure 19 compare les coefficients de déversoir C_d « mesurées » (exprimés par l'équation (9) et « calculés » via l'équation (10) en fonction de la charge relative χ (équation 11). Les résultats sont mentionnés selon les différentes largeurs de passes b testées, ou plus précisément, selon le rapport b/L_M entre la largeur des passes b et la longueur des troncs les plus longs L_M . Les symboles ronds représentent la configuration $b/L_M=0.60$, les symboles carrés $b/L_M=0.77$ et les symboles triangles $b/L_M=0.40$. Les symboles noirs sont pour le râtelier proche, les symboles gris pour le râtelier intermédiaire et les symboles blancs pour le râtelier distant. Les points représentés sont issus de la campagne actuelle d'expériences (chapitre 2.3.4, palier avec eau seule n° 2, 7 et 8 de la procédure sur la Figure 25).

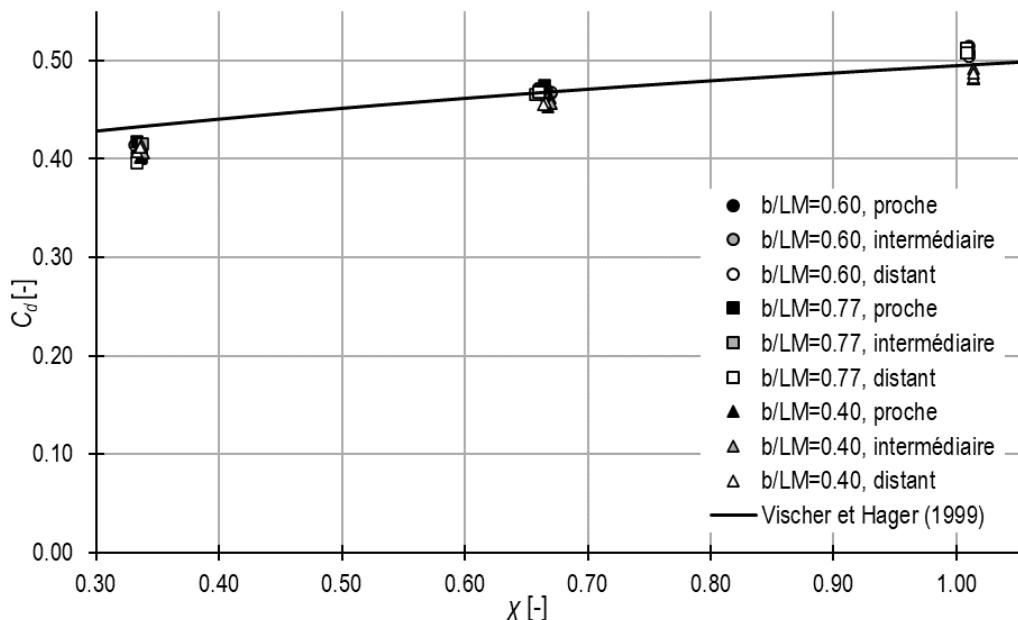


Figure 19. Comparaison de coefficients du déversoir C_d « calculés » (Vischer et Hager 1999, équation 10) et « mesurés » (Equation 9) en fonction de la charge relative χ , pour l'ensemble des configurations étudiées.

La courbe de tarage du déversoir est similaire à la prévision de la littérature (étant la charge et le débit dans le modèle), les valeurs « mesurées » sont proches des valeurs « calculées » pour l'ensemble des configurations étudiées (chapitre 2.3.1). Les systèmes de mesure du débit et de la charge (limnimètre) sont correctement calibrés.

2.2.2 Jauge de contrainte

Le fonctionnement adéquat du système de mesure de force (chapitre 2.1.5), en particulier de la jauge de contrainte est à valider. Des masses calibrées de 0.01, 0.02, 0.05 et 1.00 kg sont chacune mises en place et la mesure est enregistrée par la jauge de contrainte, après un laps de temps de stabilisation. Le Tableau 3 donne les valeurs mesurées par la jauge de contrainte (calibration effectuée avant et après les essais). La Figure 20 compare les valeurs calibrées (masse définie mise en place) aux valeurs mesurées (par la jauge de contrainte) avec les symboles carrés pour les valeurs avant les essais et les symboles ronds pour après les essais.

Tableau 3. Valeurs mesurées avant et après les essais.

Valeurs calibrées [kg]	Valeurs mesurées avant essais [kg]	Valeurs mesurées après essais [kg]
0.01	0.0113	0.0114
0.02	0.0231	0.0217

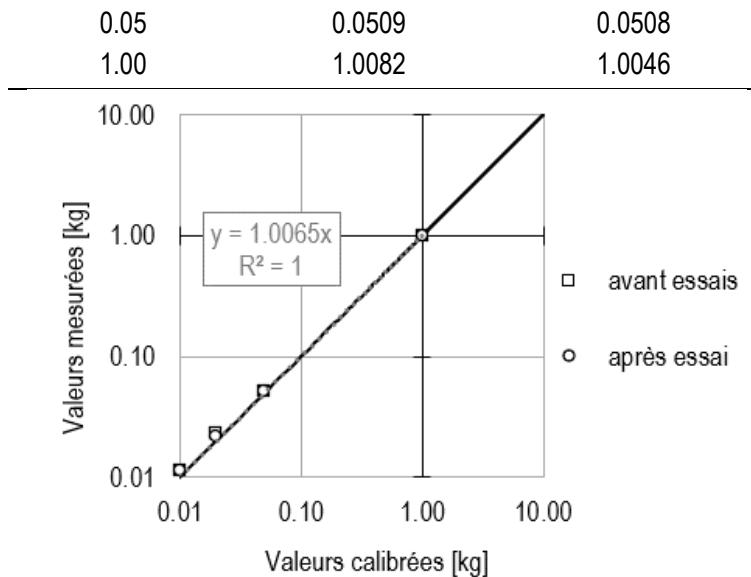


Figure 20. Vérification de la jauge de contrainte, valeurs mesurées (par la jauge de contrainte) versus valeurs calibrées (les masses de calibration mises en place) pour 0.01 kg, 0.02 kg, 0.05 kg et 1.00 kg.

Comme le montre la Figure 20, le fonctionnement de la jauge de contrainte est précis. Les points mesurés sont très proches des points calibrés pour une fonction linéaire. La vérification s'est faite avant et après l'ensemble du programme d'essais.

2.2.3 Effet de modèle

Les chapitres sur la validation du modèle réduit (2.2.1 et 2.2.2) ont montré la fiabilité des résultats obtenus. Cependant, quelques effets de modèle demeurent et doivent être mentionnés :

- **Bois flottants** : Les caractéristiques des bois flottants utilisés sont disponibles au chapitre 2.1.4. Les troncs de petites dimensions ainsi que les branches et les feuilles sont absents du modèle réduit. Par conséquent, leur influence n'est pas prise en considération.
Les volumes de bois flottants utilisés sont composés de bois naturel afin de reproduire la surface et la forme des troncs. La rugosité n'est toutefois pas identique car les troncs ne sont pas détériorés comme lors des processus de transport *in situ*. Dans le modèle réduit, le mouvement des troncs est représenté correctement, au contraire de la rigidité qui est surestimée.
- **Parois latérales** : Les troncs de grande longueur ont tendance à s'orienter et s'appuyer contre les parois du canal d'une largeur de $B=1.50$ m. La Figure 21 montre cet effet. Pour le réduire, l'opérateur effectue avec minutie un brassage du volume de bois flottant lors de la mise en place.
Selon la configuration étudiée, des plaques (Figure 22) sont mises en place pour réduire la section d'écoulement. Les influences des modifications des conditions latérales ne sont pas étudiées.
- **Déversoir** : Selon Vischer et Hager (1999), la hauteur de la crête du déversoir par rapport au fond du canal ($W=0.42$ m) doit être supérieure au double de la charge de dimensionnement ($H_D=0.15$ m). Ce critère (qui est toujours respecté dans cette étude) élimine l'effet de la vitesse d'approche sur la courbe de tarage, et l'équation 9 est valide.

Lors des essais, un grand soin a été porté sur les effets de modèle par l'opérateur pour qu'ils ne soient pas déterminants dans les résultats, bien qu'ils restent partiellement inévitables.



Figure 21. Illustration d'effets de modèle. Les troncs s'appuient sur la paroi de gauche formant un « effet d'arc » et s'orientent dans le sens des parois.

2.2.4 Effet d'échelle

Les écarts entre les valeurs mesurées sur un modèle réduit à une certaine échelle et un prototype sont appelés les effets d'échelle. Selon Pfister et Ribi (2020), les effets d'échelle sont présents dans toutes les modélisations physiques, car toutes les forces dominantes (ainsi que leurs rapports) ne peuvent pas être mis simultanément à l'échelle. Avec une modélisation physique adéquate, les effets d'échelle peuvent être minimisés ou négligés.

La similitude de Froude est appliquée dans cette étude avec une surface d'eau libre étant dominante. Le nombre de Froude est donc semblable tant bien à l'échelle que dans la réalité. Cependant, le nombre de Reynolds n'est plus identique entre le modèle réduit et le prototype.

Les modèles physiques qui utilisent la similitude de Froude surestiment les effets de la viscosité et de la tension superficielle. Avec une charge au déversoir supérieure de 0.015 m à 0.020 m, Pfister et al. (2013) affirment que l'effet de la tension superficielle et de la viscosité est négligeable. Dans cette étude, les phénomènes extrêmes en termes de débit et de bois flottants sont approfondis. La profondeur d'écoulement au déversoir est toujours supérieure aux minima déclarés par Pfister et al. (2013) pour l'ensemble des configurations étudiées (chapitre 2.3.1). La courbe de tarage du déversoir est correctement reproduite par le modèle réduit, un fait qui est confirmé par le chapitre 2.2.1.

2.3 Descriptif des essais

2.3.1 Paramètre étudié

Cette étude a fait l'objet d'une variation systématique des paramètres clés qui influencent la force des bois flottants imposée sur le râtelier, définis par la littérature scientifique présentée au chapitre 1.1. L'ensemble des paramètres ont été variés indépendamment des autres afin de définir leurs influences respectives sur les résultats obtenus.

- Trois charges sur le déversoir ont été définies, réciproquement trois débits, de la manière suivante : $H_1=0.05$ m étant $\chi=0.33$ (équation 11), $H_2=0.10$ m étant $\chi=0.67$ et $H_3=H_b=0.15$ m étant $\chi=1$.
- Trois largeurs de passe sont étudiées : $b=0.175$ m, 0.260 m, et 0.335 m, toutes visibles à la Figure 22. Les rapports b/L_M qui en découlent sont ($L_M=0.433$ m selon le Tableau 1) : $b/L_M=0.40$, $b/L_M=0.60$, et $b/L_M=0.77$. Toutes les largeurs étudiées sont volontairement inférieures au critère de Godtland et Tesaker (1994).
- Trois positions a de râteliers décrits au chapitre 2.1.6 sont testées : étant proche, intermédiaire et distant. Elles varient en fonction de la largeur b des passes et partiellement de la longueur des troncs les plus longs L_M , Tableau 3). Un exemple de trois positions a est illustré à la Figure 23 pour une largeur de passe b choisie.

- Deux types de râteliers sont mis en place : Un râtelier appelé « complet », c'est-à-dire tous les piliers du déversoir sont protégés en amont par une barre de râtelier (Pfister et al., 2019) et un râtelier appelé « partiel », composé seulement d'une barre présente un pilier sur deux (Pfister et al., 2021). La Figure 24 distingue le râtelier complet et le râtelier partiel.
- Il reste à noter qu'une seule apparition de bois est testée, définie comme « extrême » est détaillée dans le chapitre 2.1.4.

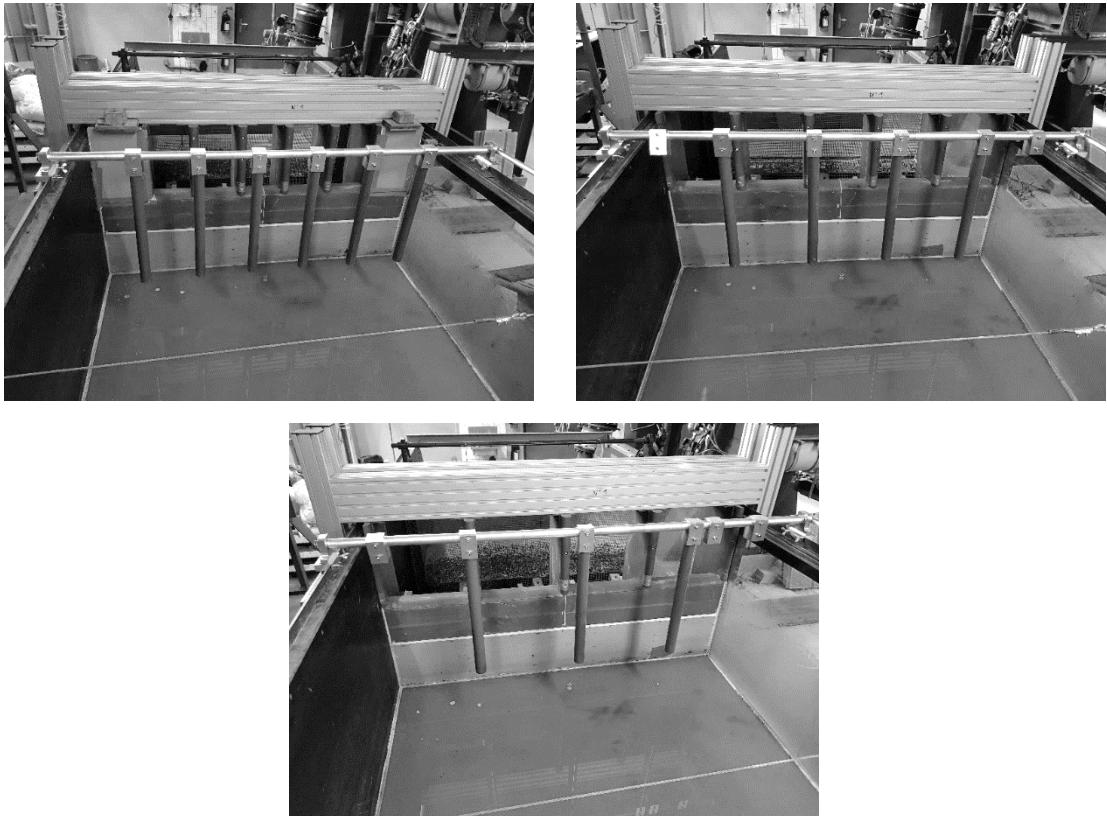


Figure 22. Illustration des trois différentes configurations de largeurs de passes, avec un râtelier complet mis en place en amont : (a) $b/L_M=0.40$, (b) $b/L_M=0.60$ et (c) $b/L_M=0.77$.

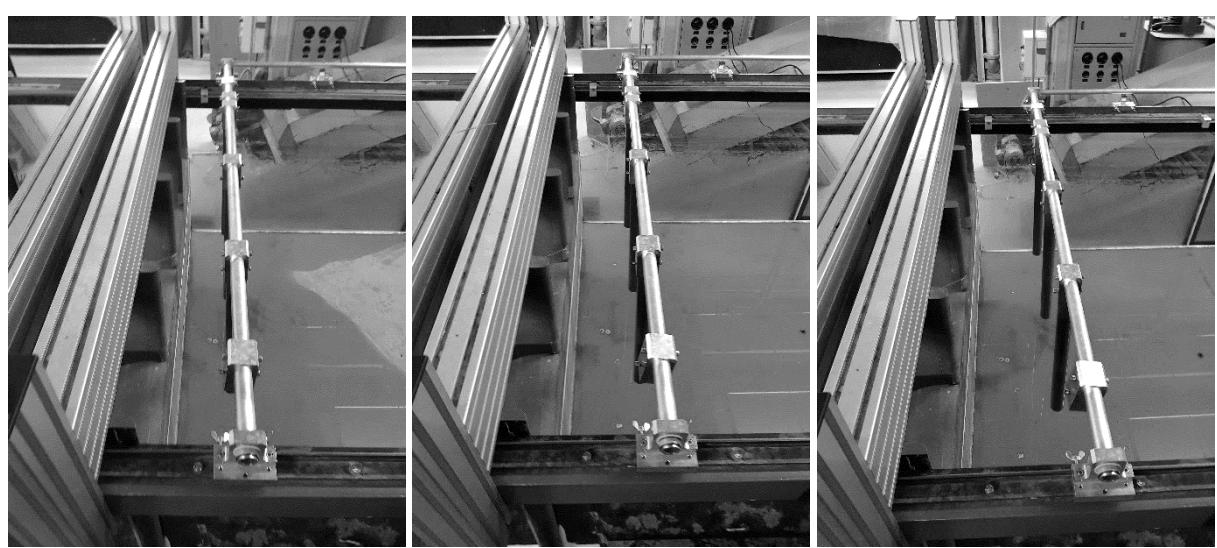


Figure 23. Illustration des trois différentes positions de râtelier, avec ici $b/L_M=0.77$: (a) proche, (b) intermédiaire et (c) distant.

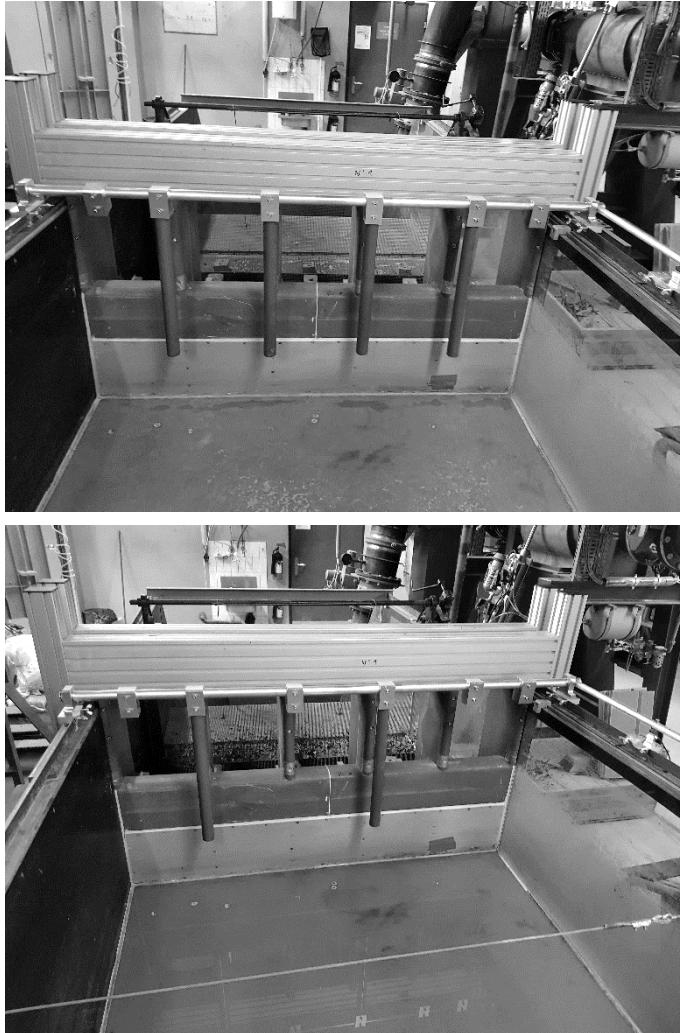


Figure 24. Illustration du râtelier (a) complet et (b) partiel, avec ici $b/L_M=0.60$ et un râtelier proche.

2.3.2 Nombre de répétitions

Selon Furlan (2019), la taille du lot testé (nombre de troncs) détermine le nombre de répétitions nécessaires afin de trouver des résultats statistiquement « fiables ». Pour la probabilité de blocage, le nombre de répétitions nécessaires diminue avec l'augmentation de la taille du lot pour obtenir une pertinence statistique. Furlan (2019) propose 10 répétitions pour un lot de 32 pièces afin de satisfaire un intervalle de confiance de 10%.

Pfister et al. (2019) ont répété trois fois les expériences avec des volumes extrêmes (identique que cette étude) lors de tests préliminaires. Ils ont observé une erreur absolue de 4% sur le coefficient du déversoir C_d . Pour l'ensemble du programme de tests, ils n'ont plus fait de répétitions.

Wüthrich et al. (2020) ont effectué un test de répétabilité sur l'impact des bois flottants et de conteneurs contre les bâtiments. Ils ont observé une variation sur le pic d'impact, mais la phase hydrodynamique post-pic a indiqué des valeurs similaires entre les tests de répétition.

Pfister et al. (2021) ont répété deux fois les expériences pour la probabilité de blocage et l'efficacité d'un râtelier partiel avec des volumes extrêmes (paramètres semblables à cette étude).

Pour cette étude qui se concentre sur la force des bois flottants contre un râtelier sur une durée longue et stabilisée, il a été décidé de répéter deux fois chaque essai. Une composante aléatoire reste toujours présente lorsqu'il s'agit d'essais avec des bois flottants, mais peut être considéré faible à la vue du dispositif et de la quantité de mesures.

2.3.3 Programme d'essais

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

- Râtelier complet (paramètres et résultats à l'annexe 1)
 - $b/L_M=0.60$
 - 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 (paramètres et résultats à l'annexe 2)
 - $b/L_M=0.60$
 - 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 $3/3$

Au total, 54 combinaisons de paramètres ont été étudiées, résultant avec les répétitions en 108 tests effectués.

2.3.4 Procédure

La procédure d'essai est la suivante :

0. Le modèle physique est vérifié avant chaque mise en marche ; conformité de la pompe et du circuit d'alimentation, fermeture des vannes de vidange, étanchéité et résistance du canal, configuration des largeurs de passes, positionnement et type de râtelier, libre mouvement du système de balancier.
1. Le système d'acquisition des mesures de forces (jauge de contrainte et ordinateur) est branché. Afin de stabiliser la mesure (le système de mesure de force a une tendance de réduction des valeurs mesurées durant les premières minutes lors de sa mise en service), la durée d'attente a été fixée à environ 4'000 secondes. L'opérateur doit impérativement vérifier que la mesure est stabilisée avant de démarrer les essais. Il est important d'obtenir la force initiale du système de mesures, sans eau et bois.
2. Le canal est mis en eau, le débit est fixé au premier palier théorique correspondant à $H_1=0.05$ m. Le débit est laissé pendant 20 minutes d'enregistrement de mesure. Puis, le débit est arrêté. La force hydrodynamique (eau seule) est donc connue pour le premier palier de débit.
3. Le volume de bois flottants est ajouté dans le réservoir. Les troncs sont mélangés et brassés pour qu'ils forment un tapis homogène à la surface de l'eau.
4. Le débit est ensuite augmenté de manière prudente jusqu'au premier palier théorique correspondant à $H_1=0.05$ m. Les quelques bois flottants qui franchissent le déversoir sont ajoutés à l'amont dans le réservoir. Ainsi, le volume bloqué correspond toujours au volume de bois flottants ajouté. Le débit est laissé pendant 20 minutes. Les photographies (vue en plan, vue amont, vue aval et vue latérale) sont prises de manière systématique. Le premier essai est terminé (pour la force des bois flottants, 1^{er} test).

5. Le débit est augmenté progressivement jusqu'au deuxième palier qui correspond à H_2 . Comme précédemment, les rares bois flottants qui passent le déversoir sont ajoutés dans le réservoir, à l'arrière. Le débit est laissé pendant 20 minutes. Les photographies (vue en plan, vue amont, vue aval et vue latérale) sont prises de manière systématique. Le deuxième essai est terminé (pour la force des bois flottants, 2^{ème} test).
6. Le débit est augmenté de manière progressive jusqu'à la valeur théoriquement correspondant à $H_D=H_3$. Comme précédemment, les bois flottants qui passent le déversoir sont ajoutés dans le réservoir. Le débit est laissé pendant 40 minutes, car il a été observé que le palier a un temps de stabilisation plus important. Les photographies (vue en plan, vue amont, vue aval et vue latérale) sont prises de manière systématique. Le troisième essai est terminé (pour la force des bois flottants, 3^{ème} test).
7. Le volume de bois flottants est entièrement retiré du canal. Le débit est laissé pendant 20 minutes. La force hydrodynamique (eau seule) est donc connue pour le troisième palier de débit.
8. Le débit est réduit jusqu'à la valeur du deuxième palier qui correspond à H_2 . Le débit est laissé pendant 20 minutes. La force hydrodynamique (eau seule) est donc connue pour le deuxième palier de débit.
9. Les tests et les calibrations sont terminés et le débit est arrêté. Le canal est vidangé. La mesure des forces est maintenue jusqu'à ce que la balance ne soit plus en contact avec de l'eau afin d'obtenir la masse (ou force) du système de mesures, sans eau et bois.

La Figure 25 montre un exemple de la masse mesurée par la jauge de contrainte (valeurs brutes, sous transformations mathématiques) pour l'ensemble de la procédure et le débit.

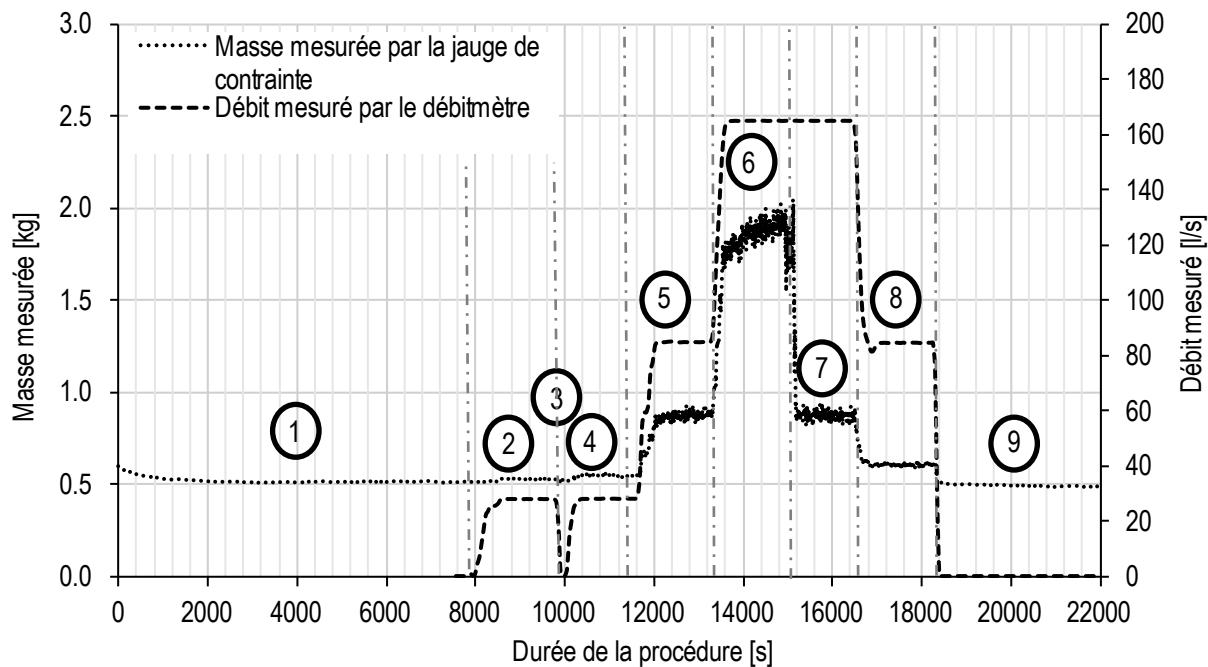


Figure 25. Valeurs mesurées (masse et débit) pour les essais 1, 3 et 5, correspondant aux explications de chaque étape de la procédure.

3 Force de l'eau

Si seulement un débit d'eau est présent au râtelier, une force hydrodynamique de trainée est imposée contre ce dernier. Celle-ci peut être mesurée et comparée avec la prévision selon la littérature (qui sert comme référence). Pour cela, il faut connaître les vitesses de l'écoulement dans la section des barres (du râtelier). Ainsi, ce chapitre donne d'abord les forces issues du système de mesures, discute ensuite des profils des vitesses et finalement dérive les forces de trainée (de référence) selon la littérature.

3.1 Mesure moment

Le modèle réduit fonctionne avec un débit Q connu (réciproquement une charge H), sans bois flottants (eau seule, n° 2, 7 et 8 dans la Figure 25), afin de mesurer une force F_E que l'eau seule impose sur le râtelier. La force propre initiale du balancier F_P (valeur sans eau) est soustraite de la force totale moyenne mesurée par la jauge de contrainte F_T pour obtenir la force de référence de l'eau seule F_E pour le palier de débit considéré.

Le moment mesuré M_R est obtenu selon l'équation 12 :

$$M_R = F_E l_R \quad (12)$$

avec F_E comme force de l'eau (sans bois flottants) mesurée sur le modèle et l_R le bras de levier du système de mesure de force (ici fixé à $l_R=0.40$ m, Figure 14).

Le système de mesure donne une seule force pour l'ensemble du râtelier. Pour obtenir le moment mesuré (eau seule) par barre de râtelier, le moment mesuré M_R est divisé par le nombre de barres de râtelier n_B installés.

3.2 Vitesse d'approche

Pour obtenir des vitesses d'approche exploitables, une modélisation numérique (Dorthe 2021) a été réalisée afin de remporter les composantes horizontales de la vitesse U_X au droit des barres de râtelier. Néanmoins, pour des raisons de validation, des mesures de la vitesse ont été effectuées sur le modèle, mais la charge relativement faible pour le plus petit débit ($H=0.05$ m) réduit la signification des mesures. Le modèle numérique est établi avec les caractéristiques suivantes :

- Logiciel : Flow 3D.
- Simulation sectionnelle 2D avec la géométrie du modèle réduit. La largeur est réduite par la définition d'un maillage constitué d'une seule cellule transversalement.
- Maillage composé d'environ 100'000 cellules, uniformes, cubiques, d'une largeur d'arête de 2.5 mm.
- Simulations réalisées pour les 3 débits et les 3 positions de râtelier sans l'influence des largeurs de passes et des piliers.
- Conditions de bord :
 - Latérales : Condition de symétrie. Vitesse nulle et gradient nul dans la direction normale à la surface latérale.
 - Entrée : Condition de pression. Définie par une hauteur d'eau avec vitesse nulle et pression hydrostatique sur la face amont du modèle.
 - Sortie : Condition de pression avec « fluid fraction=0 ». Condition numérique faisant « disparaître » l'eau arrivant la sortie.

La Figure 26 montre pour $H=0.15$ m les composantes horizontales des vitesses du modèle numérique.

Pour valider les composantes horizontales des vitesses U_X du modèle numérique, des profils de vitesse ont été mesurés dans le modèle réduit (fonctionnement avec de l'eau seule pour une charge H définie) pour quelques configurations. Un flow tracker 2D a été utilisé pour les mesures. La Figure 27 compare les vitesses du modèle numérique (trait continu) avec les vitesses mesurées sur le modèle (symboles triangles).

La comparaison entre le modèle numérique et les mesures sur le modèle réduit indiquent une cohérence des valeurs, en particulier les valeurs moyennes par profil sont bien représentées. À savoir que la mesure des vitesses proches de déversoir sur le modèle réduit est complexe, car il s'agit d'une zone avec de nombreuses perturbations. Les vitesses d'approche obtenues par la modélisation numérique sont utilisées pour le calcul de la force de trainée.

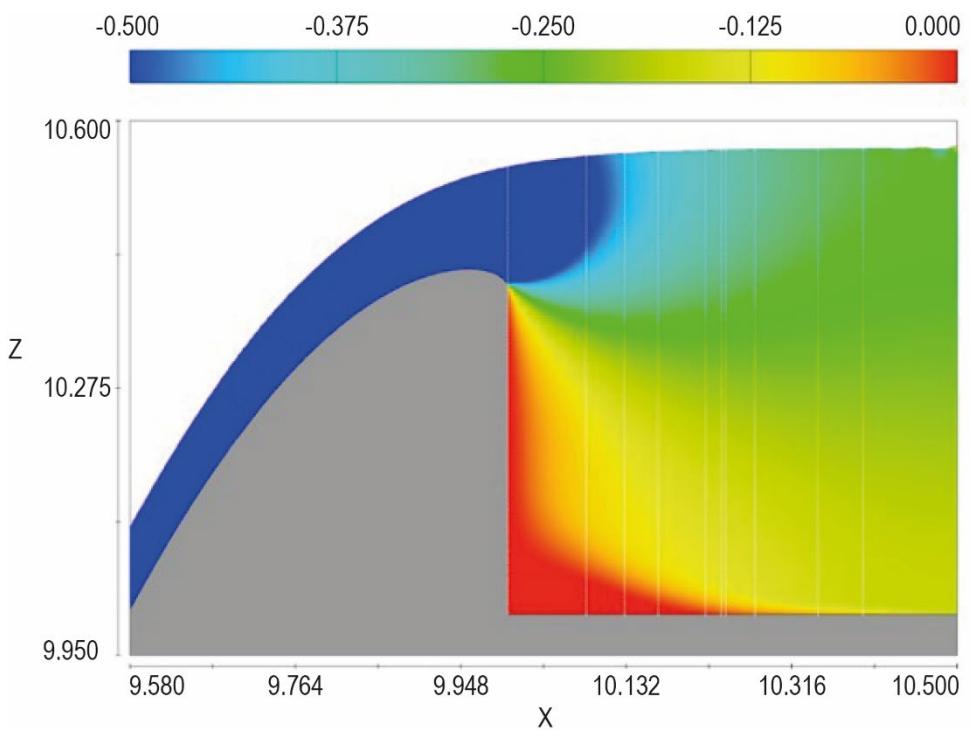


Figure 26. Composantes horizontales des vitesses U_x , obtenues par la modélisation numérique (Dorthe 2021, pour $H=0.15$ m).

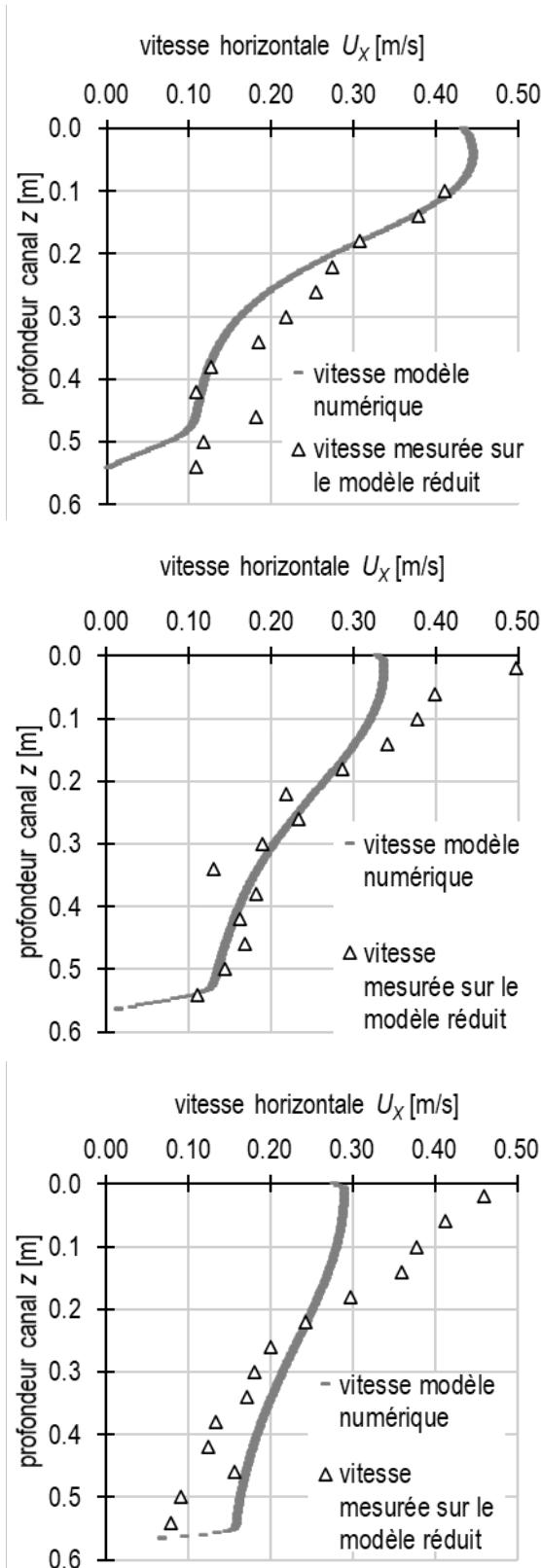


Figure 27. Vitesses horizontales U_X issues du modèle numérique (trait continu) et les mesures sur le modèle réduit (symbole triangle) en fonction de la profondeur pour $H=0.15$ m, avec $z=0.00$ m correspondant à la surface de l'eau : (a) râtelier proche, (b) râtelier intermédiaire et (c) râtelier distant.

3.3 Coefficient de trainée

Les vitesses (composantes horizontales) U_x permettent de déterminer le nombre de Reynolds R de la barre selon l'équation (13) :

$$R = \frac{U_x D_B}{\nu} \quad (13)$$

Où U_x est la composante horizontale de la vitesse, D_B le diamètre des barres de râtelier ($D_B=0.04$ m) et ν la viscosité cinématique de l'eau ($\nu=1.31 \cdot 10^{-6}$ m²/s).

Le nombre de Reynolds R permet de calculer le coefficient de trainée C_{WC} (Cheng 2013) unitaire, c'est-à-dire par longueur de barre submergée et donc par point de vitesse. Conséquemment, le champ des vitesses (Figure 27, et ainsi nombre de Reynolds) effectif et discrétisé est considéré au lieu d'une valeur moyenne.

$$C_{WC} = 11R^{-0.75} + 0.9 \left[1 - e^{-\left(\frac{1000}{R}\right)} \right] + 1.2 \left[1 - e^{\left(-\left(\frac{R}{4500}\right)^{0.7}\right)} \right] \quad (14)$$

La force de trainée F_C calculée pour la poussée de l'eau suit comme :

$$F_C = C_{WC} D_B \Delta z \rho \frac{U_x^2}{2} \quad (15)$$

Où C_{WC} est le coefficient de trainée (l'équation 14), $D_B=0.04$ m le diamètre des barres de râtelier, Δz la différence en hauteur verticale entre 2 points de mesure de la vitesse, ρ la masse volumique de l'eau et U_x la composante horizontale de la vitesse.

Le moment calculé M_C par barre est déterminé selon :

$$M_C = \sum (F_C(z + l)) \quad (16)$$

où F_C est la force calculée (équation 15) à la hauteur z , l la distance entre la surface de l'eau et l'axe de rotation du système de mesure de force et z la profondeur à laquelle se trouve la composante horizontale de la vitesse U_x (distance verticale entre la vitesse considérée et l'axe de rotation du système de mesure de force, Figure 14).

Le moment calculé M_C selon l'équation (16) et le moment mesuré M_R (équation 12) par barre de râtelier sont comparés à la Figure 28. Les symboles ronds représentent la configuration $b/L_M=0.60$, les symboles carrés $b/L_M=0.77$ et les symboles triangles $b/L_M=0.40$. Les symboles noirs sont pour le râtelier proche, les symboles gris pour le râtelier intermédiaire et les symboles blancs pour le râtelier distant.

Les enseignements suivants peuvent être tirés de la Figure 28 :

- Le coefficient de détermination est relativement haut avec $R^2=0.91$, le lien est clair entre la mesure et le calcul. Les systèmes de mesures sur le modèle sont ainsi *a priori* bien calibrés et donc fiables.
- Une différence systématique de presque 30% entre les valeurs calculées et les valeurs mesurées apparaît. Les valeurs mesurées sont, cependant, supérieures aux valeurs calculées. Une variation est normale et attendue, mais ne peut pas être justifiée plus précisément. De manière spéculative, il peut être argumenté que les champs de vitesse sont tridimensionnels dans le modèle physique, contrairement à une situation monodimensionnelle comme base pour le calcul.
- Avec la largeur des passes, l'imprécision augmente. En effet, les symboles carrés ($b/L_M=0.77$) présentent un écart plus élevé que les symboles triangles ($b/L_M=0.40$). Des passes larges incluent moins de barres, et donc des forces plus faibles.

La force de l'eau uniquement a été mesurée, ce qui permet d'obtenir un coefficient de trainée pour l'eau avec des valeurs mesurées :

$$C_{WE} = \frac{F_E / n_B}{\rho A \frac{U_M^2}{2}} \quad (17)$$

Où est F_E est la force mesurée produite par l'eau sur le râtelier, n_B le nombre de barres au râtelier, ρ la masse volumique de l'eau ($\rho=1'000 \text{ kg/m}^3$), A la surface perpendiculaire immergée de la barre de râtelier et U_M la moyenne de la vitesse (composante horizontale) sur la longueur de la barre immergée à l'emplacement du râtelier.

La Figure 29 montre les coefficients de trainée C_{WE} obtenus par la mesure sur le modèle réduit (équation 17) en fonction des coefficients de trainée calculés C_{WC} selon Cheng (2013) avec l'équation (14). Le trait noir représente la limite de corrélation entre les coefficients de trainée théoriques et mesurés.

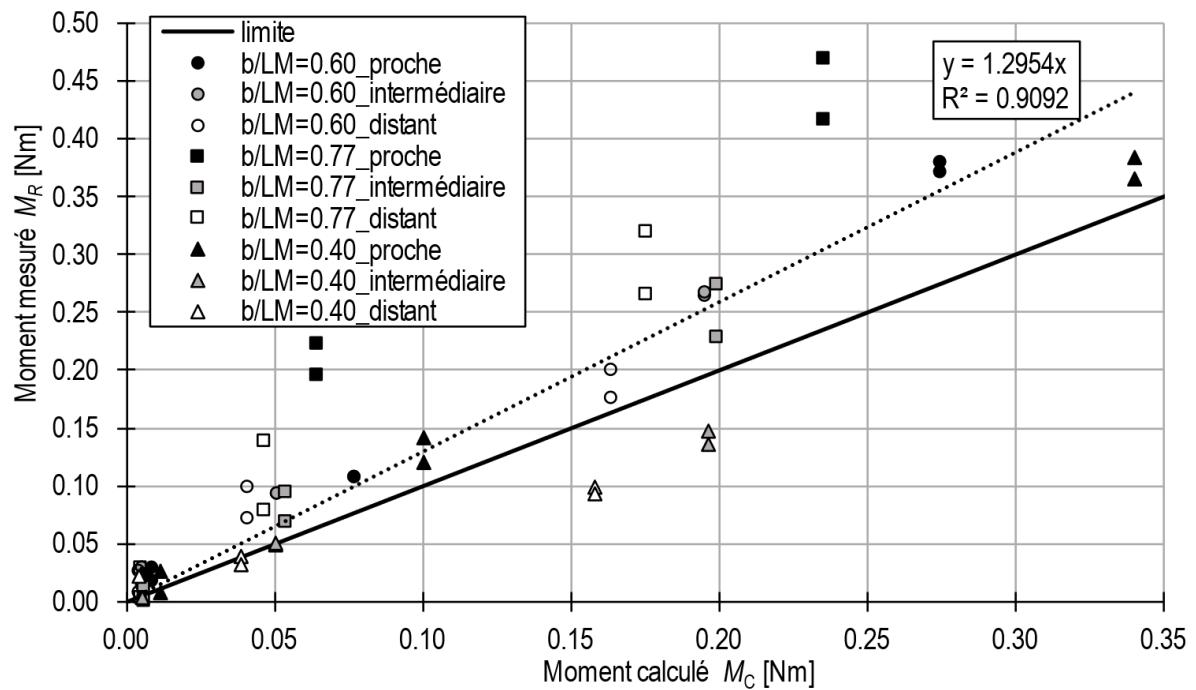


Figure 28. Comparaison entre les moments mesurés M_R (équation 12) et les moments calculés M_C (équation 16).

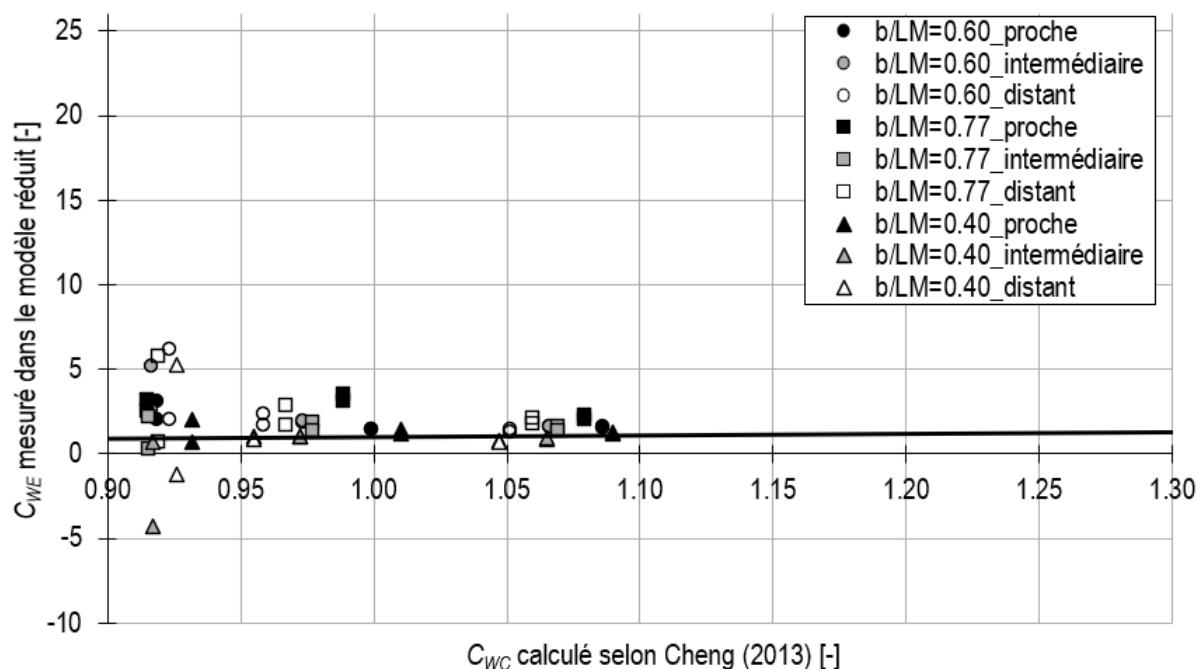


Figure 29. Comparaison entre les coefficients de trainée mesurés dans le modèle pour de l'eau seule C_{WE} et les coefficients de trainée calculés C_{WC} selon Cheng (2013).

Il est constaté à la Figure 29 que la corrélation entre les valeurs mesurées et calculées selon Cheng (2013) est difficile, il y a plusieurs explications :

- Il s'agit de petites forces mesurées, la précision de la mesure est donc faible. La valeur des coefficients de trainée C_{WE} est influencée par la précision de la mesure.
- Les barres de râtelier se trouvent dans un écoulement qui n'est pas uniforme. Les conditions hydrodynamiques sont variées par l'influence du déversoir à proximité.
- Les coefficients de trainée C_{WE} qui se trouvent dans la gamme $1.00 < C_{WE} < 1.10$ ont une meilleure corrélation que pour $C_{WE} \leq 1.00$, les symboles sont plus proches de la limite de corrélation
- La largeur des passes et la position du râtelier n'ont pas d'influence sur la corrélation.

NCHRP (2000) ont également mesuré la force hydrodynamique de l'eau dans leur protocole d'essais (étude détaillée dans le chapitre 1.5). La Figure 30 montre la corrélation entre les coefficients de trainée C_{WE} mesurés par le NCHRP (2000) et les coefficients de trainée calculés C_{WC} selon Cheng (2013). Les données du NCHRP (2000) mesurent une valeur pour la force de l'eau qui a été transformée en coefficients de trainée C_{WE} selon la procédure de cette étude (équation 17).

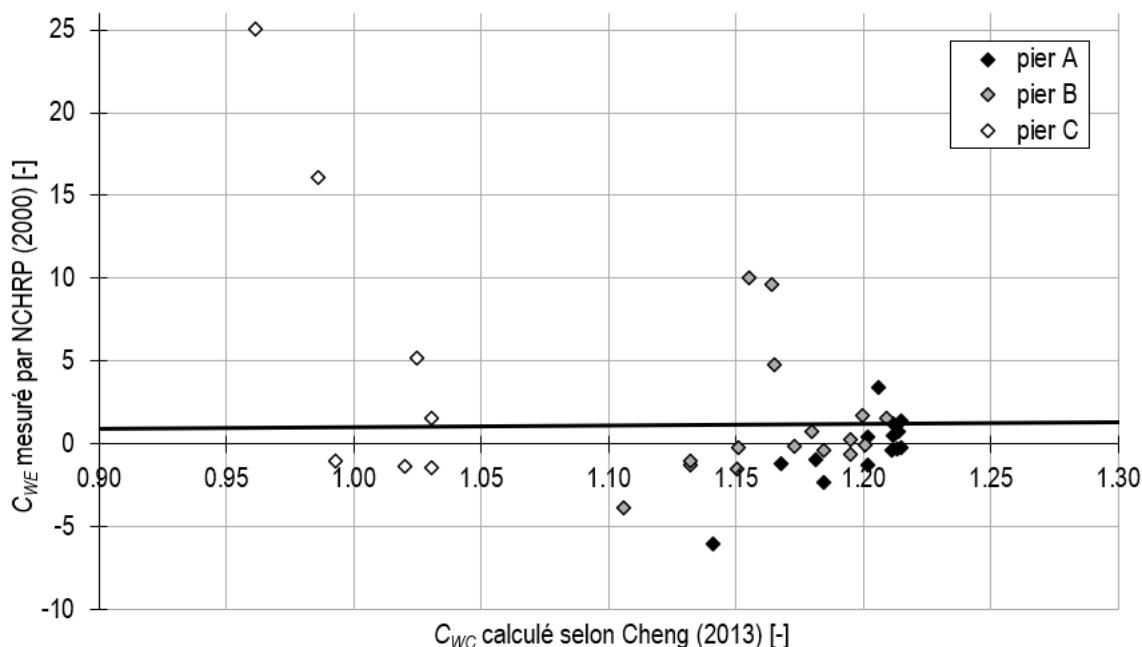


Figure 30. Comparaison entre les coefficients de trainée mesurés par le NCHRP (2000) C_{WE} et les coefficients de trainée calculés C_{WC} selon Cheng (2013).

La corrélation entre les valeurs mesurées par le NCHRP (2000) C_{WE} et les valeurs obtenues selon la théorie de Cheng (2013) C_{WC} est délicate, comme le montre la Figure 30. Le phénomène est déjà observé à la Figure 29 pour cette étude. La géométrie présente dans l'étude du NCHRP (2000) devrait amener à une meilleure corrélation (ce qui n'est pas le cas), car il s'agit d'un écoulement uniforme dans un canal qui n'est pas influencé par un déversoir à l'aval

L'étude présentée dans ce rapport se concentre sur les forces provoquées par des volumes de bois flottants extrêmes contre des râteliers de protection situés en amont des évacuateurs de crue des barrages. La force hydrodynamique est une importance secondaire, la force des bois flottants revêt d'une plus grande importance. La Figure 31 montre par le biais d'un histogramme la distribution du rapport F_B/F_E entre les forces mesurées pour les bois flottants F_B (chapitre 5.2, équation 18) et les forces mesurées pour l'eau seule F_E (équation 17).

L'analyse des rapports de forces F_B/F_E montre que la valeur moyenne est de $F_B/F_E=3.9$ et que la valeur médiane est de $F_B/F_E=2.8$. Sur la Figure 31, il est observé que la grande majorité des rapports F_B/F_E est comprise entre $2 < F_B/F_E < 6$. Cela signifie que la force provoquée par l'obstruction des bois flottants est dominante et plus importante que la force hydrodynamique seule.

Il faut relever de l'étude des coefficients de trainée C_{WE} le manque de précision de la mesure lié aux petites valeurs, la faible importance des forces de l'eau (les forces des bois flottants sont dominantes, presque 4x supérieure aux forces de l'eau seule en moyenne) et le champ de vitesses où se situent les barres de râtelier influencé par le déversoir à l'aval. La méthode calcul est justifiée, et donc l'ensemble du fonctionnement de la modélisation est validé.

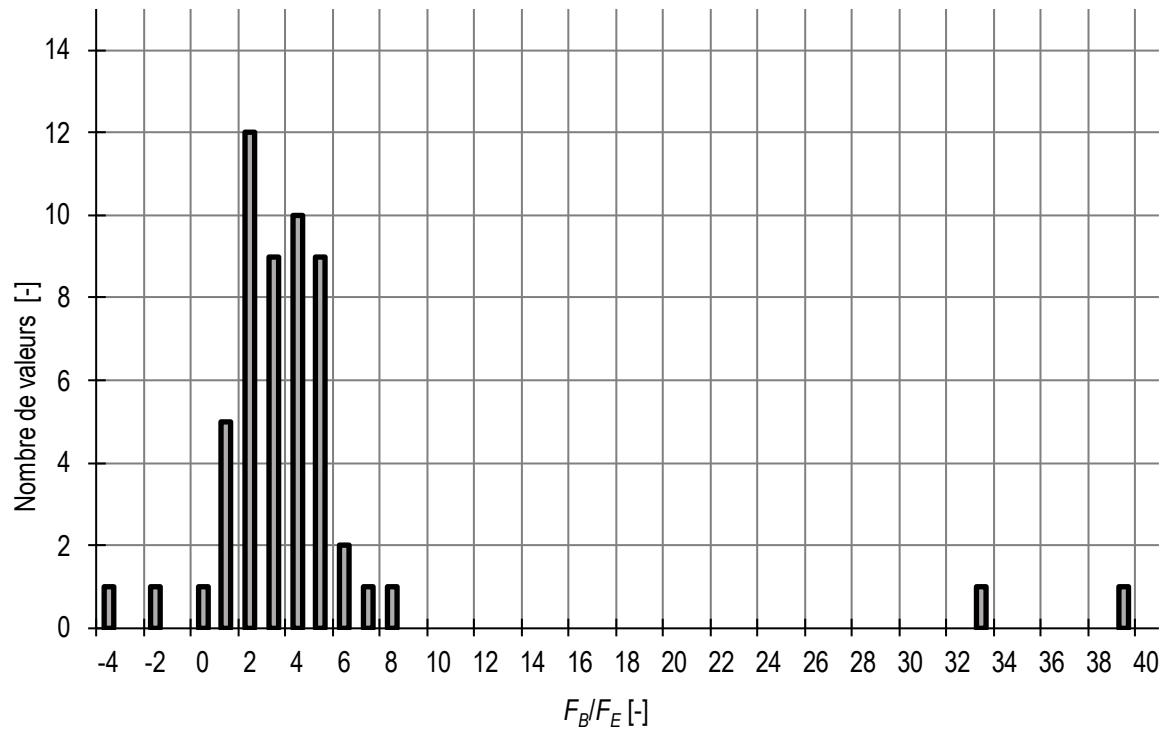


Figure 31. Histogramme montrant le nombre de valeurs en fonction du rapport des forces F_B/F_E de la présente étude.

4 Force des bois flottants

4.1 Observations générales

Les observations effectuées directement sur le modèle réduit pendant les expériences semblent pertinentes avant de s'intéresser aux résultats obtenus. Quelques photos-clés appuient les propos :

- Les petits débits expérimentés ($\chi \approx 0.33$) montrent de manière générale et indépendamment des configurations testées que le volume de bois flottants bloqué contient plus d'espaces entre les différents troncs (« tapis clairsemé ») que les grands débits expérimentés ($\chi \approx 1$) où les bois flottants sont plus resserrés (« tapis compact »). De plus, les bois flottants situés le plus en amont dans le réservoir ne semblent pas vraiment être exposés au courant avec les petits débits expérimentés ($\chi \approx 0.33$, Figure 32a), contrairement aux grands débits ($\chi \approx 1$, Figure 32b).
- Le blocage du volume de flottants est plus « stable » pour les plus petites largeurs de passes étudiées ($b/L_M = 0.40$) et le râtelier complet que les plus grandes largeurs de passes expérimentées ($b/L_M = 0.77$) et le râtelier partiel. Concrètement, une plus grande quantité de bois flottants franchissent le déversoir pour des passes larges ($b/L_M = 0.77$) et le râtelier partiel. Pour rappel, l'opérateur remet systématiquement dans le réservoir les bois flottants qui ont franchi le déversoir pendant les expériences afin d'avoir toujours le même volume de référence de bois flottants bloqué à l'amont dans le réservoir. C'est pourquoi, le volume de bois flottants à l'arrière peut être difforme et ne pas être régulier.
- Avec la mise en place du râtelier partiel, les bois flottants les plus proches du déversoir dépassent partiellement du râtelier et peuvent s'appuyer contre les piliers du déversoir, jusqu'à obstruer une passe (quelque fois observé, Figure 33a). Le phénomène observé est plus fréquent avec des débits maximal ($\chi \approx 1$). Avec le râtelier complet et l'augmentation du débit, les bois flottants peuvent dépasser à l'aval du râtelier, sans toutefois toucher les piliers du déversoir (Figure 33b). De manière générale, l'ensemble du volume de bois flottants est retenu par le râtelier complet tandis qu'une partie du volume est retenu par les piliers du déversoir avec le râtelier complet.



Figure 32. Vue de l'ensemble du volume de bois flottants depuis l'aval. (a) $\chi \approx 0.33$: les bois flottants les plus en amont sont peu mobilisés par l'écoulement et (b) $\chi \approx 1$: les bois flottants les plus à l'arrière sont mobilisés et s'approchent du râtelier.

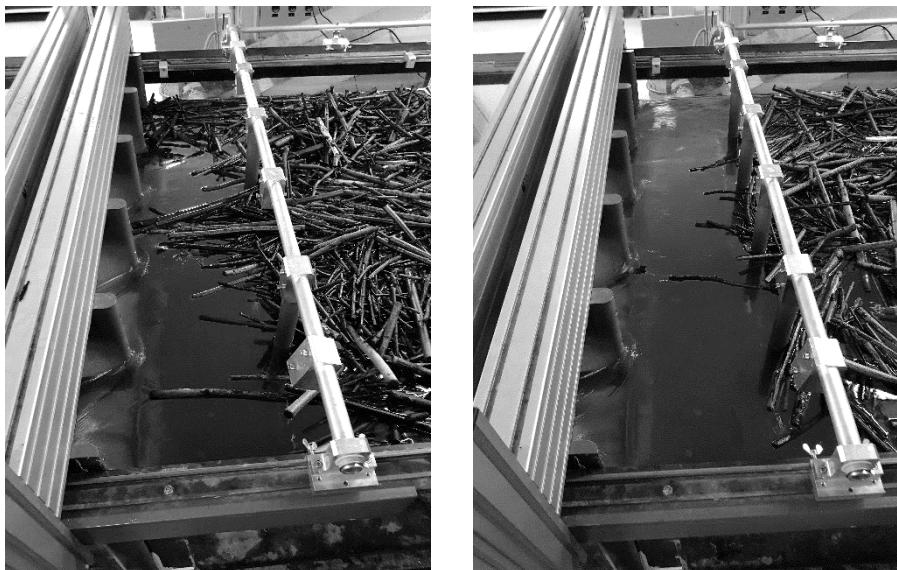
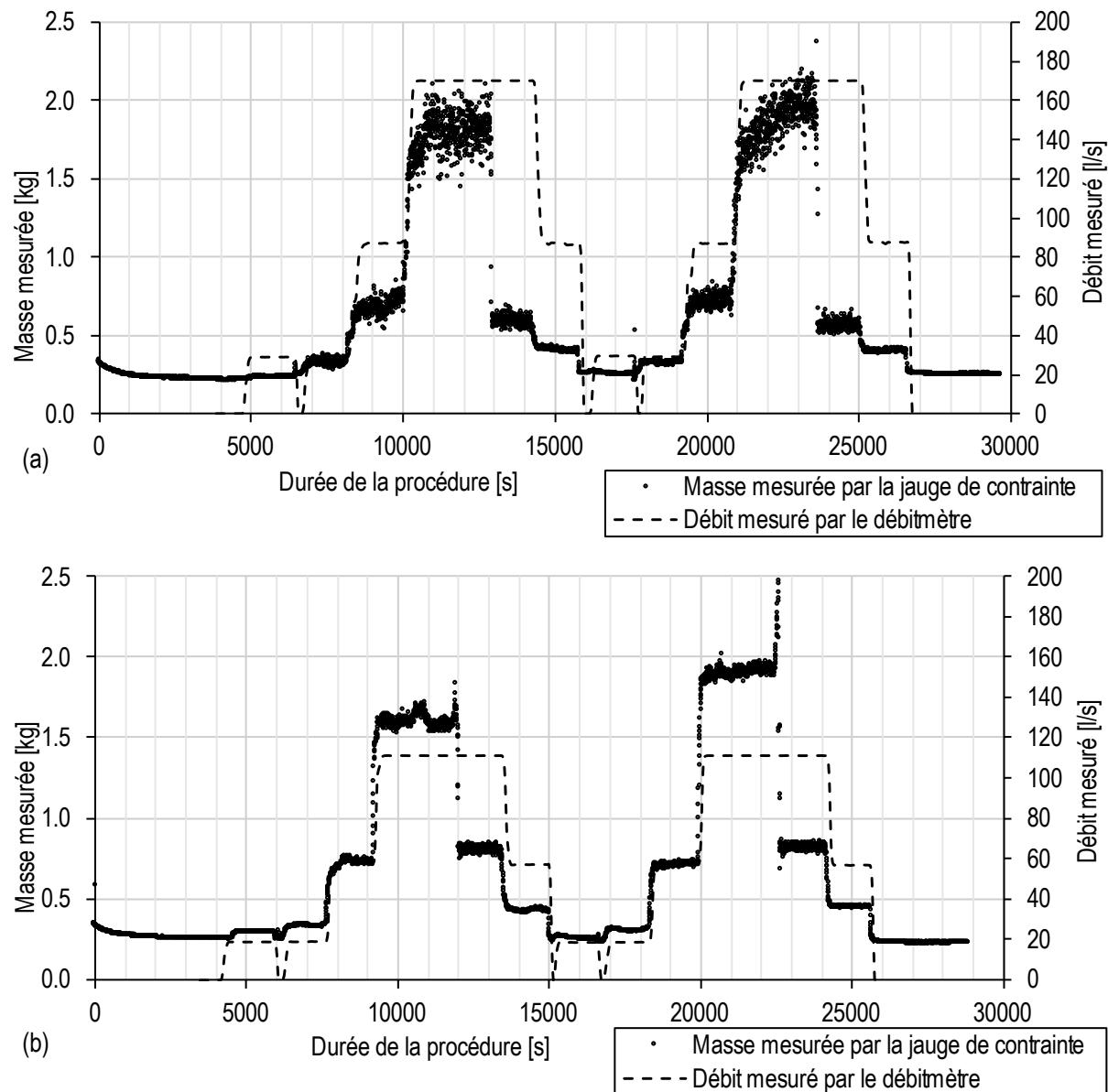


Figure 33. Vue au-dessus de l'espace entre les piliers du déversoir et le râtelier (a) partiel ; les bois flottants s'appuient partiellement contre les piliers du déversoir et (b) complet ; les bois flottants ne dépassent que légèrement du râtelier.

4.2 Visualisation et traitement des données

Les données mesurées par la jauge de contrainte et le débitmètre magnétique inductif (chapitre 2.1.3) sont collectées en continu dans le temps. La Figure 34 montre quelques exemples des données collectées brutes où les mesures de la masse et de débit sont superposées.



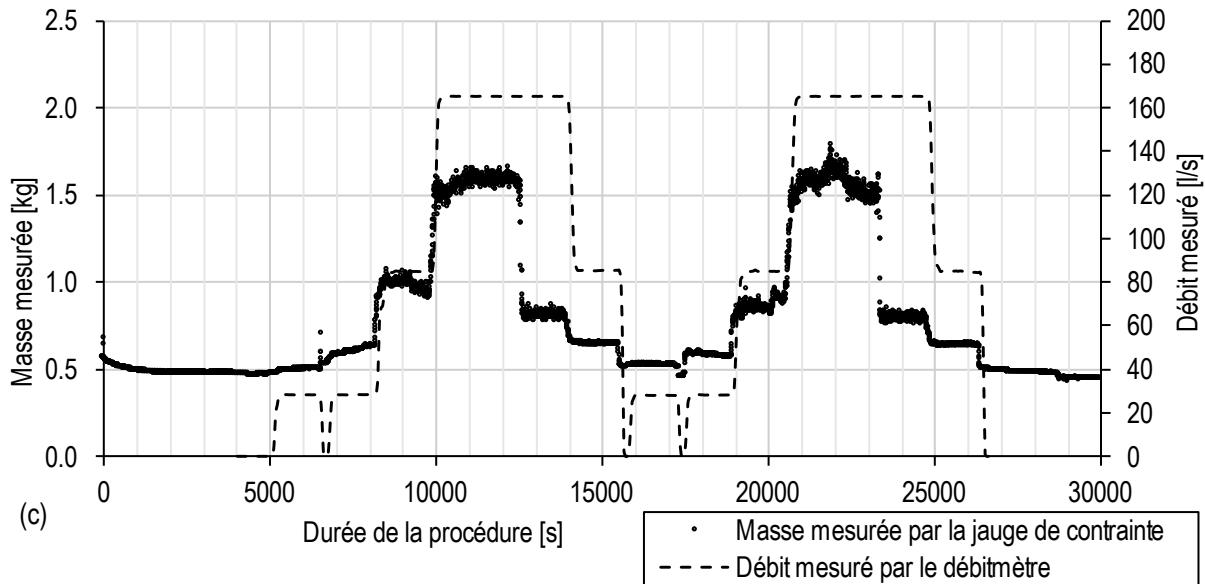


Figure 34. Valeurs de la masse (selon la jauge contrainte, étant une fonction de la force exercée par les bois flottants sur le râtelier) et du débit mesuré dans le temps. Tests (a) 19 à 24, (b) 37 à 42 et (c) 55 à 60.

Sur la Figure 34, plusieurs observations peuvent être faites :

- La mesure de la masse reste relativement constante pour chaque palier de débit. Pour le débit de dimensionnement (débit le plus grand, $\chi \approx 1$), la mesure de la masse à légèrement tendance à augmenter dans le temps jusqu'à se stabiliser. Cette constatation justifie que le temps de mesure de ce palier soit doublé (à 40 minutes) en comparaison des autres paliers (20 minutes).
- En présence de bois flottants et en augmentant le débit, les mesures de la masse montrent par tendance une plus grande dispersion de valeurs.
- La masse initiale du système de mesure de force varie très légèrement entre la mesure en début d'expérience et en fin d'expérience.
- Des valeurs de mesure de masse grandement supérieures ou inférieures (par rapport à la constance du palier) sont constatées au début ou à la fin d'un palier de débit. L'arrangement des bois flottants par l'opérateur en est certainement la cause. Ces valeurs extrêmes ne sont pas prises en compte pour l'analyse des données.

Afin de travailler avec des forces pour les bois flottants, toutes les données de masse collectées par la jauge de contrainte sont multipliées par l'accélération de la gravité g .

Pour chaque test (chaque palier), une valeur moyenne μ est calculée avec un écart-type σ , ce qui donne la force totale F_T . Ce choix est appuyé par la relative constante des valeurs observées dans le temps de mesure (20 ou 40 minutes). Les valeurs du début et de la fin de chaque palier ne sont évidemment pas prises en compte dans la moyenne.

À la valeur moyenne totale obtenue (force totale F_T), il faut soustraire la force propre F_P du système de mesure de force. Comme cette force varie de façon linéaire entre le début et la fin des expériences, une moyenne mobile dans le temps de cette force propre est soustraite à chaque valeur moyenne précédemment calculée.

La force des bois flottants F_B devant un râtelier est obtenue selon l'équation (18) :

$$F_B = \frac{(F_T - F_P - F_E)l_R}{l} \quad (18)$$

Où F_T est la force moyenne totale mesurée par la jauge de contrainte, F_P la force propre au système de mesure, F_E la force de la poussée de l'eau seule (chapitre 3.3), l_R le bras de levier de référence du système de mesure ($l_R=0.40$ m) et l le bras de levier entre l'axe de rotation du système de mesure de force et la surface de l'eau dans la section du râtelier (Figure 14).

Le bras de levier l qui est la distance entre la surface de l'eau et l'axe de rotation (Figure 14) est une approximation ou simplification de la position d'application de la force des bois flottants. Cette valeur est *a priori* inconnue. Les

observations sur le modèle réduit indiquent généralement que les bois flottants se répartissent sur la hauteur plus ou moins de manière symétrique de part et d'autre de la surface de l'eau. Cette approximation présente plusieurs avantages. Elle simplifie grandement les calculs, elle n'est pas trop éloignée de la réalité et la distance en question peut être connue par les concepteurs d'ouvrages dans la pratique.

La force des bois flottants avec de l'eau F_B donne la force totale contre un râtelier. La force par barre de râtelier f_B est calculée selon l'équation (19) :

$$f_B = \frac{F_B}{n_B} \quad (19)$$

Où F_B est la force des bois flottants avec de l'eau devant un râtelier et n_B le nombre de barres au râtelier.

Le coefficient de trainée produit par un blocage de bois flottants sur une barre de râtelier C_{WB} est disponible à l'équation (20) :

$$C_{WB} = \frac{f_B}{\rho A_B \frac{U_B^2}{2}} \quad (20)$$

Où est f_B est la force produite par des bois flottants 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 (hypothèse selon l'équation 21) et U_B la vitesse (composante horizontale) à la surface de l'eau à l'emplacement du râtelier.

La surface de blocage est une grande inconnue. Pour simplifier l'approche, l'hypothèse faite est celle d'un blocage d'une couche avec un seul tronc de diamètre maximal D_M . La largeur de blocage est déterminée selon la condition géométrique de l'équation 18 pour permettre le calcul de la surface d'obstruction A_B .

$$\begin{aligned} & \text{si } b_r \leq L_M \text{ alors } A_B = D_M b_r \\ & \text{si } b_r > L_M \text{ alors } A_B = D_M L_M \end{aligned} \quad (21)$$

Où b_r est la distance entre les barres de râtelier (Figure 14), L_M la longueur maximale des troncs et D_M le diamètre maximal des troncs.

L'hypothèse pour la surface d'obstruction A_B est valide en présence d'un volume de bois flottants caractéristique extrême. Tous les bois flottants ne peuvent prendre place au front du blocage (râtelier) et se disposent ensuite à l'amont dans le réservoir (Pfister et al., 2019).

4.3 Force sur un râtelier complet

Avec le râtelier complet, l'ensemble du volume de bois flottants est normalement appuyé et bloqué contre les barres de râtelier (contrairement au râtelier partiel où des bois flottants s'appuient aussi sur les piliers du déversoir, chapitre 4.1). Il est donc intéressant, dans un premier temps, d'étudier uniquement ce cas « extrême ». De plus, l'espacement relatif des barres de râtelier b_r/L_M (rapport entre l'espacement des barres de râtelier et la longueur maximale des troncs) est semblable au rapport de largeurs des passes du déversoir b/L_M . Le critère de Godtlund et Tesaker (1994) est respecté (tous les bois flottants restent en principe bloqués).

La présentation suivante des légendes et symboles est utilisée dans les figures suivantes :

- Symboles triangles : $b/L_M=0.40$
- 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

4.3.1 Force moyenne et écart-type

Les mesures relevées sur le modèle réduit (par palier de débit durant 20 à 40 min environ 180 valeurs sont enregistrées) ont été synthétisées en une force moyenne μ et un écart-type σ pour chaque configuration testée, comme expliqué au chapitre 4.2. La Figure 35a montre pour le râtelier complet le rapport entre l'écart-type et la moyenne σ/μ (qui est formulé similaire à une intensité de turbulence) en fonction de la moyenne μ et la Figure 35b

en fonction du débit relatif χ . Les symboles en bleu représentent les valeurs mesurées uniquement avec de l'eau (fonctionnement du modèle réduit sans bois flottants) et les symboles en noir représentent un fonctionnement avec l'ajout de bois flottants.

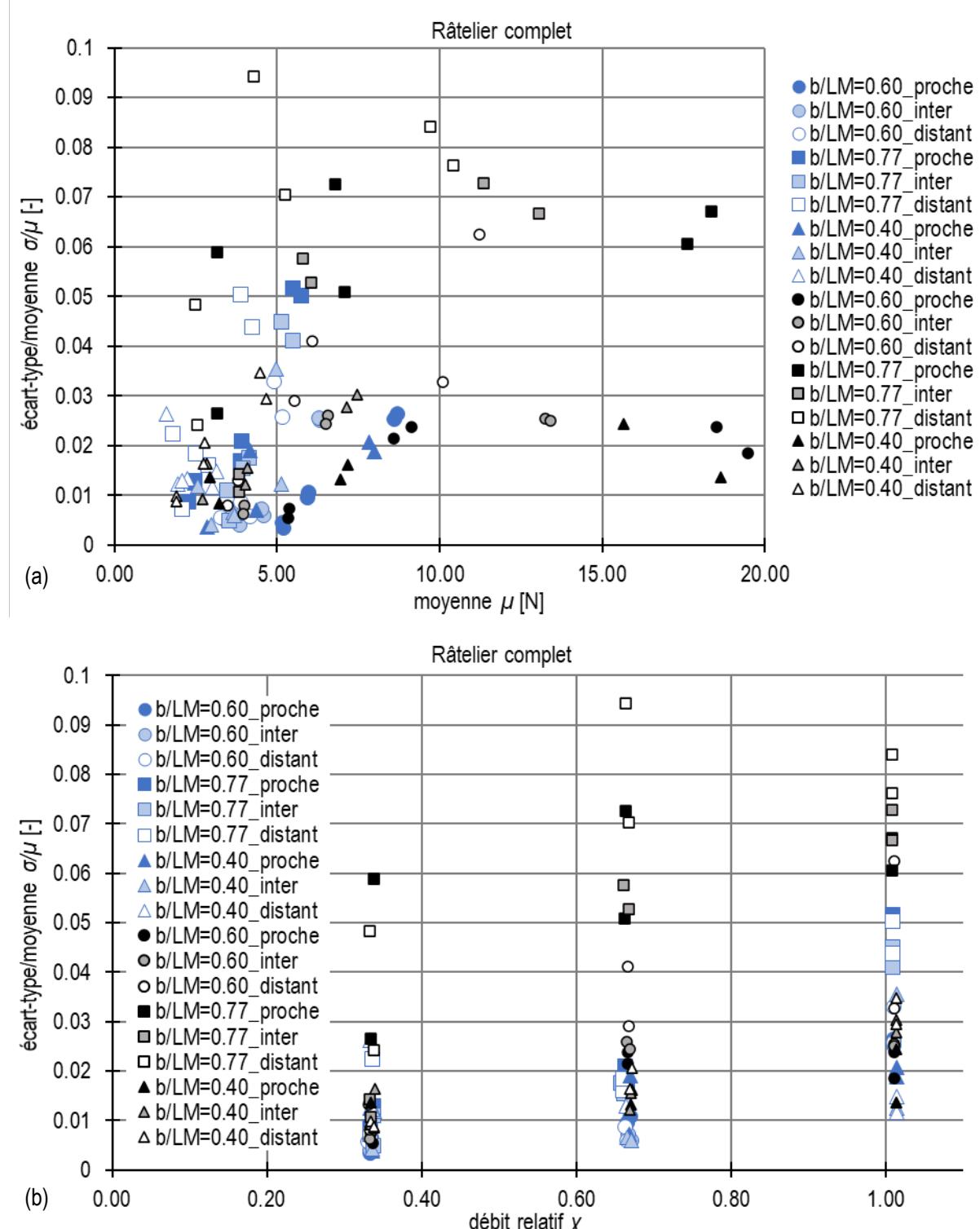


Figure 35. Rapport entre l'écart-type et la moyenne σ/μ en fonction de (a) moyenne μ et (b) débit relatif χ . Bleu : uniquement avec de l'eau ; noir : avec l'ajout de bois flottants.

Sur la base de la Figure 35, les considérations suivantes peuvent être faites :

- Le rapport σ/μ est plus élevé pour une situation avec la présence des bois flottants (en moyenne $\sigma/\mu=0.035$) que pour une situation uniquement avec de l'eau (en moyenne $\sigma/\mu=0.012$). La dispersion des valeurs est presque trois fois plus élevée pour une situation en présence de bois flottants. Toutes études de bois flottants sont soumises à un caractère relativement aléatoire (dispersion augmentée en leur présence). Toutefois, σ/μ est inférieur à 0.10 pour toutes les configurations testées et donc relativement faible.
- De manière générale, les passes relativement larges $b/L_M=0.77$ (symboles carrés) produisent un rapport σ/μ plus élevé que les passes étroites.
- Le rapport σ/μ a tendance à augmenter en fonction de la moyenne μ et en fonction du débit relatif χ pour une situation avec de l'eau uniquement (symboles bleus).
- Avec la présence des bois flottants, le rapport σ/μ augmente, dans un premier temps, en fonction de la moyenne jusqu'à $\mu \approx 10$ N. Dans un second temps ($\mu > 10$ N), le rapport σ/μ atteint un maximum et reste constant.

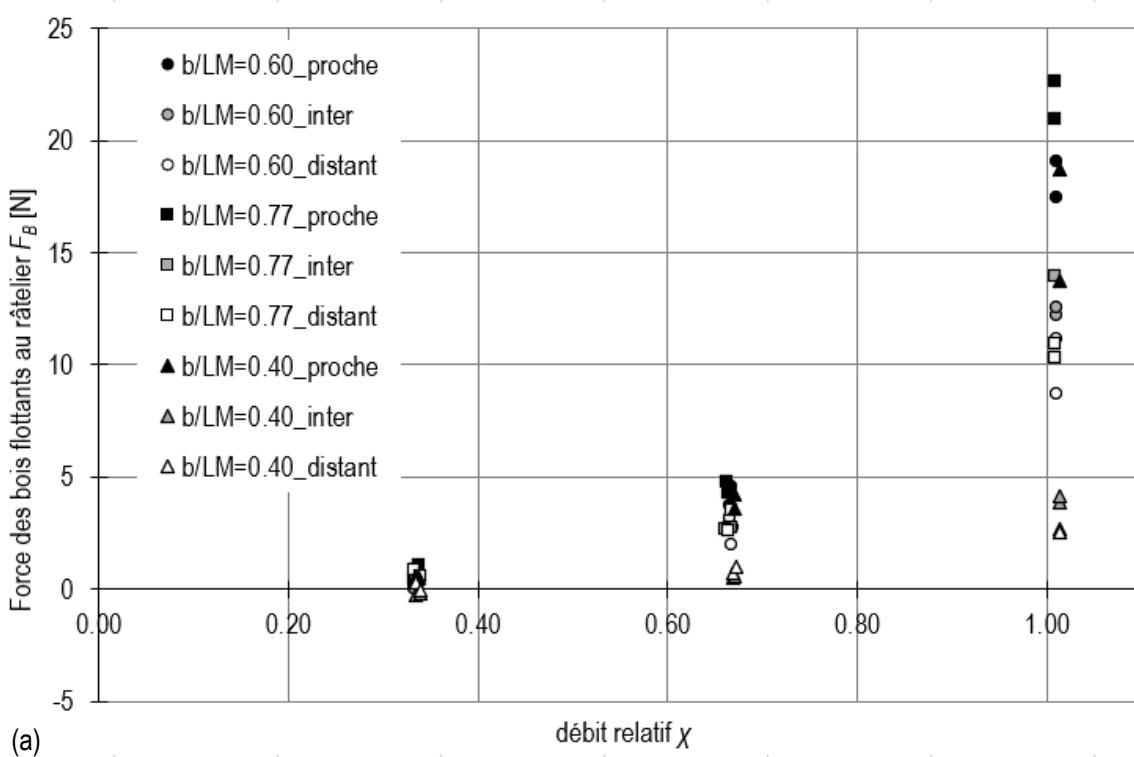
4.3.2 Effet du débit relatif

Le débit influence la force des bois flottants F_B (équation 18) appliquée sur le râtelier, car il détermine la vitesse de l'écoulement (pour le cas sans bois flottants certainement, avec les bois flottants la situation est moins évidente) à l'endroit de l'obstruction du râtelier. Le principe de la quantité de mouvement relie le changement de vitesse avec la force transmise entre l'eau et l'objet provoquant ce changement. La quantité de mouvement échangée ΔI (la force appliquée à l'obstacle) est formulée comme suit, en combinaison avec la continuité

$$\Delta I = \rho Q (\Delta U) = \rho (\Delta A) (\Delta U)^2 \quad (22)$$

Une réduction ΔA de section d'écoulement disponible par des bois flottants obstruant le râtelier provoque une force sur l'obstruction. L'effet de la vitesse diminuée ΔU est quadratique. Une comparaison avec l'équation 20 du coefficient de trainée C_{WB} montre que là aussi l'effet de la vitesse sur la force est quadratique, la formulation est cohérente.

L'obstruction de bois flottants contre un râtelier complet pour toutes les configurations testées en fonction du débit relatif χ est montré à la Figure 36. La force des bois flottants contre le râtelier F_B (équation 18) est visible à la Figure 36a, la force par barre de râtelier f_B (équation 19) à la Figure 36b et le coefficient de trainée C_{WB} (équation 20) à la Figure 36c.



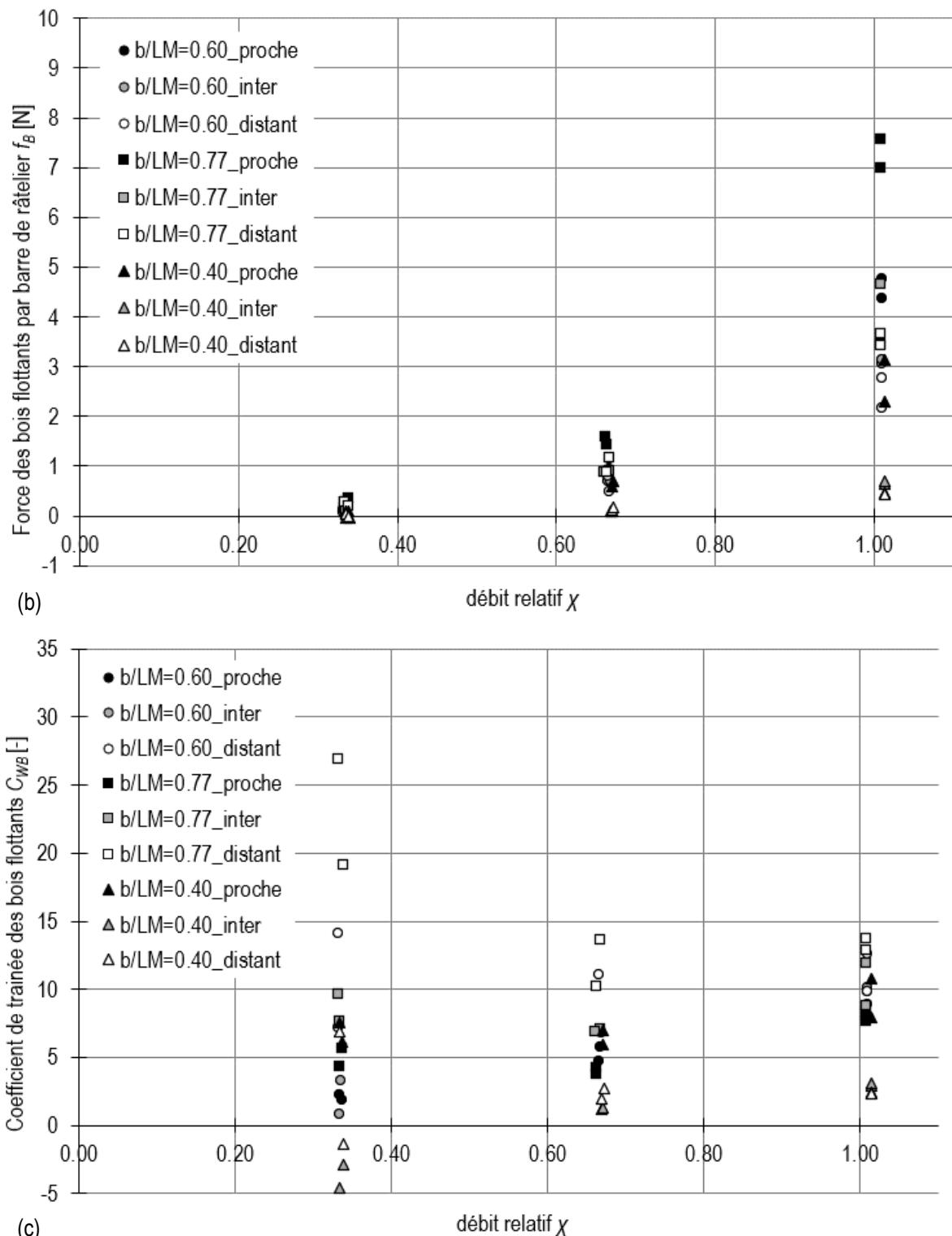


Figure 36. Effort des bois flottants appliqué sur le râtelier complet en fonction du débit relatif χ , exprimé par (a) la force mesurée au râtelier F_B , (b) la force mesurée par barre de râtelier f_B et (c) le coefficient de trainée C_{WB} .

Il est observé à la Figure 36 :

- La force mesurée au râtelier et la force par barre de râtelier (Figure 36a, b) augmentent en fonction du débit relatif χ . Cette observation est liée avec la vitesse d'approche qui augmente en fonction du débit. La force maximale mesurée est inférieure à 25.00 N (22.67 N) et la force maximale par pilier est inférieur à 8.00 N (7.56 N).

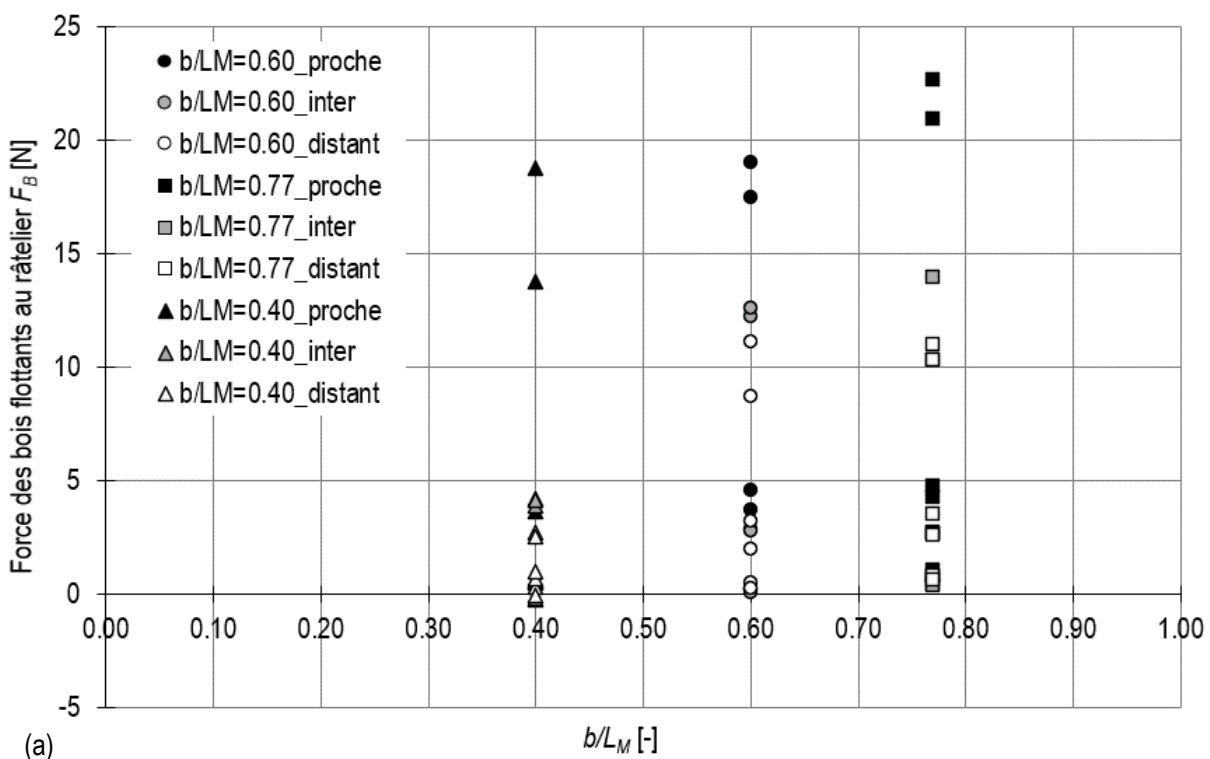
- Les râteliers proches (symboles noirs) ont mesuré des forces au râtelier et par barre (Figure 36a et b) plus élevées que les râteliers intermédiaires et distants. En se rapprochant du déversoir, les vitesses d'approche augmentent (Figure 27). La vitesse d'approche est un paramètre qui influence la force mesurée. Pour le débit de dimensionnement ($\chi \approx 1$), la force mesurée pour l'ensemble des râteliers proches est en moyenne de 18.78 N, pour les râteliers intermédiaires de 9.52 N et pour les râteliers distants de 7.72 N. Un facteur de 2.4 est identifié pour la mesure de la force entre un râtelier proche et un râtelier distant.
- De manière générale, les passes larges $b/L_M=0.77$ (symboles carrés) ont supporté un effort plus important que les passes plus étroites. Cette observation s'explique par le fait que les passes représentent des portées plus larges et donc les bois flottants appuyés transmettent plus d'efforts (repris sur toute la largeur de la passe).
- Le coefficient de trainée C_{WB} s'approche d'une constante en fonction du débit relatif χ (Figure 36c). La vitesse d'approche est apparemment correctement comprise dans le calcul de C_{WB} (voir équation 20), donc son effet visible pour les mesures des forces au râtelier et par barre de râtelier disparaît. Cependant, une influence de la largeur des passes reste visible. En moyenne, pour des passes larges ($b/L_M=0.77$), le coefficient de trainée C_{WB} moyen vaut 10.1, pour des passes moyennes ($b/L_M=0.60$) $C_{WB}=7.3$ et pour des passes étroites ($b/L_M=0.40$) $C_{WB}=3.4$. Une différence d'un facteur autour de 3 est observée entre des passes larges et des passes étroites.

La gamme testée du débit normalisé est de $0.33 \leq \chi \leq 1$.

4.3.3 Effet de la largeur relative des passes

Les observations présentes ont identifié un effet de la largeur relative des passes. Ceci est évident, car elle donne la section transversale du tapis des bois flottants qui doit être repris par une barre du râtelier.

La Figure 37 montre, en fonction du rapport de la largeur des passes b/L_M , (a) la force mesurée au râtelier F_B (équation 18), (b) la force par barre de râtelier f_B (équation 19) et (c) le coefficient de trainée C_{WB} (équation 20).



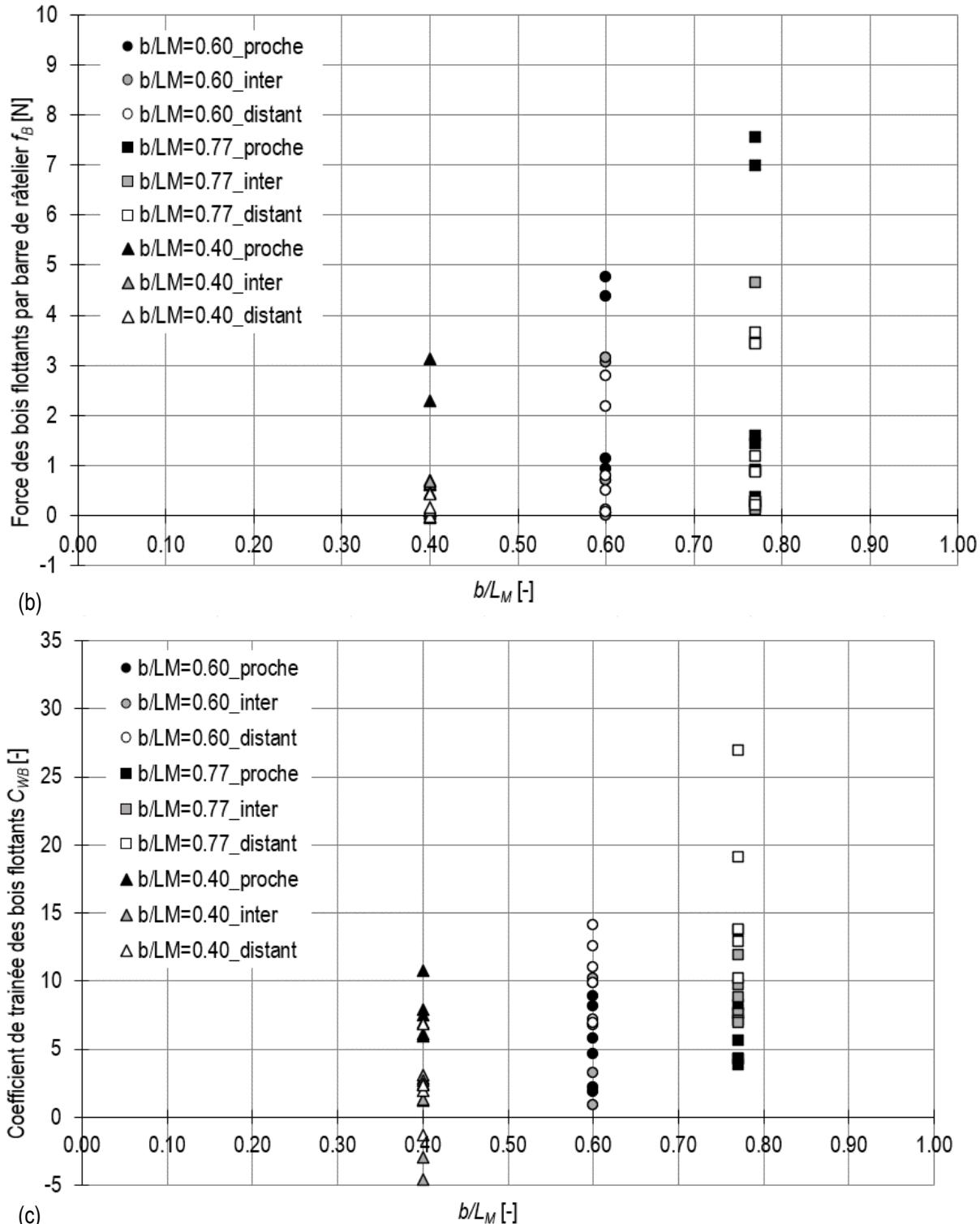


Figure 37. Effort des bois flottants appliqué sur le râtelier complet en fonction du rapport de la largeur des passes b/L_M , exprimé par (a) la force mesuré au râtelier F_B , (b) la force mesuré par barre de râtelier f_B et (c) le coefficient de trainée des bois flottants C_{WB} .

Les constatations suivantes sont effectu es sur la base de la Figure 37 :

- La force F_B mesuré par le râtelier complet (Figure 37a) n'est pas fonction du rapport de la largeur des passes b/L_M . Les valeurs restent indépendamment de la largeur des passes. Pour toutes les configurations test es, le volume de bois flottants et la largeur totale du canal est identique. Ces paramètres semblables

peuvent expliquer la constance. Toutefois, les râteliers complets proches (symboles noirs) ont enregistré les plus grandes valeurs quelle que soit la largeur des passes (influence de la vitesse d'approche).

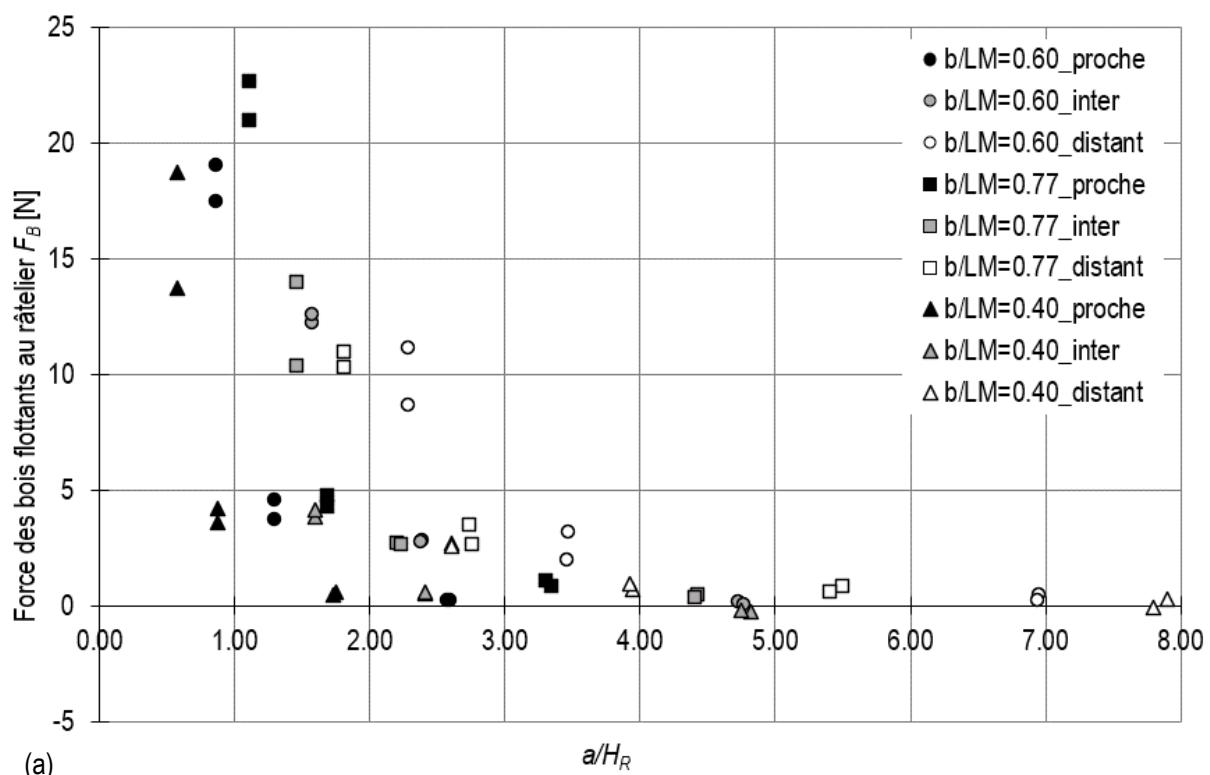
- Sur la Figure 37b, une relation est observée entre la force mesurée par barre de râtelier f_B et le rapport de largeur des passes. La force par barre de râtelier grandit avec l'augmentation du rapport de la largeur des passes b/L_M . Plus la largeur relative de passe est grande, plus l'effort transmis par les bois flottants aux barres de râtelier est grand. Il s'agit d'une démonstration logique. Encore une fois, l'influence de la vitesse d'approche est visible, le râtelier proche a montré les plus grandes valeurs (symboles noirs).
- Le coefficient de trainée C_{WB} est une claire relation avec le rapport de largeur des passes b/L_M (Figure 37c). Ce sont les passes larges ($b/L_M=0.77$) qui démontrent les plus grands coefficients de trainée C_{WB} et l'inverse, les plus petits coefficients de trainée C_{WB} sont constatés pour les passes étroites ($b/L_M=0.40$).

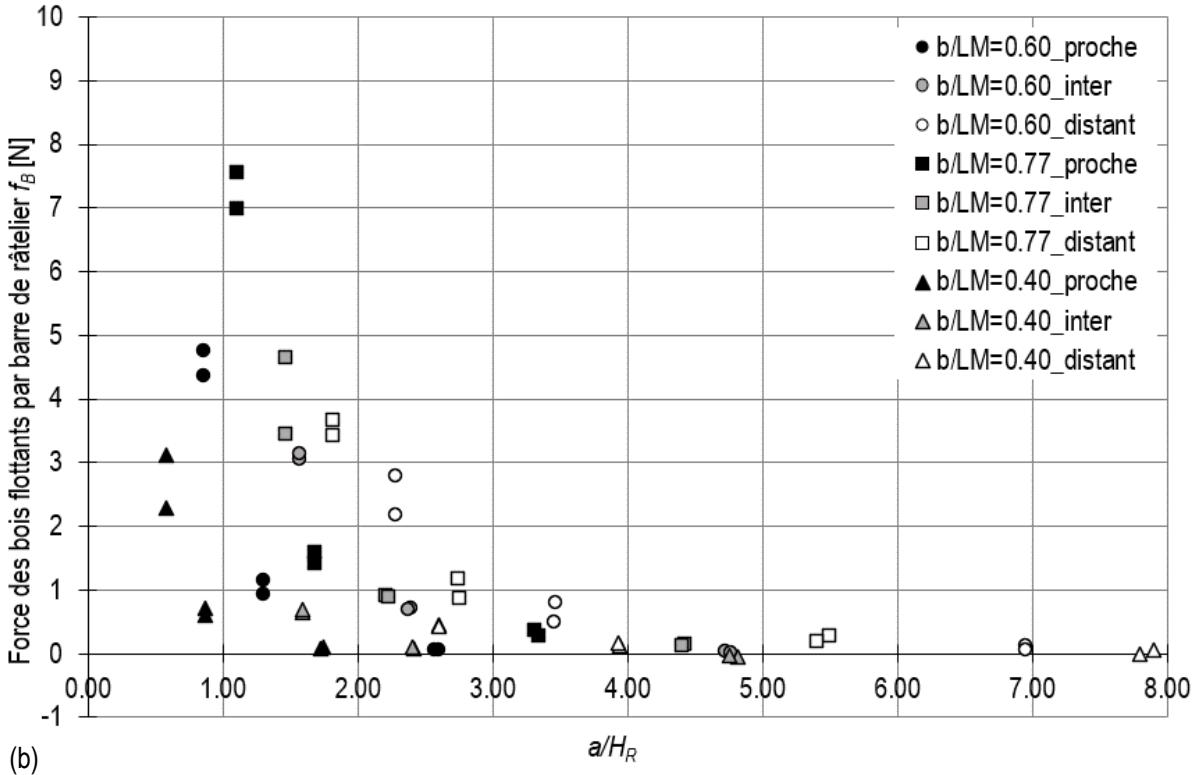
La gamme testée de la largeur relative des passes est de $0.40 \leq b/L_M \leq 0.77$.

4.3.4 Effet de la position du râtelier

La Figure 38 montre (a) la force mesurée des bois flottants au râtelier F_B (équation 18), (b) la force par barre de râtelier f_B (équation 19), (c) et le coefficient de trainée C_{WB} (équation 20), tous en fonction du rapport a/H_R qui décrit la position (l'avancement relatif, Figure 10) du râtelier.

La valeur H_R représente la charge de référence, étant définie sans bois flottants. L'avancement est potentiellement un paramètre décisif, car la position du râtelier est liée aux vitesses auxquelles les bois flottants bloqués contre le râtelier sont potentiellement exposés. La transition des forces entre eau et bois est, suivant le principe de la conservation de la quantité de mouvement, relié à un potentiel changement de vitesse à l'obstacle.





(b)

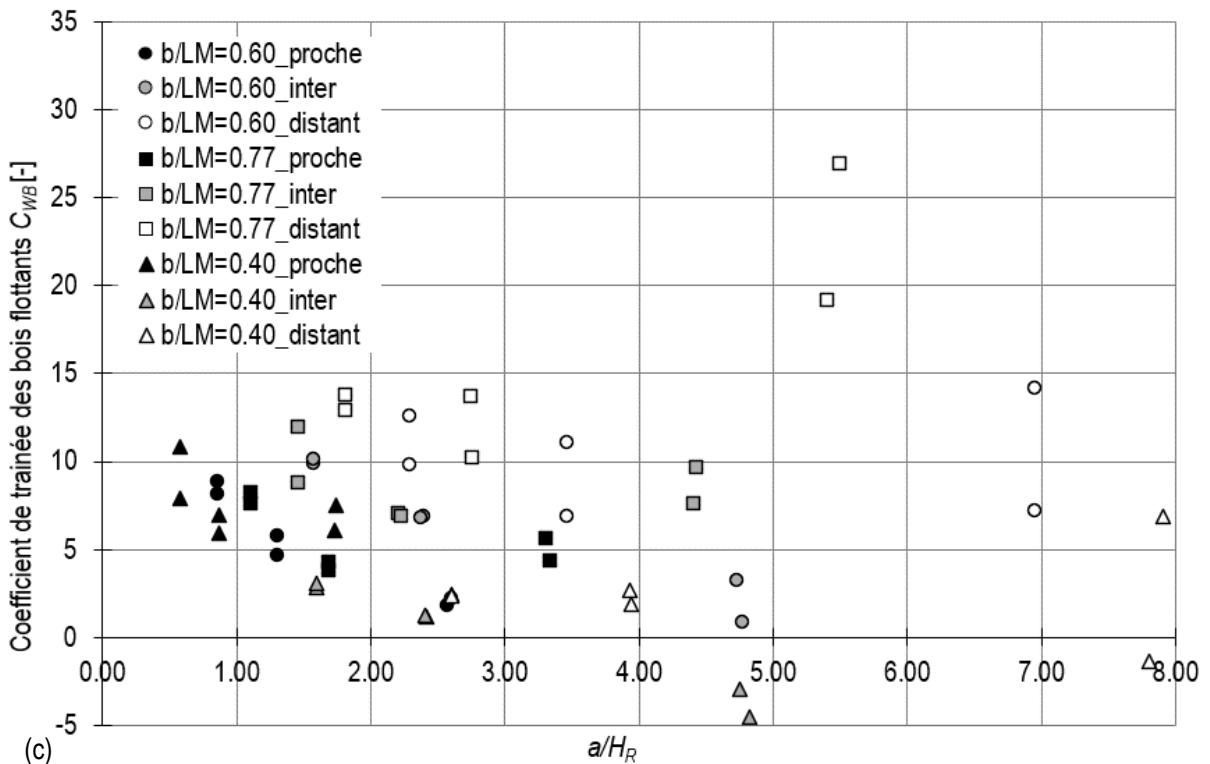


Figure 38. Effort des bois flottants appliqué sur le râtelier complet en fonction du rapport a/H_R (de l'avancement du râtelier), exprimé par (a) la force mesur  e au râtelier F_B , (b) la force mesur  e par barre de râtelier f_B et (c) le coefficient de trainée des bois flottants C_{WB} .

Les constatations suivantes sont effectu  es sur la base de la Figure 38 :

- La force mesur  e par le râtelier (Figure 38a) est une fonction quadratique du rapport a/H_R (selon la discussion de l'équation 18). Pour $a/H_R < 3$, la force mesur  e est relativement « grande ». Pour $a/H_R \geq 3$, la

force mesurée est comparativement faible (presque zéro) est reste constante. L'influence de la vitesse d'approche n'est ainsi plus à démontrer si $a/H_R \geq 3$.

- Le constat est identique pour la force mesurée par barre de râtelier (Figure 38b).
- Le coefficient de trainée C_{WB} (Figure 38c) varie autour d'une valeur constante, et n'est conséquemment pas fonction de a/H_R . L'effet de la vitesse d'approche est compris dans cette normalisation, c'est-à-dire que vitesse est correctement prise en compte dans le calcul de C_{WB} selon l'équation 18.
- Ce sont les passe larges ($b/L_M=0.77$, symboles carrés) qui montrent les plus grands C_{WB} de manière générale, indépendamment de a/H_R .

La gamme testée de l'avancement relatif du râtelier est de $0.58 \leq a/H_R \leq 7.91$.

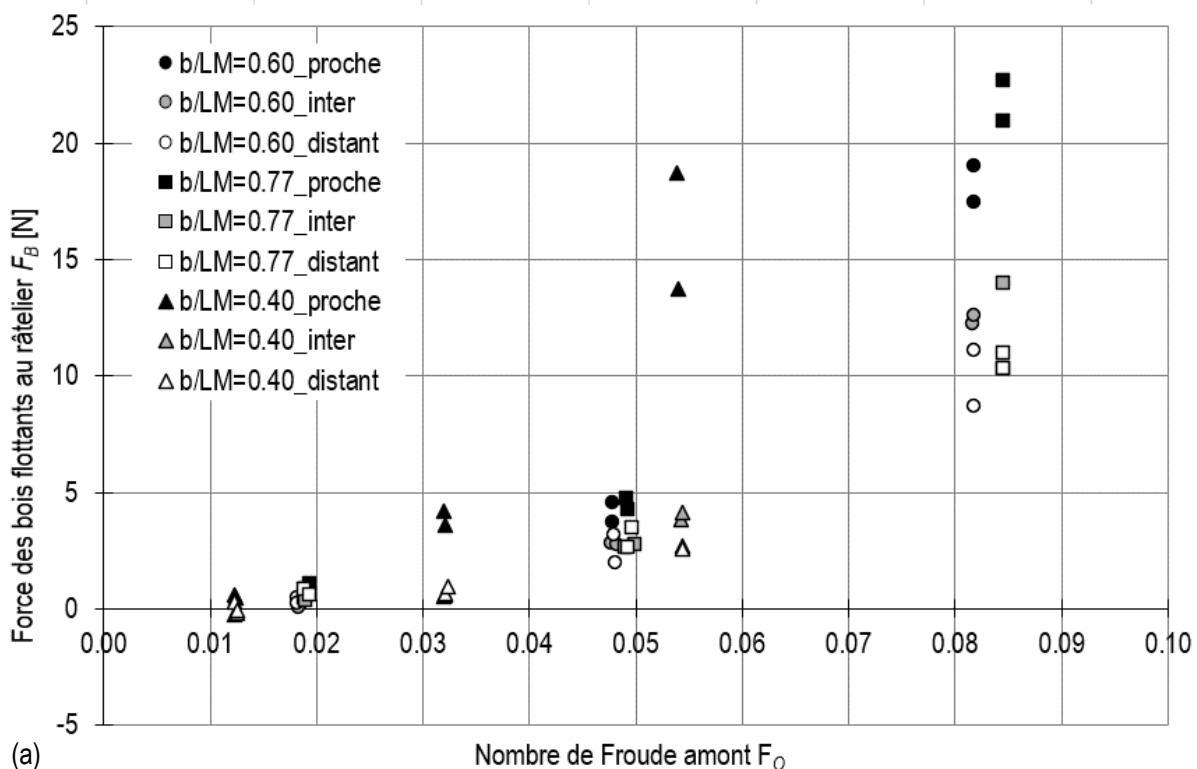
4.3.5 Effet du nombre de Froude amont

La Figure 39 montre (a) la force mesurée des bois flottants au râtelier F_B (équation 18), (b) la force par barre de râtelier f_B (équation 19), (c) et le coefficient de trainée C_{WB} (équation 20), en fonction du nombre de Froude amont. Celui-ci est défini en amont du déversoir dans le canal. Le nombre de Froude amont F_o est défini à l'équation (23) :

$$F_o = \frac{U_o}{\sqrt{g(W + H)}} = \frac{Q}{B\sqrt{g(W + H)^3}} \quad (23)$$

Où U_o est la vitesse dans le réservoir, g l'accélération de la gravité, W la hauteur de la crête du déversoir par rapport au fond du canal, H la charge hydraulique, Q le débit et B la largeur totale du canal.

La considération du nombre de Froude amont F_o permet de prendre en compte indirectement les vitesses dominées par le réservoir (et donc l'effet se reporte particulièrement sur les bois flottants qui se trouvent en amont du tapis). Précédemment, l'avancement relatif a/H_R représente indirectement les vitesses dominées par le déversoir (effet reporté sur les bois flottants proches au râtelier).



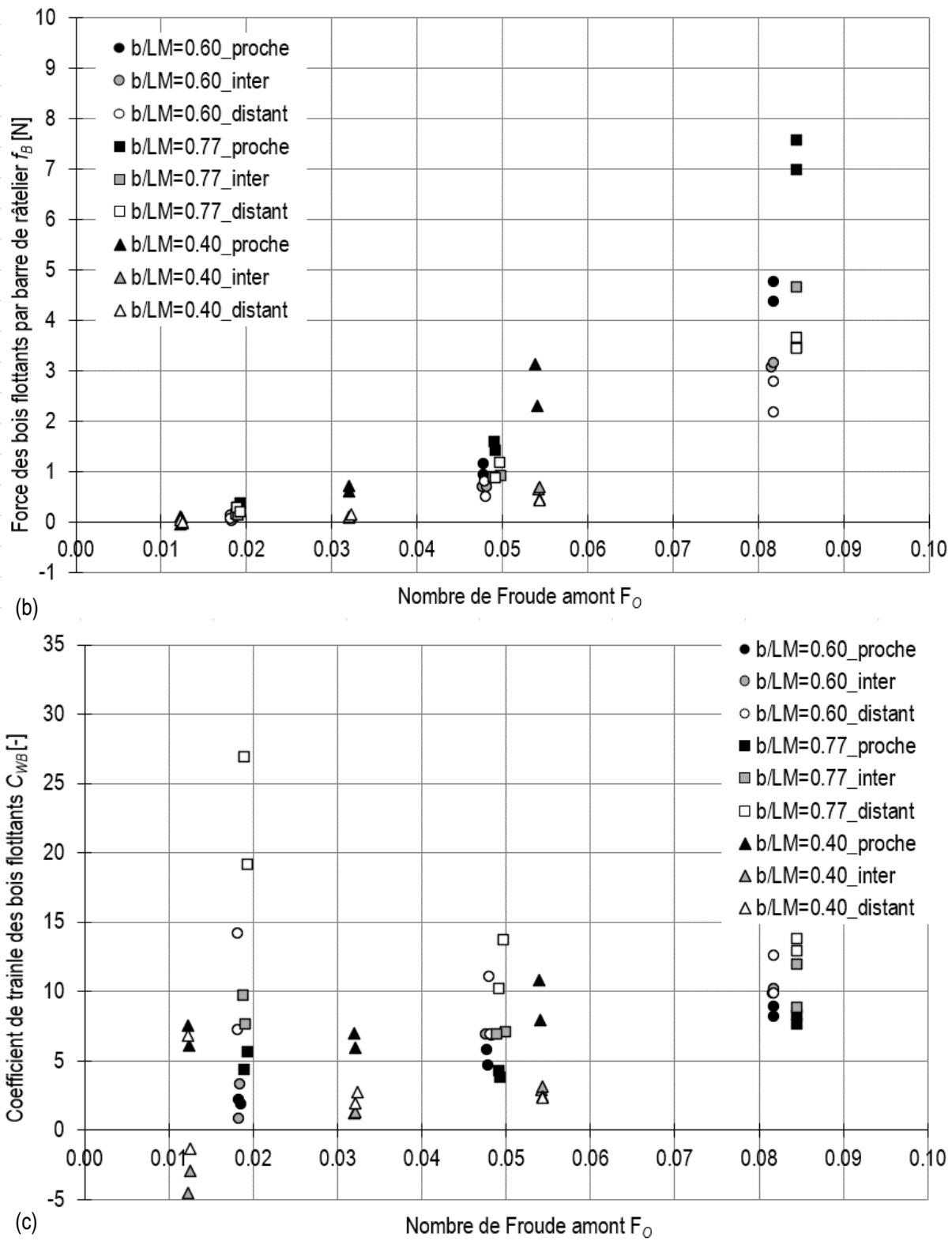


Figure 39. Effort des bois flottants appliqué sur le râtelier complet en fonction du nombre de Froude amont, exprimé par (a) la force mesur e au râtelier F_B , (b) la force mesur e par barre de râtelier f_B et (c) le coefficient de trainée C_{WB} .

Les constatations suivantes sont effectu es sur la base de la Figure 39 :

- Les forces mesur es au râtelier F_B ont tendance à augmenter en fonction du nombre de Froude F_o (valeurs les plus  lev es pour les râteliers proches, influencé par la vitesse d'approche).

- Le constat est identique pour la force mesurée par barre de râtelier f_B (Figure 39b).
- Le coefficient de traînée C_{WB} (Figure 39c) est quasiment constant ou diminue éventuellement légèrement en fonction de F_o . Pour $F_o > 0.02$, le coefficient de traînée C_{WB} a une valeur maximale proche de 15 et reste constant avec l'augmentation de F_o . Ce sont les passes larges ($b/L_M = 0.77$), comme déjà mentionné dans les chapitres précédents, qui donnent les plus grands coefficients de traînée C_{WB} . Mais, cette réflexion est applicable que de manière limitée dans cette étude, car $F_o < 0.085$ pour tous les tests et donc très faible. Pour une configuration réservoir, l'effet de F_o est similaire à l'effet de a/H_R , mais pour une configuration « rivière » avec $F_o > 0.1$ cela change probablement. Ceci est une limite de la présente étude, qui est à confirmer par des expériences supplémentaires.
- Pour $F_o < 0.02$ les valeurs de C_{WB} ne sont pas fiables, car la précision de mesure est limitée pour les petites valeurs (C_{WB} est divisé par des très petites valeurs).
- Le nombre de Froude amont F_o peut ainsi être utilisé pour déterminer un seuil à partir duquel les mesures réalisées sont cohérentes. En effet, pour des nombres de Froude amont inférieurs à 0.02, les mesures de force sont faibles, ce qui peut engendrer des valeurs calculées extrêmes et peu censées. La précision et la justesse de mesure pour de très petites valeurs peuvent être remises en question.

La gamme testée du nombre de Froude amont est de $0.012 \leq F_o \leq 0.085$. Une limite de la « force mesurée » selon les observations précédentes peut être définie $F_o = 0.02$. La gamme des tests significatives se réduit alors à $0.02 \leq F_o \leq 0.085$.

4.3.6 Effets combinés

Une analyse individuelle des paramètres potentiellement importants a été effectuée au chapitres 4.3.2 à 4.3.5. Les observations faites sont combinées et une approche cohérente est présentée dans ce chapitre.

Dans le cadre de la mise en place d'un râtelier complet à l'amont d'un évacuateur, l'ensemble du volume de bois flottants se bloque contre les barres du râtelier. Afin de connaître la force qui s'applique contre une barre de râtelier obstruée par un volume de bois flottants caractérisé comme extrême, la connaissance d'un coefficient de traînée C_{WB} est nécessaire.

Les limites suivantes viennent du modèle réduit, du programme de test et des observations précédentes (chapitre 4.3.2 à 4.3.5) :

- Les débits relatifs sont compris entre $0.33 < \chi < 1$.
- Les rapports de largeurs de passes compris entre $0.40 < b/L_M < 0.77$.
- L'étude s'est concentrée sur trois positions de râtelier (proche, intermédiaire et distant, voir chapitre 2.1.5).
- Les nombres de Froude amont sont compris entre $0.020 < F_o < 0.085$. Cette étude se concentre sur les conditions d'approche dites réservoir. Les nombres de Froude sont donc petits, car une configuration du type réservoir est étudié (vitesses faibles). Bien que des nombres de Froude inférieurs à $F_o < 0.020$ ont été expérimentés, ils ne sont pas retenus car les valeurs enregistrées sont extrêmement petites et dans la gamme des précisions de la jauge de contrainte.
- Avec l'expression d'un coefficient de traînée C_{WB} , la vitesse d'approche à la section des barres du râtelier (chapitre 3.2) est apparemment correctement comprise dans le calcul (équation 20). L'effet du débit, de la position du râtelier et du nombre de Froude amont ne sont donc pas à prendre en compte avec un terme supplémentaire.
- Comme observé dans les chapitres précédents (4.3.2 à 4.3.5), seul le rapport de largeur de passes b/L_M influence le coefficient de traînée C_{WB} . A noter que F_o entre certainement aussi en matière pour une configuration au fil de l'eau, mais pas pour les faibles valeurs testées ici.

La Figure 40 montre les coefficients de traînée C_{WB} en fonction de l'espacement relatif des barres de râtelier b_r/L_M , qui est équivalent dans le cadre du râtelier complet au rapport de largeur des passes b/L_M . Les coefficients de traînée C_{WB} dont les nombres de Froude amont sont inférieurs à $F_o < 0.020$ sont représentés en gris transparent.

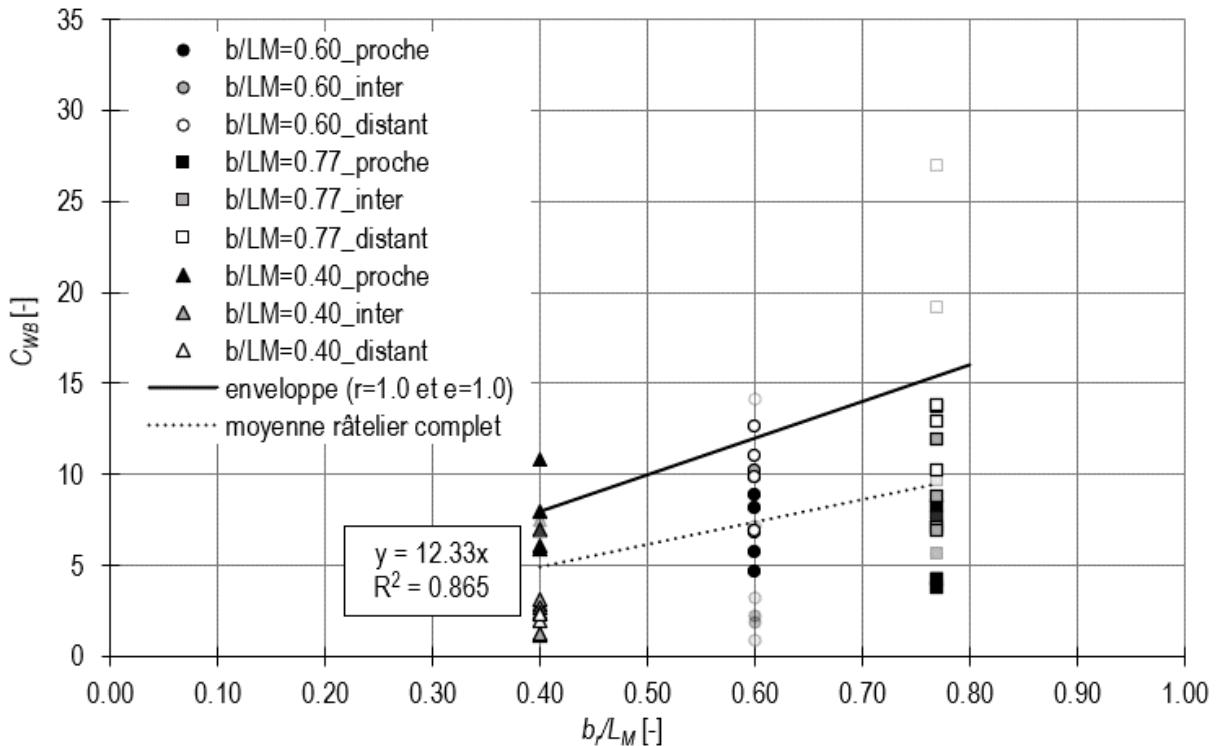


Figure 40. Coefficients de traînée C_{WB} (moyens) en fonction de l'espacement des barres de râteliers b_r/L_M , avec tendance moyenne (trait pointillé) et enveloppe (trait continu).

Comme visible à la Figure 40, le coefficient de traînée C_{WB} (par barre de râtelier) s'approche d'un comportement linéaire en fonction de l'espacement relatif des barres de râtelier b_r/L_M . L'approche moyen $C_{WB}=12.33(b_r/L_M)$, en trait pointillé sur la Figure 40, possède un coefficient de détermination de $R^2=0.865$. L'équation proposée pour déterminer une enveloppe du coefficient de traînée C_{WB} est la suivante :

$$C_{W_B} = 20re \left(\frac{b_r}{L_M} \right) \quad (24)$$

Où r est un facteur en fonction du type de râtelier (détailé dans le chapitre 4.4), e un facteur pour déterminer l'enveloppe choisie (détailé en-dessous) et b_r/L_M l'espacement relatif des barres de râtelier.

À la Figure 40, l'enveloppe proposée ($r=1.0$ et $e=1.0$) contient la grande majorité des points de coefficients de trainée C_{WB} mesurés, seuls quelques points sont supérieurs à l'enveloppe.

Jusqu'à présent, l'ensemble des analyses sont basées sur une force moyenne μ mesurée pendant toute la durée d'un palier (Figure 25). Il est évident que le caractère aléatoire des essais avec bois flottants a produit une certaine variation dans la mesure d'un même palier (chapitres 4.2 et 4.3.1).

La Figure 41 montre le coefficient de traînée C_{WB} basé sur l'addition de la moyenne et de l'écart-type ($\mu+\sigma$) du palier d'essai étudié, toujours en fonction de l'espacement des barres de râteliers b_r/L_M . Cet ajout de l'écart-type σ prend en compte la composante aléatoire et la dispersion des mesures dans le cadre des bois flottants.

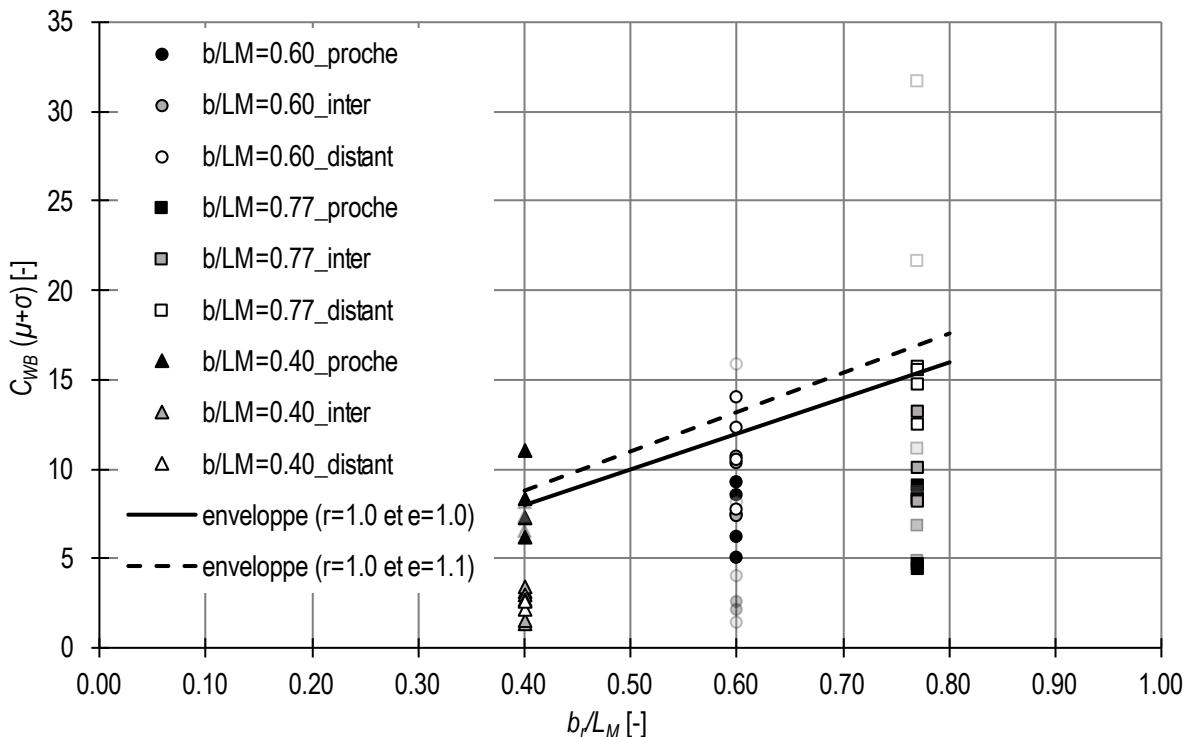


Figure 41. Coefficients de traînée C_{WB} ($\mu+\sigma$) en fonction de l'espacement relatif des barres de râteliers b/L_M , avec deux enveloppes proposées.

Sur la Figure 41, l'enveloppe avec un facteur $e=1.0$ est représentée en trait plein noir. L'addition de l'écart-type à la moyenne ($\mu+\sigma$) a légèrement augmenté les valeurs du coefficient de traînée C_{WB} . Plusieurs points se trouvent être supérieurs à l'enveloppe proposée avec $e=1.0$, contrairement à la Figure 40 (sans prise en compte de l'écart-type).

Une enveloppe avec $r=1.0$ et $e=1.1$ est représentée en trait tillé noir sur la Figure 41. Cette enveloppe englobe quasiment l'ensemble des valeurs des coefficients de traînée C_{WB} (avec ajout de l'écart-type à la moyenne), contrairement à une enveloppe avec $e=1.0$.

En appliquant un facteur $r=1.0$ pour le râtelier complet, un facteur d'enveloppe e peut être choisi selon les cas suivants :

- $e=1.0$, prise en compte d'une enveloppe pour des coefficients de traînée C_{WB} calculés uniquement avec des valeurs moyennes (sans prise en compte de l'écart-type). L'enveloppe représente bien le comportement des coefficients de traînée C_{WB} à la Figure 40, exceptés quelques points supérieurs à l'enveloppe.
- $e=1.1$, prise en compte d'une enveloppe pour des coefficients de traînée C_{WB} calculés avec des valeurs moyennes en additionnant un écart-type. Les coefficients de traînée C_{WB} étudiés sur le modèle réduit sont pour la plupart inférieurs à l'enveloppe définie à la Figure 41.
- Il est aussi possible de ne pas considérer d'enveloppe et de s'intéresser à la tendance moyenne des coefficients de trainée $C_{WB}=12.33(b_r/L_M)$, comme visible à la Figure 40 en trait pointillé.

4.4 Râtelier partiel

Le râtelier partiel est composé d'une barre devant un pilier sur deux de l'évacuateur de crue. Les bois flottants s'appuient contre le râtelier et s'avancent également jusqu'aux piliers qui n'ont pas de barre de râtelier devant eux à l'amont. La force issue du volume de bois flottants est donc répartie entre le râtelier et les piliers. La part du volume retenu uniquement au râtelier partiel est *a priori* inconnu.

La Figure 42 montre les coefficients de traînée C_{WB} en fonction l'espacement relatif des barres de râtelier b_r/L_M . Les coefficients de traînée C_{WB} dont les nombres de Froude sont inférieurs à 0.020 sont représentés en transparence. Les petits points ronds en gris représentent les valeurs pour le râtelier complet (uniquement $F_o > 0.020$). La droite avec des petits points représente l'équation moyenne pour le râtelier complet $C_{WB}=12.33(b_r/L_M)$ avec ($R^2=0.865$), et la droite continue l'enveloppe proposée pour le râtelier complet sans prise en compte de l'écart-type ($r=1.0$ et $e=1.0$). Concernant le râtelier partiel (grands symboles), la tendance moyenne est représentée avec une droite en trait tillé serré $C_{WB}=6.15(b_r/L_M)$ avec ($R^2=0.801$) et l'enveloppe proposée ($r=0.5$ et $e=1.0$) par une droite avec des grands traits tillés.

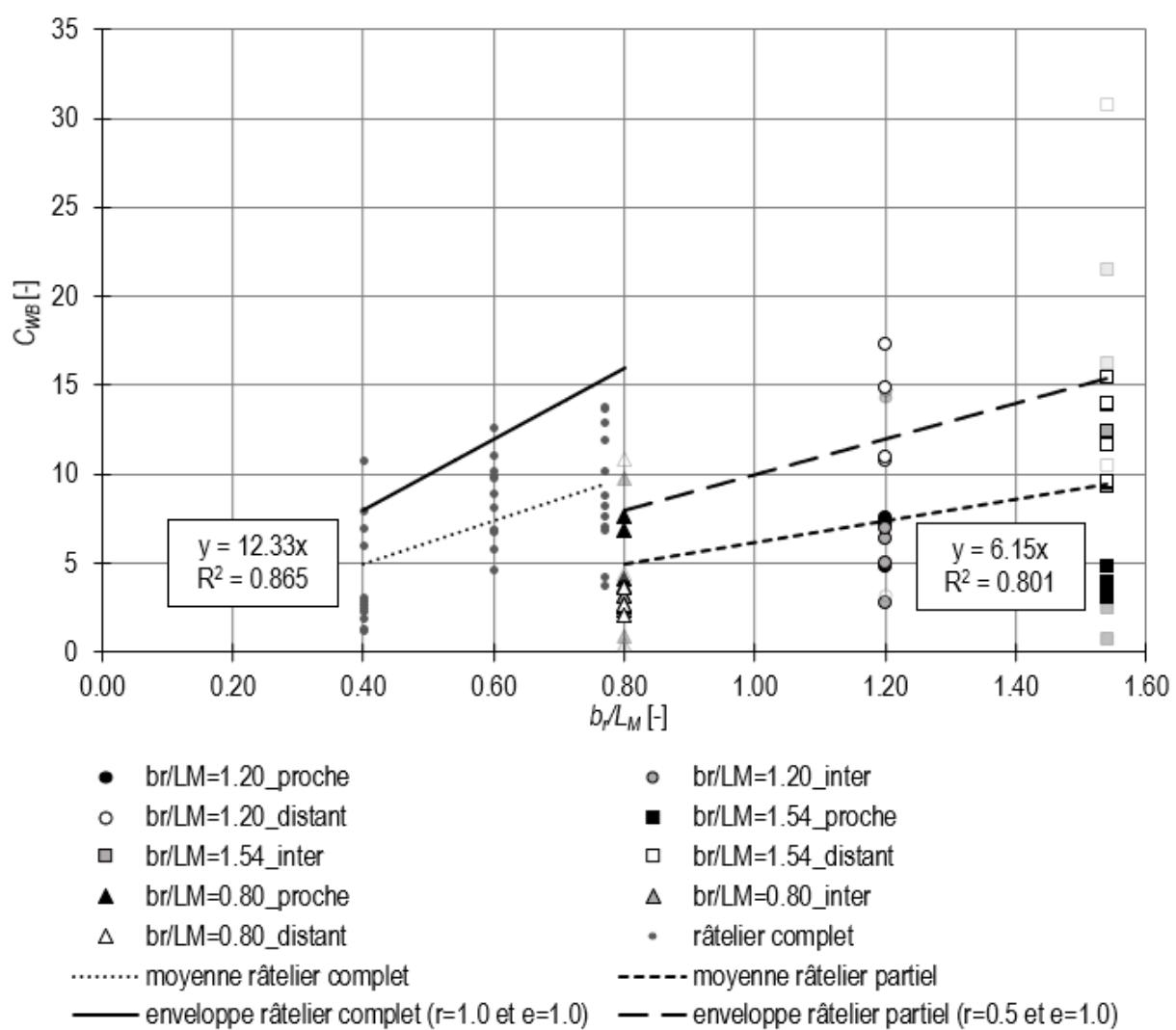


Figure 42. Coefficients de traînée C_{WB} du râtelier complet (petits symboles) et partiel (grand symbole) en fonction de l'espacement relatif des barres de râtelier b_r/L_M .

Il est constaté sur la Figure 42 :

- Les barres d'un râtelier partiel reprennent un effort inférieur que celui d'un râtelier complet. Une partie du volume de bois flottants est appuyée contre les piliers, ce qui explique que le râtelier partiel est moins sollicité.
- Pour $b_r/L_M \geq 0.80$, une diminution (proche d'un facteur 0.5, exprimé de suite par $r=0.5$) de C_{WB} est observée. Une grande différence est visible entre les râteliers complets et partiels. Godtland et Tesaker (1994) recommande une largeur de passes d'au moins 80% de la longueur des plus grands bois flottants présents dans le bassin versant pour limiter un blocage à 10 à 20% du volume de bois flottants. Pour $b_r/L_M \geq 0.80$, les bois flottants s'appuient de plus en plus sur les piliers du déversoir d'où une diminution du coefficient de traînée C_{WB} .
- L'enveloppe proposée pour le râtelier partiel avec $r=0.5$ et $e=1.0$ contient quasiment tous les points mesurés pour $0.8 \leq b_r/L_M \leq 1.54$ (trait discontinu large sur la Figure 42). Il est donc supposé qu'une moitié des efforts sont repris au maximum par le râtelier partiel et l'autre partie par les piliers du déversoir.
- L'équation moyenne $C_{WB}=6.15(b_r/L_M)$ en petits traits discontinus possède un coefficient de détermination de $R^2=0.801$ pour le râtelier partiel.
- Deux points ronds blancs dépassent de manière considérable l'enveloppe proposée pour le râtelier partiel. Il s'agit du test 71 et de son test de répétition 72, avec le débit de dimensionnement ($\chi \approx 1$).

Une analyse identique au râtelier complet peut être effectuée en ajoutant l'écart-type afin de prendre en compte la dispersion des valeurs durant le temps de mesure. La Figure 43 montre le coefficient de traînée C_{WB} basé sur l'addition de la moyenne et de l'écart-type ($\mu+\sigma$) du palier d'essai étudié, toujours en fonction du l'espacement relatif des barres de râtelier b_r/L_M . Comme à la Figure 42, les coefficients de traînée C_{WB} dont les nombres de Froude sont inférieurs à 0.020 sont représentés en transparence. Les petits points ronds en gris représentent les valeurs pour le râtelier complet (uniquement $F_o > 0.02$). La droite en trait plein représente l'enveloppe proposée à la Figure 42 pour le râtelier complet ($r=1.0$ et $e=1.0$) et le trait tillé large l'enveloppe proposée pour le râtelier partiel, également à la Figure 42 ($r=0.5$ et $e=1.0$).

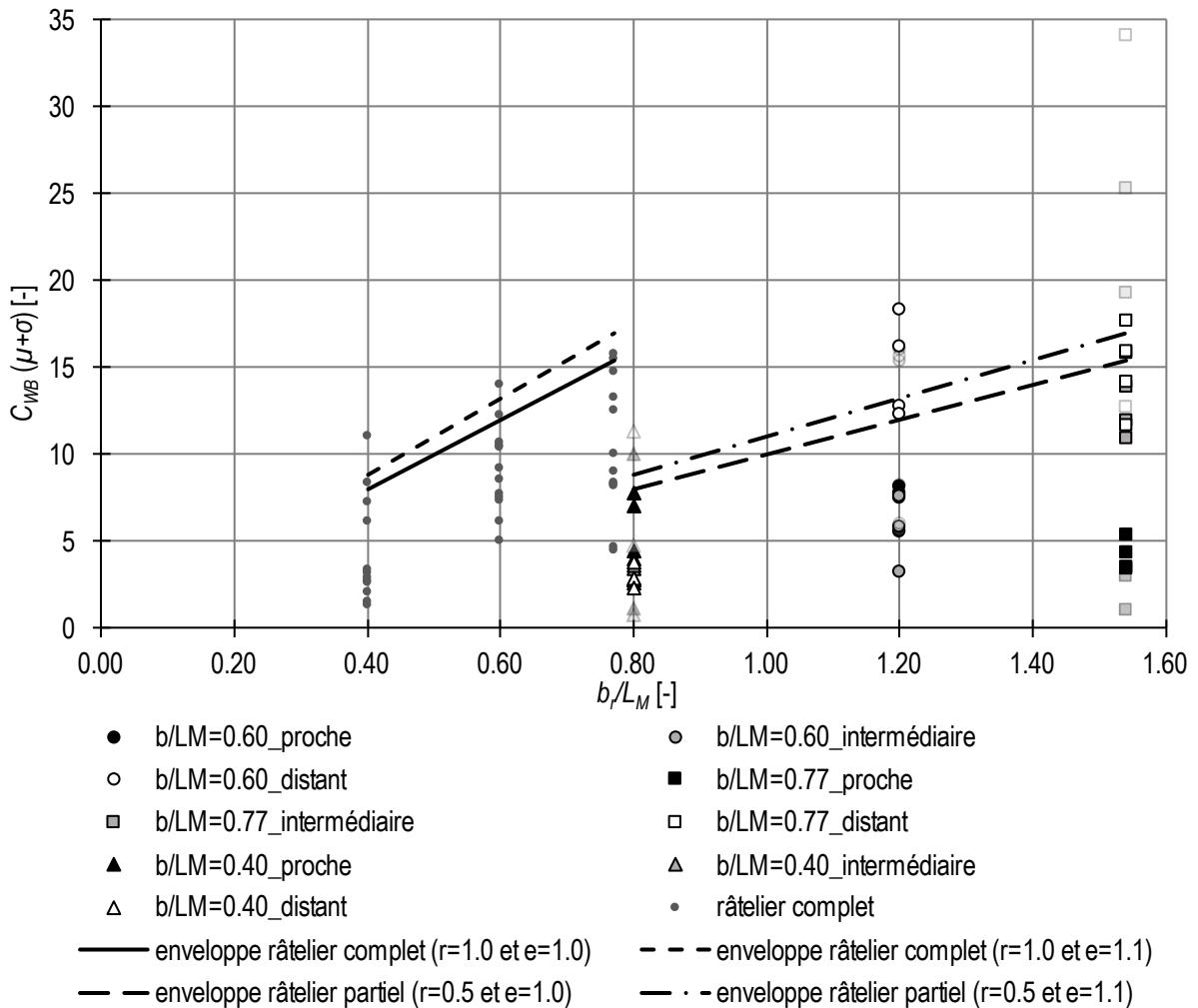


Figure 43. Coefficients de traînée C_{WB} basé sur l'addition de la moyenne et de l'écart-type ($\mu+\sigma$) du râtelier complet (petits symboles) et partiel (grand symbole) en fonction de l'espacement relatif des barres de râtelier b_r/L_M .

La prise en compte de l'écart-type augmente légèrement les coefficients de traînée C_{WB} à la Figure 43. L'enveloppe proposée avec $r=0.5$ et $e=1.1$ englobe quasiment toutes les valeurs pour les coefficients de traînée $C_{WB} (\mu+\sigma)$ pour le râtelier partiel (trait d'axe). L'enveloppe proposée estime les coefficients de traînée C_{WB} pour $0.80 \leq b_r/L_M \leq 1.54$. Pour $b_r/L_M > 1.54$, la tendance n'est pas connue, il serait intéressant de savoir si le comportement du coefficient de trainée C_{WB} est toujours fonction de l'espacement relatif des barres de râtelier b_r/L_M .

4.5 Comparaison avec la littérature

NCHRP (2000) ont étudié la force des blocages de bois flottants contre des piliers de pont (chapitre 1.5). Les données présentées ont été utilisées pour calculer un coefficient de trainée C_{WB} selon la méthode utilisée dans cette étude (équations 19 à 21) :

- Force des bois flottants donnée directement par pilier f_B
- Longueur et diamètre maximaux des bois flottants $L_M=0.61$ m et $D_M = 0.0254$ m
- Vitesse moyenne au pilier de pont U_B
- Espacement des piliers de pont b_r

Il faut souligner les différences entre l'étude de NCHRP (2000) et les essais de ce rapport :

- Dans ce rapport, les piliers ont une forme de tête arrondie (Figure 14) alors que les piliers de NCHRP ont une forme de tête rectangulaire (Figure 5). Les bois flottants ont tendance à mieux se bloquer contre des

piliers à tête rectangulaire, ils disposent de deux points d'appui. Les piliers à tête rondes n'offrent qu'un point d'appui aux bois flottants.

- NCHRP (2000) étudie un écoulement en rivière avec un pont. Dans ce rapport, il est question d'un réservoir avec un déversoir standard disposé à l'aval.
- Le volume de bois flottants n'est pas extrême dans l'étude NCHRP (2000), une quantité plus faible de bois flottants est disposée dans le modèle physique.
- L'espacement des piliers de pont est relativement grand pour le NCHRP (2000). Les bois flottants ne bloquent pas la totalité de la section entre deux piliers de pont (Figure 6). Pour maintenir un blocage, les bois flottants ont été contenus dans une membrane.
- Seule une vitesse moyenne est disponible pour NCHRP (2000), une légère approximation est présente dans le calcul car dans cette étude la vitesse prise en compte est la vitesse à la surface de l'eau au râtelier.

La Figure 44 montre les coefficients de traînée C_{WB} en fonction de l'espacement relatif des barres de râtelier b_r/L_M . Les données de NCHRP (2000) sont représentées par des symboles en forme de losange.

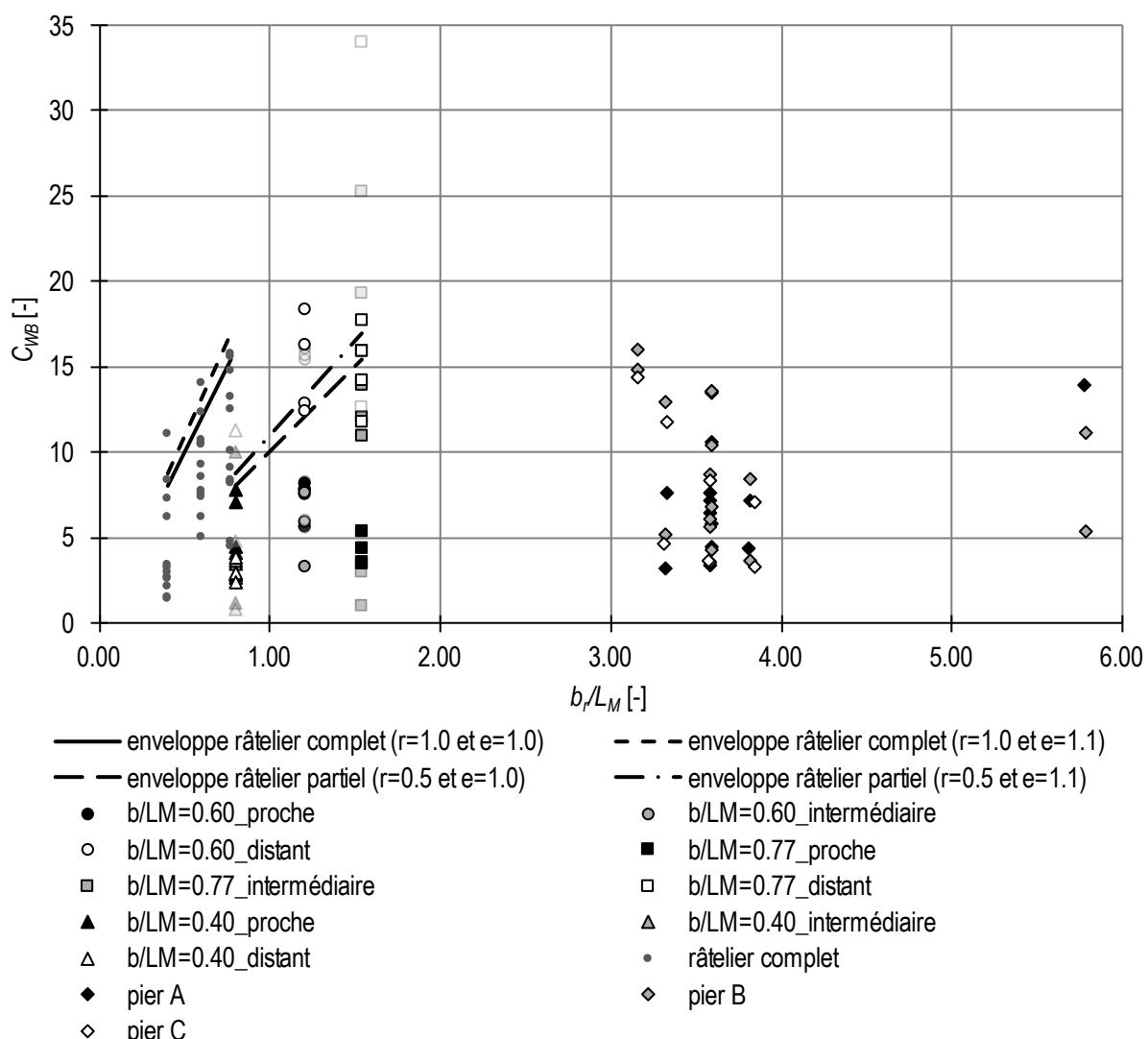


Figure 44. Coefficients de traînée C_{WB} en fonction de l'espacement relatif des barres de râtelier b_r/L_M , comparaison entre les valeurs de NCHRP (2000) en forme de losange et les valeurs des expériences de ce rapport (Figure 5 pour définition de « pier » A à C).

A la Figure 44, l'espacement relatif b_r/L_M est compris entre $3.00 < b_r/L_M < 6.00$ pour NCHRP (2000). Les valeurs NCHRP (2000) ne sont plus fonction de l'espacement relatif b_r/L_M . Les valeurs plafonnent à une constante relativement similaire aux valeurs maximales obtenues par l'enveloppe du râtelier partiel pour $b_r/L_M=1.54$.

Comme déjà mentionné avec le râtelier partiel (chapitre 4.4) pour $b_r/L_M \geq 0.80$, les bois flottants ne s'appuient pas uniquement contre les barres de râtelier mais aussi contre des obstacles (ici dans cette étude les piliers du déversoir) qui sont positionnés en aval. Dans le cadre du NCHRP (2000), les bois flottants sont concentrés contre le pilier de pont et ne remplissent pas l'entièvre de la section entre les piliers. Par conséquent, les coefficients de traînée C_{WB} sont plafonnés à une valeur constante car les bois flottants sont retenus par le pilier dans la zone d'influence du pilier.

5 Recommandation

5.1 Force des bois flottants : Approche développée

L'étude des forces engendrées par des bois flottants retenus sur un râtelier complet (chapitre 4.3) et un râtelier partiel (chapitre 4.4) produit l'expression d'un coefficient de trainée C_{WB} par barre de râtelier prenant en compte l'effet des bois flottants. Le coefficient de trainée C_{WB} est calculé avec les résultats issus de l'étude expérimentale selon l'équation (20). Les expériences ont montré que la vitesse d'approche U_B est comprise de manière adéquate dans ce calcul.

Selon le protocole d'essais, les forces engendrées par des bois flottants ont été mesurées pendant un certain temps de stabilisation. Une certaine variation est enregistrée, propre aux bois flottants. Une valeur moyenne μ (obtenue pendant la durée de la mesure) additionnée d'un écart-type σ (pour prendre en compte la dispersion des valeurs) est utilisée pour le calcul du coefficient de trainée C_{WB} .

Les analyses ont démontré que le coefficient de trainée C_{WB} possède un comportement linéaire en fonction de l'espacement relatif des barres de râtelier b_r/L_M . Le coefficient de trainée recommandé C_{WB} est exprimé en fonction de b_r/L_M selon l'équation (24).

Une différence de comportement du coefficient de trainée C_{WB} entre le râtelier complet et le râtelier partiel est identifiée (chapitre 4.4). La Figure 45 montre les points de mesure pour le râtelier complet avec des symboles ronds et pour le râtelier partiel avec des symboles carrés ($F_o < 0.08$). Les symboles losanges représentent les valeurs de l'étude du NCHRP (2000). Une enveloppe est proposée en trait continu, séparée en trois zones distinctes : (I) avec des facteurs $e=1.1$ et $r=1.0$ pour $b_r/L_M < 0.8$, (II) $e=1.1$ et $r=0.5$ pour $0.8 \leq b_r/L_M \leq 1.54$ et (III) $C_{WB}=17$ pour $b_r/L_M > 1.54$ (Tableau 4).

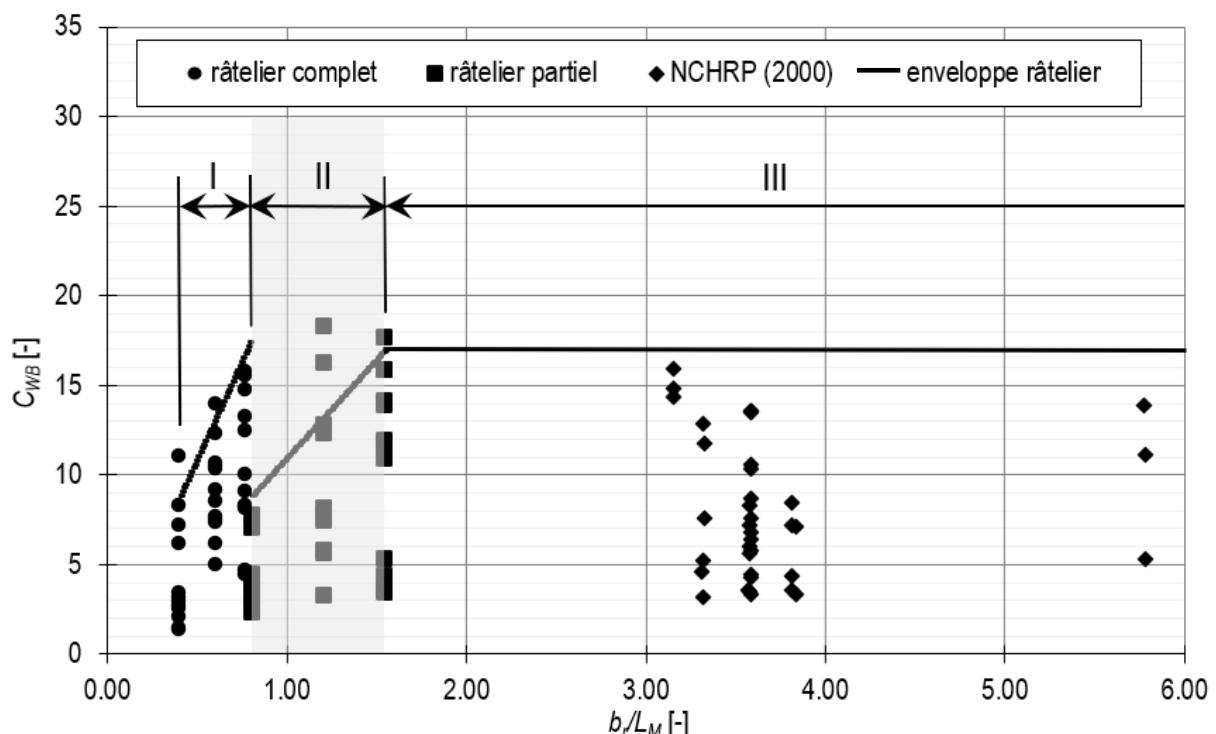


Figure 45. Coefficients de trainée C_{WB} exprimé en fonction de l'espacement relatif des barres de râtelier b_r/L_M , pour le râtelier complet, le râtelier partiel et NCHRP (2000), avec la représentation d'une enveloppe recommandée en trait continu.

Avec l'installation d'un râtelier complet, l'ensemble du volume de bois flottants est bloqué contre les barres du râtelier, alors qu'avec l'installation d'un râtelier partiel, une partie du volume de bois flottants s'avance et s'appuie

contre les piliers du déversoir. La différence entre les deux types de râtelier a lieu à $b_r/L_M \approx 0.80$ sur la Figure 45, de manière semblable au critère de Godtland et Tesaker (1994).

A la Figure 45, trois zones sont définies pour décrire le coefficient de trainée C_{WB} exprimé en fonction de l'espacement relatif des barres de râtelier b_r/L_M avec les paramètres r et e selon le Tableau 4 :

- I. Valable pour $b_r/L_M < 0.80$, l'ensemble du volume de bois flottants est retenu contre le râtelier. Le râtelier est complet. L'enveloppe proposée sous-estime le coefficient de trainée C_{WB} pour des petites valeurs de b_r/L_M .
- II. Valable pour $0.80 \leq b_r/L_M \leq 1.54$, les bois flottants s'appuient en partie contre les piliers du déversoir. L'effort repris par les barres de râtelier est donc plus faible, c'est la situation du râtelier partiel.
- III. Valable pour $b_r/L_M > 1.54$, le comportement du coefficient de trainée C_{WB} est plafonné à une constante et n'est plus fonction de l'espacement relatif des barres de râtelier b_r/L_M .

Tableau 4. Facteurs r et e pour le calcul du coefficient de trainée C_{WB} (équation 24).

Zone	Espaceur relatif du râtelier b_r/L_M	Coefficient de trainée C_{WB}	r	e	
				Enveloppe moyenne μ	Enveloppe moyenne + écart- type $\mu+\sigma$
I.	$0.40 < b_r/L_M < 0.80$	Selon Eq. 24	1.0	1.0	1.1
II.	$0.80 \leq b_r/L_M \leq 1.54$	Selon eq. 24	0.5	1.0	1.1
III.	$b_r/L_M > 1.54$	17			

Les recommandations sont valables dans les conditions limites testées dans cette étude :

- Des débits relatifs compris entre $0.33 \leq \chi \leq 1$ (avec $\chi=1$ le débit de dimensionnement du déversoir)
- Des conditions d'approche type « réservoir » avec une déversoir standard, des nombres de Froude amont inférieurs à $F_o < 0.08$.
- La mise en place d'un râtelier complet avec une barre devant chaque pilier du déversoir (le rapport entre la largeur des barres de râtelier b_r et les troncs les plus longs L_M compris entre $0.40 \leq b_r/L_M \leq 0.77$) ou d'un râtelier partiel avec une barre devant un pilier sur deux du déversoir (le rapport entre l'espacement des barres de râtelier et les troncs les plus longs L_M compris entre $0.80 \leq b_r/L_M \leq 1.54$).
- La position des râteliers a en amont du déversoir exprimée selon le rapport entre la position du râtelier a et la charge de référence H_R compris entre $0.58 \leq a/H_R \leq 7.91$.
- Un volume de bois flottants extrême (hyper-congested) obstruant le râtelier complet de manière totale ou le râtelier partiel avec des bois qui s'avancent jusqu'aux piliers du déversoir.

Pour connaître la force de trainée f_B provoquée par des bois flottants et par barre de râtelier, il faut intégrer le coefficient de trainée recommandé C_{WB} (équation 24) dans l'équation de la force de trainée (équation 20, divisée par n_B), ce qui donne :

$$f_B = 20re \left(\frac{b_r}{L_M} \right) A_B \rho \frac{U_B^2}{2} \quad (25)$$

Où r est un facteur en fonction de l'espacement des barres du râtelier (typiquement similaire au type de râtelier considéré, Tableau 4), e un facteur pour déterminer l'enveloppe choisie (Tableau 4), b_r/L_M l'espacement relatif des barres de râtelier, A_B la surface d'obstruction à la barre de râtelier (équation 21), ρ la masse volumique de l'eau et U_B la vitesse horizontale à la surface de l'eau.

L'équation (25) permet un dimensionnement statique pour les efforts horizontaux avec un blocage extrême de bois flottants de la barre d'un râtelier en amont d'un déversoir standard pour les conditions mentionnées de cette étude. Le libre choix est laissé à l'ingénieur pour le facteur e en fonction de la situation considérée (enveloppe basée sur la moyenne ou enveloppe basée sur la moyenne plus l'écart-type, Tableau 4). L'ingénieur peut aussi se référer à la tendance moyenne des coefficients de trainée C_{WB} (Figure 42).

5.2 Force des bois flottants : Approche pragmatique

Une approche simplifiée est proposée pour déterminer la force provoquée par les bois flottants contre une barre de râtelier, indépendamment de son type (complet ou partiel).

Comme le montre la Figure 46, la très grande majorité des coefficients de trainée C_{WB} est inférieure à une valeur constante $C_{WB}=17$, sans être fonction de l'espacement relatif des barres de râtelier b_i/L_M . Le type de râtelier considéré (partiel ou complet) n'influence pas le coefficient de trainée C_{WB} .

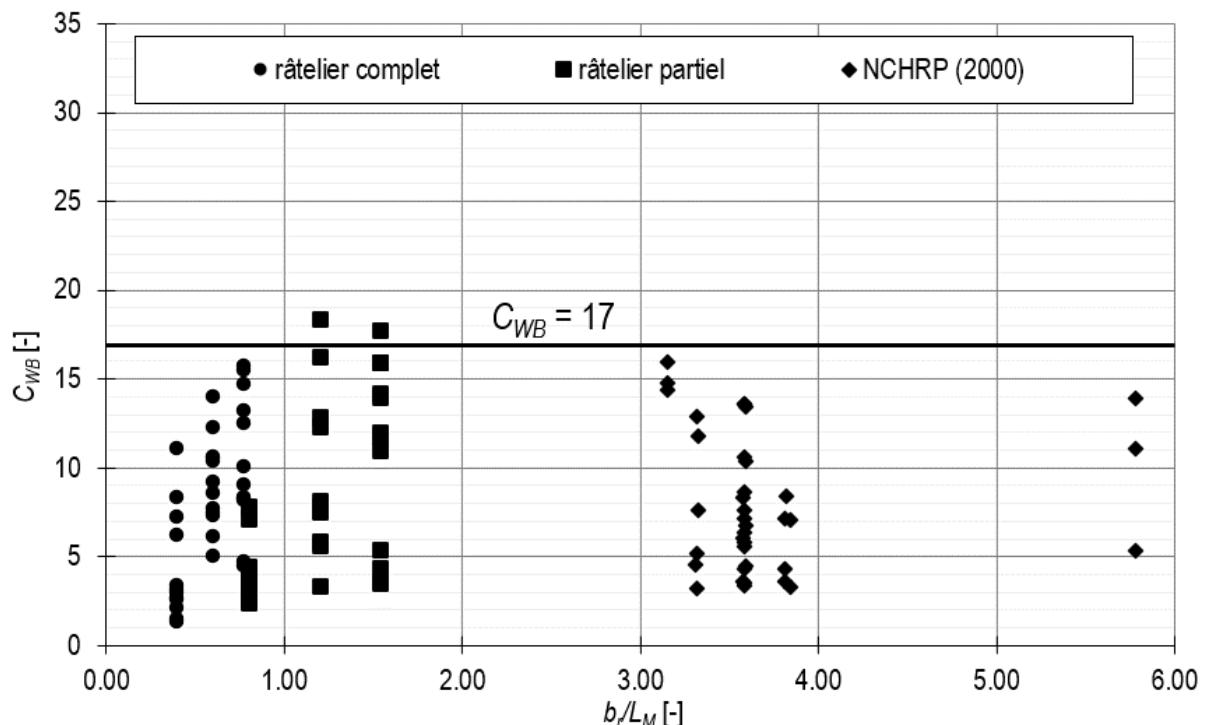


Figure 46. Coefficients de trainée C_{WB} exprimés en fonction de l'espacement relatif des barres de râtelier b_i/L_M , avec une enveloppe constante proposée $C_{WB}=17$.

En considérant une valeur constante pour le coefficient de trainée $C_{WB}=17$, la force de trainée f_B provoquée par des bois flottants par barre de râtelier est :

$$f_B = 17A_B\rho \frac{U_B^2}{2} \quad (26)$$

Où A_B est la surface d'obstruction à la barre de râtelier (équation 21), ρ la masse volumique de l'eau et U_B la vitesse horizontale à la surface de l'eau.

L'approche pragmatique proposée est très sommaire et peut dans certains cas d'études relativement surestimer la force provoquée par des bois flottants contre une barre de râtelier. Le libre choix de l'approche à prendre en compte est laissée à l'ingénieur.

5.3 Force totale

Pour dimensionner une barre de râtelier contre les forces hydrostatiques f_E et les forces des bois flottants f_B , il est recommandé d'appliquer l'équation suivante :

$$f_T = 1.3f_E + f_B \quad (27)$$

Où f_E est la force de l'eau calculée selon Cheng (2013) et f_B la force des bois flottants selon l'équation 25 (approche développée) ou l'équation 26 (approche pragmatique), par barre de râtelier.

La force de l'eau F_E est majorée d'un facteur 1.3 dans l'équation 27, comme constaté à la Figure 28. En effet, il s'est avéré que le calcul théorique des coefficients de trainée C_{WC} selon Cheng (2013) est légèrement sous-estimé pour la configuration modélisée dans cette étude.

6 Faibles quantités de bois flottants

Jusqu'à présent, l'étude s'est concentrée seulement sur un volume de bois flottants « extrêmes ». Afin de comprendre le phénomène avec des plus petites quantités de bois flottants, deux apparitions supplémentaires ont été étudiées, très semblables à celles testées par Pfister et al. (2021). Elles possèdent les caractéristiques suivantes :

1. « sporadic » : 30 troncs individuels sont disposés les uns après les autres dans le canal. Les troncs ont tous la même longueur, plus précisément, la longueur maximale de $L_M=0.433$, identifiée comme la longueur critique. Comme pour le volume de bois flottants, un temps de stabilisation de 20 minutes est laissé après la mise en eau du dernier tronc.
2. « congested » : 6 groupes de 30 troncs sont disposés les uns après les autres dans le canal. Ici, les groupes sont également composés uniquement des troncs de longueurs maximales. Un temps de stabilisation de 20 minutes est également compris à la suite du lancement du dernier groupe.

Les tests ont été réalisés uniquement dans une configuration critique et extrême, comprenant les paramètres suivants :

- Débit de dimensionnement : $\chi \approx 1$,
- Râtelier complet,
- Position proche, selon l'équation (8), et
- Passes étroites de $b/L_M=0.40$.

Les tests ont été répétés deux fois, comme pour la quantité extrême de bois flottants. Le programme de test est disponible avec les résultats à l'annexe 3. Le nombre de troncs qui franchissent le déversoir a été recensé, réciproquement le nombre de troncs bloqués. La fréquence d'enregistrement de la jauge de contrainte a été définie à 10 Hz.

Dans le cadre d'une apparition « sporadic », les observations sur le modèle réduit ont montré que les premiers troncs individuels ont tendance à franchir le déversoir. Lorsqu'un tronc se bloque au râtelier, les troncs suivants se positionnent à l'amont et constituent un tapis de troncs. Un blocage a donc lieu. Les troncs sont appuyés contre le râtelier, l'écoulement au déversoir reste libre de toute obstruction. La Figure 47a illustre un blocage de troncs individuels au râtelier.

Pour une apparition « congested », le premier groupe de tronc se bloque directement contre le râtelier. Quelques troncs arrivent toutefois à franchir le déversoir. Les autres groupes se disposent à l'amont dans le réservoir. Comme pour une apparition « sporadic », l'écoulement au déversoir est libre, l'accumulation se produit au droit du râtelier. La Figure 47b montre un blocage de groupe de troncs contre le râtelier.

La Figure 48a montre dans le temps la force mesurée directement par la jauge de contrainte (les points noirs) et le nombre de troncs bloqués contre le râtelier (trait discontinu) pour une apparition « sporadic » (une répétition). La Figure 48b montre les mêmes éléments, cette fois dans le cadre des deux répétitions de l'apparition « congested ». Les pics de force observés à la fin de chaque phase de stabilisation sont uniquement provoqués par des manipulations de l'opérateur (retrait des bois flottants).



Figure 47. Accumulation de troncs contre le râtelier complet vue depuis l'amont, (a) « sporadic » et (b) « congested ».

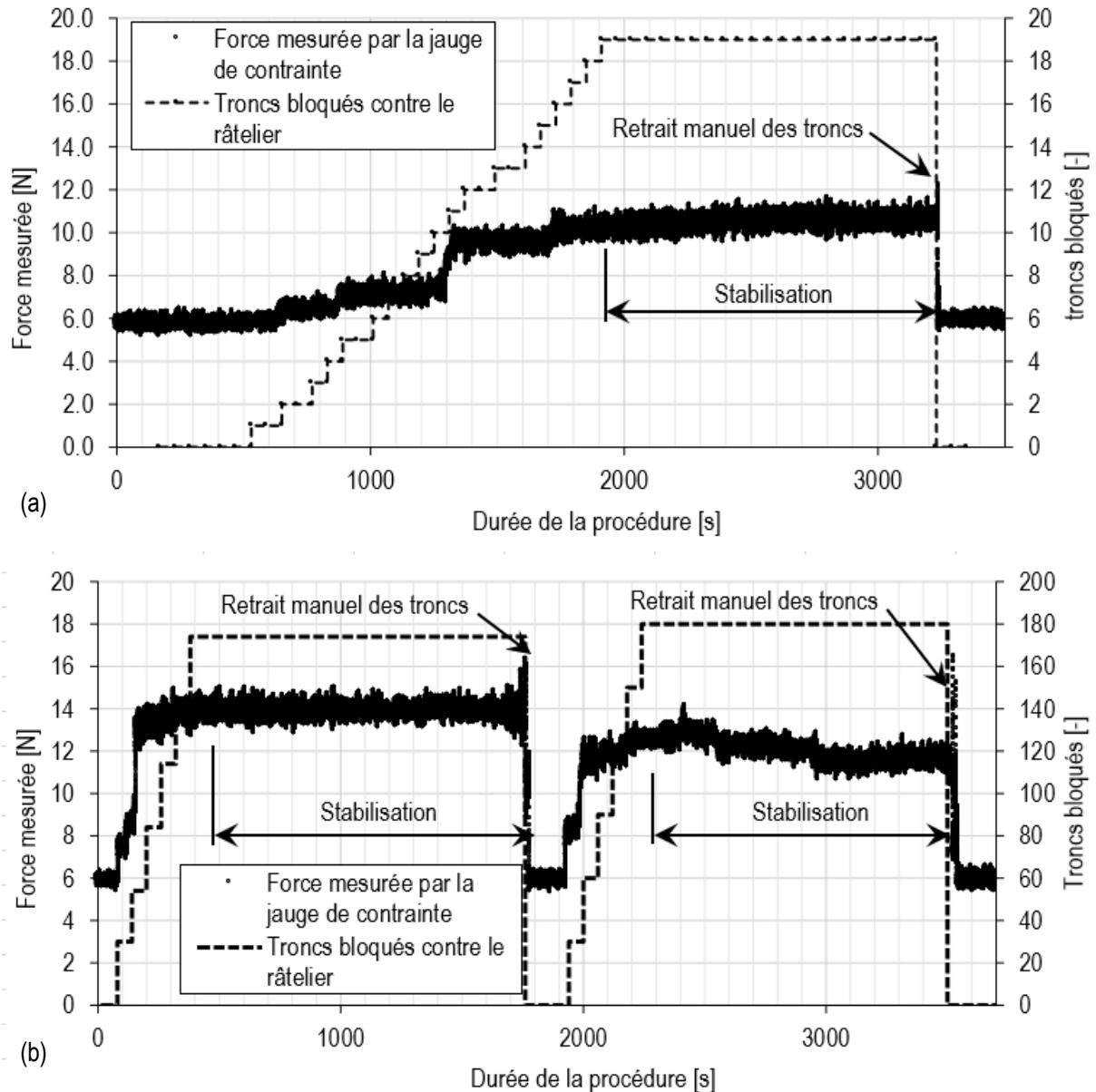


Figure 48. Force mesurée par la jauge de contrainte et débit mesuré en fonction du temps, (a) une répétition « sporadic » et (b) les deux répétitions « congested ».

Il est observé à la Figure 48 que les deux apparitions étudiées ne produisent pas de pics de forces d'impact à l'instant où les troncs percutent les barres de râtelier. La force enregistrée augmente au fur et à mesure de l'accumulation des troncs à l'amont, jusqu'à atteindre une valeur proche d'une constante lors du temps laissé pour la stabilisation. Dans le cadre d'une apparition extrême de bois flottants, appelée aussi « hyper congested », les études ont montré que la force produite par les bois flottants est aussi proche d'une constante (chapitre 4.2). Wüthrich et al. (2020) ont également démontré que l'impact de bois flottants ne produit pas de pics de forces et ont observé une valeur de force proche d'une constante. Les fréquences d'enregistrement de Wuthrich et al. (2020) étaient de 12.5 Hz (ici, 10 Hz).

La Figure 49 montre le coefficient de trainée $C_{WB} (\mu + \sigma)$ avec prise en compte de la valeur moyenne μ et de l'écart-type σ en fonction du rapport V_s/V_c entre le volume spécifique bloqué V_s calculé typiquement selon le nombre de bois flottants bloqués et le volume caractéristique V_c . Le volume caractéristique V_c (déterminant) est calculé selon Schalko (2019) :

$$V_c = 3.1FBH^2 \quad (28)$$

Où B est la largeur du canal (ici $B=1.5$ m), H la charge sur le déversoir et F le nombre de Froude :

$$F = \frac{U_M}{\sqrt{gH}} \quad (29)$$

Où U_M est la vitesse moyenne issue des simulations numériques de Dorthe (2021, sous-chapitre 3.2), g l'accélération gravitationnelle et H la charge sur le déversoir.

Les études de Schalko (2019) sont réalisées dans des conditions hydrodynamiques différentes. C'est pourquoi, l'équation est adaptée (hypothèse), comme s'il s'agissait d'un canal avec une hauteur d'écoulement d'eau correspondant à la charge sur le déversoir H . L'équation est valable pour des nombres de Froude $0.3 < F < 1.5$. Ici, les nombres de Froude sont légèrement inférieurs à $F < 0.3$.

L'apparition « sporadic » est définie avec des symboles ronds, l'apparition « congested » avec des symboles carrés. L'apparition « hyper-congested » avec des symboles triangles fait référence aux tests 41 et 42 qui se sont déroulés avec les mêmes paramètres pour les volumes de bois flottants extrêmes. Les valeurs des deux répétitions sont mentionnées.

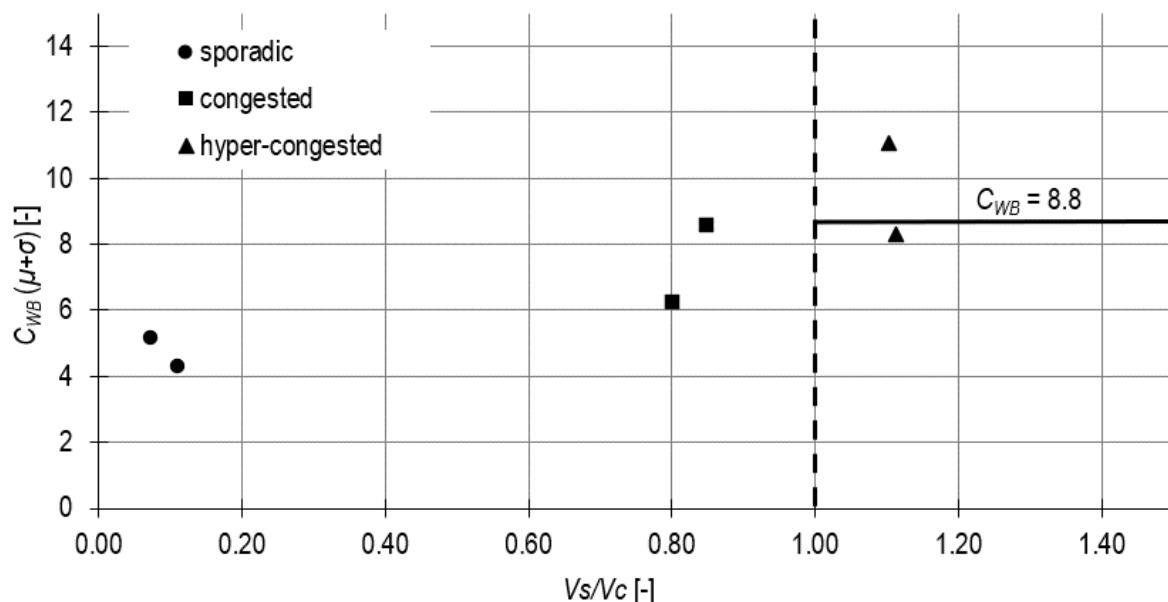


Figure 49. Coefficient de trainée C_{WB} ($\mu+\sigma$) avec prise en compte de la valeur moyenne μ et de l'écart-type σ en fonction du rapport V_s/V_c entre le volume spécifique bloqué V_s et le volume caractéristique V_c .

Le coefficient de trainée C_{WB} augmente en fonction du rapport V_s/V_c (entre le volume spécifique bloqué V_s et le volume caractéristique V_c), jusqu'à atteindre une valeur de palier pour $V_s/V_c > 1$ (Figure 49). Dans le cadre d'une quantité extrême de bois flottants retenus contre le râtelier ($V_s/V_c > 1$), le coefficient de trainée C_{WB} devient constant et les recommandations du chapitre 5 qui proposent aux ingénieurs praticiens une enveloppe pour les coefficients de trainée C_{WB} pour des quantités extrêmes de bois flottants retenues contre les râteliers s'appliquent.

L'étude de diverses apparitions de bois flottants sous les conditions limites décrites précédemment a montré les aspects suivants :

- L'impact de troncs contre le râtelier ne produit de pics de forces. Aucune observation dans ce sens n'a été recensée dans les conditions limites des tests.
- Le coefficient de trainée C_{WB} augmente en fonction rapport V_s/V_c entre le volume spécifique bloqué V_s et le volume caractéristique V_c jusqu'à atteindre une valeur constante pour $V_s/V_c \approx 1$. Les accumulations supplémentaires de bois flottants à l'amont ne produisent donc pas de supplément de force.
- Pour des volumes extrêmes de bois flottants retenus $V_s/V_c > 1$, le coefficient de trainée C_{WB} peut être défini selon les recommandations du chapitre 5.

7 Limite et perspective

L'étude proposée se concentre sur une accumulation extrême de bois flottants (obstruction) contre un râtelier de protection positionné en amont d'un évacuateur de crue d'un barrage. Les gammes testées des paramètres-clés sont :

- Des débits relatifs compris entre $0.33 \leq \chi \leq 1$ (avec $\chi=1$ le débit de dimensionnement du déversoir).
- Des conditions d'approche type « réservoir » avec un déversoir standard, des nombres de Froude amont inférieurs à $F_o < 0.08$.
- La mise en place d'un râtelier complet avec une barre devant chaque pilier du déversoir (le rapport entre l'espacement des barres de râtelier b_r et les troncs les plus longs L_M compris entre $0.40 \leq b_r/L_M \leq 0.77$)
- La mise en place d'un râtelier partiel avec une barre devant un pilier sur deux du déversoir ((le rapport entre l'espacement des barres de râtelier b_r et les troncs les plus longs L_M compris entre $0.80 \leq b_r/L_M \leq 1.54$).
- La position des râteliers a en amont du déversoir exprimée selon le rapport entre la position du râtelier a et la charge de référence H_R compris entre $0.58 \leq a/H_R \leq 7.91$.
- Un volume de bois flottants extrême (hyper-congested) obstruant le râtelier complet de manière totale ou le râtelier partiel avec des bois qui s'avancent jusqu'aux piliers du déversoir.

Si les conditions type « réservoir » sont à présent bien documentées pour l'estimation des forces sur les râteliers de protection obstrués par des bois flottants dans le cadre extrême en termes de débits, de volume de bois flottants et de largeurs des passes du déversoir, les connaissances pour les conditions type « canal » sont encore à approfondir.

Dans les conditions type « réservoir », il est possible d'exprimer linéairement le coefficient de trainée en fonction d'un espacement relatif des barres de râtelier. La vitesse d'approche est correctement comprise dans l'expression du coefficient de trainée. Ainsi, le nombre de Froude amont et le débit n'ont pas d'effet dominant. Cependant, dans les conditions type « canal », les vitesses d'approche seront plus grandes et par conséquent les nombres de Froude amont augmenteront. Il n'est aucunement certain alors que la vitesse d'approche soit correctement comprise dans la normalisation du coefficient de trainée.

Il apparaît nécessaire et fort intéressant de réaliser une étude avec la même gamme de variations des paramètres-clés avec les conditions type « canal ». Les râteliers de protection se trouvent aussi dans des cours d'eau et peuvent être exposés à des obstructions de bois flottants. Avec la connaissance à la fois des conditions « réservoir » et « canal », ce sera une grande avancée pour les ingénieurs praticiens en charge du dimensionnement de ce type de structures.

8 Conclusions

8.1 Contexte

Les bois flottants doivent faire l'objet d'une attention particulière à proximité des ouvrages hydrauliques comme les barrages lors des événements extrêmes. Des obstructions peuvent avoir lieu aux évacuateurs de crue et compromettre le fonctionnement hydraulique et dans le pire des cas, la sécurité des ouvrages. Si les bois flottants représentent un potentiel danger, ils sont aussi d'une grande importance pour les espèces alluviales.

L'étude proposée s'inscrit comme le prolongement de deux précédentes recherches réalisées sur le même modèle réduit. La première étape a défini la surélévation du niveau d'eau du réservoir à la suite d'une obstruction de bois flottants d'un évacuateur de crue avec un ciblage sur les conditions extrêmes. Des mesures constructions ont été proposées et testées pour réduire (ou éliminer) la surélévation. Les mesures constructives ont permis de conserver une grande efficacité hydraulique.

La deuxième étape a intégré l'importance écologique des bois flottants dans les cours d'eau, en continuant de limiter la surélévation pour des raisons sécuritaires. Un râtelier partiel a été développé et installé en amont de l'évacuateur de crue dans le but de diriger les bois flottants dans le sens de l'écoulement. Après une longue série d'essais et de nombreux paramètres étudiés, il est apparu que le râtelier partiel augmente le passage des bois flottants lorsqu'une petite quantité de troncs individuels est présente et pour une certaine position en amont de l'évacuateur de crue du râtelier partiel. La mise en place de deux mesures constructives (râtelier partiel et prolongation de la tête des piliers dans le réservoir) a également été étudiée et est efficace pour conserver un fonctionnement hydraulique adéquat selon certaines conditions testées.

La troisième étape décrite dans ce présent rapport s'intéresse aux forces provoquées par les bois flottants contre les râteliers complets ou partiels en amont d'un évacuateur de crue. L'efficacité de cette mesure constructive a été prouvée lors des phases d'études précédentes. Un système pour mesurer les forces en présence est installé sur le même modèle réduit. L'étude se concentre sur des événements extrêmes que ce soit en termes d'arrivée de bois flottants, de débit et de largeurs étroites des ouvertures de l'évacuateur de crue. Une analyse des données est disponible et une recommandation pour l'estimation des forces provoquées par le blocage des bois flottants est proposée aux ingénieurs praticiens.

La littérature scientifique est très vaste sur les bois flottants. Les processus de production des bois flottants jusqu'à leurs problématiques d'obstruction aux ouvrages sont décrits. Des études sur les forces contre les ouvrages sont également disponibles. Quelques auteurs mettent en avant des éléments intéressants. Gippel et al. (1996) expriment un coefficient de trainée des bois flottants en fonction de l'orientation des bois flottants par rapport au sens de l'écoulement., un coefficient de trainée qui varie également en fonction de la profondeur d'eau relative. Wüthrich et al. (2020) ont observé que les forces hydrodynamiques provoquées par des bois flottants dans le cadre d'un tsunami contre des ouvrages engendrent un facteur deux (en comparaison d'une situation d'eau pure). Lors de l'impact des bois flottants, aucun pic n'a été observé. Haehnel et Daly (2004) expriment la force maximale de manière linéaire en fonction de la masse de bois flottants et de la vitesse. L'orientation des troncs par rapport au sens de l'écoulement influence la force maximale.

Aucune littérature n'est disponible sur les forces contre les râteliers, avec des conditions extrêmes. Les études se concentrent principalement sur des piles de pont en rivières et de faibles quantités de bois flottants. Le besoin de recherche pour des conditions extrêmes est donc nécessaire pour connaître le phénomène sur un râtelier de protection en amont d'un évacuateur de crue d'un barrage.

8.2 Modèle physique

Un canal droit et horizontal de 10 m de long, 1.50 m de large et 0.70 de haut qui se situe au PL-LCH de l'EPFL est utilisé. Un déversoir standard se trouve à l'extrémité en aval du canal. Le modèle réduit offre beaucoup de possibilités de configurations, ce qui permet de réaliser des conditions variées pour les essais.

Des volumes extrêmes de bois flottants sont mis en place dans le modèle réduit. La longueur et le diamètre des troncs sont typiques des situations *in situ* lors des crues selon les relevés de Rickli et Hess (2009), avec un rapport entre longueur et diamètre $L/D=20$. La longueur des troncs est comprise entre 0.100 et 0.433 m. La taille du volume de bois flottants est de 2'840 pièces.

Un système de mesure représentant un râtelier complet ou partiel a été disposé en amont du déversoir. Les barres de râteliers sont connectées à un axe de rotation qui est lui-même attaché à un bras de levier. Une jauge de contrainte à l'extrémité du bras de levier enregistre les forces produites dans le modèle réduit à la fréquence choisie. Le système de mesure offre une grande flexibilité dans le positionnement en amont du déversoir et des barres de râteliers. Des poids calibrés sont disposés pour vérifier la jauge de contrainte. Son fonctionnement est considéré comme précis à la vue de la relative proximité des mesures.

La courbe de tarage du déversoir a été validée. Les valeurs calculées selon Vischer et Hager (1999) sont comparées avec des points de mesure (fonctionnement avec de l'eau sans bois flottants). Comme les valeurs sont proches, le fonctionnement du modèle est donc jugé correct.

Plusieurs paramètres susceptibles d'influencer les forces contre les ouvrages ont fait l'objet d'une variation systématique afin d'analyser leurs effets :

- Trois charges $H=0.05$ m, 0.10 m, et 0.15 m, réciproquement trois débits.
- Trois largeurs de passe, les rapports b/L_M qui en découlent sont ($L_M=0.433$ m) $b/L_M=0.40$, $b/L_M=0.60$ et $b/L_M=0.77$.
- Trois positions a de râteliers en amont du déversoir : étant proche, intermédiaire et distant. Elles sont définies en fonction de la largeur b des passes et partiellement de la longueur des troncs les plus longs L_M .
- Deux types de râteliers : « complet », c'est-à-dire tous les piliers du déversoir sont protégés en amont par une barre de râtelier et « partiel », composé seulement d'une barre présente un pilier sur deux.

Chaque test a été répété une deuxième fois. Le système de mesure est fiable et les mesures de force ont lieu sur un grand laps de temps en prenant en compte un temps de stabilisation. Cependant, le comportement des bois flottants reste aléatoire. En total, 54 combinaisons de paramètres ont été étudiées, résultant avec les répétitions de 108 tests effectués. La quantité de mesures réduit le risque aléatoire.

8.3 Force hydrodynamique

Le système de mesure de force a d'abord fonctionné avec de l'eau uniquement pour valider son fonctionnement. Une simulation numérique sur Flow3D par Dorthe (2021) donne les vitesses d'approche au déversoir lesquelles sont utilisées afin de déterminer les forces de trainée F_E et coefficients de trainée C_{WE} (eau seule). Les vitesses d'approche numériques sont comparées par des mesures sur le modèle réduit avec un flow tracker afin de s'assurer du bon ordre de grandeur des valeurs.

Un coefficient de trainée C_{WE} théorique est calculé sur la base de Cheng (2013). Un moment calculé est défini sur la base des données théoriques. Les valeurs de forces hydrodynamiques mesurées sur le modèle réduit permettent d'obtenir un moment mesuré. La corrélation entre les moments calculés et les moments mesurés a montré une différence systématique de presque 30% pour un coefficient de détermination de $R^2=0.91$. Un certain écart entre les valeurs est attendu et *a priori* normal, sans explication supplémentaire précise.

La comparaison entre les coefficients de trainée C_{WE} théoriques et mesurés aboutit sur une corrélation difficile. Il faut toutefois souligner que la précision de la mesure influence les résultats car les forces en jeu sont petites, que les barres de râtelier sont situées dans un champ vitesse influencé par le déversoir à l'aval, que la corrélation des données du NCHRP (2000) est également délicate et que l'étude se concentre sur les forces produites par les bois flottants qui sont en moyenne quatre fois plus importantes que les forces hydrodynamiques. En prenant en compte les diverses sources d'écart, le fonctionnement du système de mesure de force est correct et la méthode de calcul validée.

8.4 Force avec des bois flottants

Le comportement des bois flottants dans le modèle physique montre des aspects intéressants :

- La forme du tapis formé par les bois flottants à l'amont dans le réservoir varie avec l'augmentation du débit. Le tapis a une tendance à se compacter avec les plus grands débits (Bénet et al. 2021).
- Une plus grande quantité de bois flottants franchissent le déversoir pour des passes larges ($b/L_M=0.77$) et le râtelier partiel (Bénet et al. 2022). Le volume de bois flottants est toujours repositionné à l'aval afin de maintenir la même quantité de bois flottants pour le blocage.
- Les bois flottants restent bloqués contre les barres de râtelier avec le râtelier complet.
- Les bois flottants s'avancent jusqu'à s'appuyer contre les piliers du déversoir avec le râtelier partiel.

Les données de mesure de la force sont relativement constantes dans le temps pour une configuration testée (aucun pic initial d'impact n'a été enregistré). La présence de bois flottants engendre une dispersion plus importante des valeurs que la présence de l'eau uniquement. Voilà pourquoi, il a été décidé de travailler avec une valeur moyenne et un écart-type pour chaque test effectué.

Comme la jauge de contrainte du système de mesure de force est située sur un bras de levier extérieur, il nécessite d'appliquer un facteur de correction entre les bras de levier pour connaître la force directement appliquée contre les barres de râtelier. Pour déterminer la force des bois flottants, il faut soustraire à la force enregistrée le poids propre du système de mesure et la force hydrodynamique de l'eau seule. Pour connaître la force appliquée à une seule barre de râtelier par les bois flottants, il faut diviser la force totale par le nombre de barres de râtelier.

Le calcul du coefficient de trainée des bois flottants C_{WB} par barre de râtelier est obtenu en divisant la force appliquée à une seule barre de râtelier par la masse volumique de l'eau ρ , la vitesse à la surface de l'eau à la barre de râtelier U_B (Dorthe, 2021) et A_B une surface d'obstruction des bois flottants définie avec l'hypothèse d'un blocage d'une épaisseur d'une seule couche avec un tronc de diamètre maximal D_M et d'une largeur de l'espacement des barres de râtelier b_r si $b_r \leq L_M$ ou de la longueur maximale des troncs L_M si $b_r > L_M$.

8.4.1 Râtelier complet

La gamme testée du débit normalisé est de $0.33 \leq \chi \leq 1$:

- La force mesurée au râtelier et la force par barre de râtelier augmentent en fonction du débit relatif χ (la vitesse d'approche augmente en fonction du débit).
- Les râteliers proches montrent des forces mesurées au râtelier et par barre plus élevées que les râteliers intermédiaires et distants (la vitesse d'approche augmente en se rapprochant du déversoir).
- Les passes larges $b/L_M=0.77$ ont généralement supporté un effort plus important que les passes plus étroites (les passes larges ont une portée plus large et donc ont plus d'efforts à reprendre).
- Le coefficient de trainée C_{WB} s'approche d'une constante en fonction du débit relatif χ . La vitesse d'approche est donc apparemment correctement comprise dans le calcul de C_{WB} . Une influence de la largeur des passes reste visible, les passes larges présentent un coefficient de trainée C_{WB} moyen plus élevé que les passes plus étroites.

La gamme testée de la largeur relative des passes est de $0.4 \leq b/L_M \leq 0.77$:

- La force mesurée au râtelier des bois flottants n'est pas fonction du rapport de la largeur des passes b/L_M . Cependant, les râteliers complets proches ont enregistré les plus grandes valeurs indépendamment de la largeur des passes (influence de la vitesse d'approche).
- Une relation est observée entre la force par barre de râtelier et la largeur des passes. La force augmente en fonction du rapport de la largeur des passes b/L_M (les passes larges ont une portée plus large et donc ont plus d'efforts à reprendre). Encore une fois, l'influence de la vitesse d'approche est visible, le râtelier proche a montré les plus grandes valeurs.
- Le coefficient de trainée C_{WB} est une claire relation avec le rapport de largeur des passes b/L_M . Ce sont les passes les plus larges ($b/L_M=0.77$) qui montrent les plus grands coefficients de trainée C_{WB} .

La gamme testée de l'avancement relatif du râtelier est de $0.58 \leq a/H_R \leq 7.91$, H_R étant la charge de référence définie sans bois flottants et à l'avancement du râtelier par rapport au front vertical du déversoir :

- La force mesurée par le râtelier est une fonction quadratique du rapport a/H_R . Pour $a/H_R < 3$, la force mesurée est relativement « grande ». Pour $a/H_R \geq 3$, la force mesurée est comparablement faible (presque zéro) et reste constante.
- Le constat est identique pour la force mesurée par barre de râtelier.
- Le coefficient de trainée C_{WB} varie autour d'une valeur constante et n'est conséquemment pas fonction de a/H_R (la vitesse d'approche est comprise dans la normalisation).

La gamme testée du nombre de Froude amont est de $0.012 \leq F_o \leq 0.085$, défini dans le canal en amont du déversoir :

- Les forces mesurées au râtelier ont tendance à augmenter en fonction de F_o (influence de la vitesse d'approche). Le constat est identique pour la force mesurée par barre de râtelier.
- Le coefficient de trainée C_{WB} est constant ou diminue légèrement en fonction de F_o . Pour $F_o > 0.02$, le coefficient de trainée C_{WB} a une valeur maximale proche de 15 et reste constant avec l'augmentation de F_o . Les passes larges ($b/L_M = 0.77$) donnent les plus grands coefficients de trainée C_{WB} .
- Pour $F_o \leq 0.02$ les valeurs de C_{WB} ne sont pas fiables, car la précision de mesure est limitée pour les petites valeurs (C_{WB} est divisé par des petites valeurs).
- Le nombre de Froude amont peut ainsi être utilisé pour déterminer un seuil à partir duquel les mesures réalisées sont cohérentes, c'est-à-dire $F_o > 0.02$.

La force appliquée par un volume extrême de bois flottants contre une barre de râtelier complet peut être normalisée par un coefficient de traînée C_{WB} . Dans l'analyse des paramètres-clés étudiés, le rapport de largeur des passes b/L_M influence le coefficient de traînée C_{WB} dans lequel la vitesse d'approche est correctement comprise. Il n'y a pas de besoin supplémentaire de prendre en compte le débit, la position du râtelier et le nombre de Froude amont.

Une relation linéaire entre l'espacement relatif des barres de râtelier b_r/L_M (rapport entre l'espacement des barres de râtelier et la longueur maximale des bois flottants) et le coefficient de traînée C_{WB} apparaît. Il en ressort qu'en moyenne $C_{WB} = 12.33(b_r/L_M)$ avec $R^2 = 0.865$. Une enveloppe englobant une très grande majorité des coefficients de traînée C_{WB} est également définie comme $C_{WB} = 20(b_r/L_M)$. La limite d'application est de $0.40 \leq b_r/L_M \leq 0.77$.

La mesure de la force provoquée par des bois flottants est soumise à des variations. Pour prendre en compte ce phénomène, il est proposé d'ajouter l'écart-type à la valeur moyenne de la force considérée. Cette prise en considération a pour conséquence d'augmenter légèrement les coefficients de traînée C_{WB} ($\mu + \sigma$) en fonction l'espacement relatif des barres de râtelier b_r/L_M . Il est proposé de modifier l'équation de l'enveloppe des coefficients de traînée $C_{WB} = 20e(b_r/L_M)$, avec e un facteur d'enveloppe (ici $e = 1.1$).

8.4.2 Râtelier partiel

Avec la mise en place d'un râtelier partiel en amont d'un évacuateur de crue, les bois flottants ne sont plus retenus seulement au râtelier, mais ils peuvent aussi s'appuyer contre les piliers de l'évacuateur de crue. La force appliquée par les bois flottants contre les barres de râtelier est donc plus faible que pour le râtelier complet, car une partie est reprise par les piliers à l'évacuateur de crue. Par conséquent, le coefficient de traînée C_{WB} est en comparaison également réduit.

Pour une limite d'application de $0.80 \leq b_r/L_M \leq 1.54$, le coefficient de traînée C_{WB} vaut en moyenne $C_{WB} = 6.15(b_r/L_M)$ avec $R^2 = 0.801$. Pour déterminer une enveloppe, il suffit d'ajouter à l'équation de l'enveloppe du râtelier complet un facteur de râtelier r , ce qui donne $C_{WB} = 20re(b_r/L_M)$, avec ici $r = 0.5$ pour le râtelier partiel ($r = 1.0$ pour le râtelier complet) et $e = 1.0$ pour la prise en compte des valeurs mesurées calculées sur la base de la moyenne uniquement.

Une réflexion analogue au râtelier complet peut être faite avec la prise en compte de l'écart-type en raison des variations dans la mesure de la force pour le râtelier partiel. L'équation de l'enveloppe reste identique, $C_{WB} = 20re(b_r/L_M)$, avec cette fois $r = 0.5$ et $e = 1.1$.

8.4.3 Prise en compte des valeurs de la littérature

NCHRP (2000) ont mesuré des forces de blocage de bois flottants contre des piliers de pont dans un écoulement en rivière. Les quantités de bois flottants n'étaient pas extrêmes comme dans cette étude et les dimensions différentes. Les conditions hydrodynamiques d'approche étaient également différentes. Cependant, afin de comparer les données, les valeurs de NCHRP (2000) ont été reprises et calculées selon la procédure de cette étude.

L'espacement relatif des barres de râtelier est compris entre $3.15 \leq b_r/L_M \leq 5.78$. Dans cette gamme de valeurs, le coefficient de trainée C_{WB} n'est plus fonction de l'espacement relatif b_r/L_M , son comportement est proche d'une constante. En effet, seuls les bois flottants appuyés contre la barre de râtelier ou le pilier et situés dans la zone d'influence de l'obstacle (barres ou piliers) contribuent à produire une force. Une enveloppe du coefficient de trainée $C_{WB}=17$ englobe toutes les données dans les limites appliquées.

8.5 Recommandation

8.5.1 Approche développée : Force des bois flottants

L'expression des forces engendrées par des bois flottants retenus sur un râtelier complet ou un râtelier partiel peut être exprimée sous la forme adimensionnelle d'un coefficient de trainée C_{WB} par barre de râtelier. Les résultats de l'étude expérimentale ont montré que le coefficient de trainée C_{WB} a un comportement linéaire en fonction de l'espacement relatif des barres de râtelier b_r/L_M . Les analyses montrent que la vitesse d'approche est comprise de manière correcte dans le coefficient de trainée C_{WB} . Lors des expériences, la force mesurée a montré une certaine variation de valeurs qui peut être considérée en ajoutant l'écart-type à la force moyenne mesurée.

Comme déjà mentionné auparavant, la relation du coefficient de trainée C_{WB} est la suivante $C_{WB}=20re(b_r/L_M)$. Trois zones peuvent être définies pour déterminer le coefficient de trainée C_{WB} :

- I. $0.40 \leq b_r/L_M < 0.80$, l'ensemble du volume de bois flottants est retenu contre le râtelier, le facteur de râtelier $r=1.00$. Le facteur d'enveloppe e est égale $e=1.0$ pour C_{WB} basé sur la moyenne mesurée et $e=1.1$ pour C_{WB} basé sur la moyenne et l'écart-type ($\sigma+\mu$).
- II. $0.80 \leq b_r/L_M \leq 1.54$, les bois flottants s'appuient en partie contre les piliers du déversoir, le facteur de râtelier $r=0.5$. Le facteur d'enveloppe e est égale $e=1.0$ pour C_{WB} basé sur la moyenne mesurée et $e=1.1$ pour C_{WB} basé sur la moyenne et l'écart-type ($\sigma+\mu$).
- III. $b_r/L_M > 1.54$, le comportement du coefficient de trainée C_{WB} est plafonné à une constante $C_{WB}=17$ et n'est plus fonction de l'espacement relatif des barres de râtelier b_r/L_M .

La force appliquée par des bois flottants contre une barre de râtelier en amont d'un évacuateur de crue devient alors $F_B=20re(b_r/L_M)A_B\rho(U_B/2)^2$, avec ρ la masse volumique de l'eau, U_B la vitesse à la surface de l'eau à la barre de râtelier et A_B une surface d'obstruction définie avec l'hypothèse d'un blocage d'une épaisseur d'une seule couche avec un tronc de diamètre maximal D_M et d'une largeur de l'espacement des barres de râtelier b_r si $b_r \leq L_M$ ou de la longueur maximale des troncs L_M si $b_r > L_M$.

8.5.2 Approche pragmatique : Force des bois flottants

Dans le cadre d'un prédimensionnement sommaire, une valeur constante $C_{WB}=17$ pour le coefficient de trainée peut être admise. En effet, indépendamment du type de râtelier considéré et donc de l'espacement relatif des barres de râtelier b_r/L_M , les coefficients de trainée C_{WB} sont pour une très grande majorité inférieure à $C_{WB} \leq 17$.

La force de blocage de bois flottants F_B devient alors $F_B=17A_B\rho(U_B/2)^2$, avec la définition des paramètres similaire à l'approche développée. Cette approche peut dans certains cas d'études relativement surestimer la force produite par un blocage de bois flottants.

8.5.3 Force totale à considérer

La force totale que doit reprendre une barre de râtelier soumise à une présence d'un volume extrême de bois flottants comprend non seulement la force des bois flottants F_B mais aussi la force hydrodynamique de l'eau seule F_E . Les analyses de la force hydrodynamique dans un régime d'écoulement influencé à l'aval par un déversoir ont montré un décalage avec les valeurs théoriques qui est constant et supérieur de 30%. Voilà pourquoi, il est recommandé d'appliquer un facteur 1.3 pour la force hydrodynamique. La force totale F_T est donc obtenue avec $F_T=1.3F_E+F_B$.

8.5.4 Faibles quantités de bois flottants

Deux apparitions de bois flottants ont été étudiées en supplément. Il s'agit d'une apparition « sporadic » avec 30 troncs de longueur maximale $L_M=0.433$ m chacun disposés individuellement et d'une apparition « congested » avec

6 groupes de 30 troncs également de la longueur maximale. Une seule configuration critique est réalisée comprenant le débit de dimensionnement, le râtelier complet, la position proche au déversoir et la largeur des passes la plus étroite.

Pour l'apparition « sporadic », le blocage se crée au râtelier dès qu'un tronc individuel reste immobilisé au râtelier. Pour l'apparition « congested », le premier groupe de tronc reste directement immobilisé au râtelier. Indépendamment de l'apparition étudiée, aucun pic de force d'impact n'a été enregistré.

Les coefficients de trainée C_{WB} des apparitions « sporadic » et « congested », ainsi que de l'apparition extrême du volume de bois flottants appelée aussi « hyper-congested » sont exprimés en fonction du rapport V_s/V_c entre le volume spécifique bloqué V_s et le volume caractéristique (déterminant) V_c selon Schalko (2019). Les constatations suivantes sont à relever :

- Pour $V_s/V_c \leq 1$, les coefficients de trainée C_{WB} augmentent en fonction de V_s/V_c .
- Pour $V_s/V_c > 1$, les coefficients de trainée C_{WB} sont proches d'une constante et ne sont plus fonction de V_s/V_c . Les coefficients de trainée C_{WB} sont similaires aux valeurs d'enveloppe recommandées.

Les valeurs recommandées des coefficients de trainée C_{WB} peuvent être utilisées en présence d'un volume de bois extrême, c'est-à-dire pour $V_s/V_c > 1$.

9 Bibliographie

- Bénet, L. (2019). Etude de l'effet des bois flottants bloquant un évacuateur de crue. B.Sc. Thesis, Haute Ecole d'Ingénierie et d'Architecture de Fribourg (HEIA-FR, HES-SO), Fribourg.
- 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: Blocking probability and reservoir level rise. *Journal of Hydraulic Engineering* [provisionally accepted].
- Bezzola, G.R., Hegg, C., eds. (2007). *Ereignisanalyse Hochwasser 2005*, Bundesamt für Umwelt & Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Bern.
- Braudrick, C.A., Grant, G.E., Ishikawa, Y., Ikeda, H. (1997). Dynamics of Wood Transport in Streams: A Flume Experiment. *Earth Surface Processes and Landforms*, 22(7), 669-683.
- Bruschin, J., Bauer, S., Delley, P., Trucco, G. (1981). The overtopping of the Palagnedra dam. *Water Power & Dam Construction* 34(1), 13-19.
- Cheng N.-S. (2013). Calculation of Drag Coefficient for Arrays of Emergent Circular Cylinders with Pseudofluid Model. *Journal of Hydraulic Engineering* 139(6), 602-611.
- Dorthe, D. (2021), Simulation numérique. HEIA-FR, *Communication interne*.
- FHWA (2005). Debris Control Structures Evaluation and Countermeasures. *Hydraulic Engineering Circular No. 9*, Salem, OG.
- Furlan, P. (2019). Blocking probability of large wood and resulting head increase at ogee crest spillways. Ph.D. Thesis 9040, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Gippel, C.J., O'Neill, I., Finlayson, B.L., Schnatz, I. (1996). Hydraulic guideline for the re-introduction and management of large woody debris in lowland rivers. *Regulated rivers: Research & management* 12(2-3), 223-236.
- Godtland, K., Tesaker, E. (1994). Clogging of spillways by trash. Proc. Intl. Conf. ICOLD, Durban, Q68, R36, 543-557.
- Haehnel, R.B., Daly, F. (2004). Maximum Impact Force of Woody Debris on Floodplain Structures. *Journal of Hydraulic Engineering* 130(2), 112-120.
- Hartlieb, A., Bezzola, G.R. (2000). Ein Überblick zur Schwemmholtzproblematik. *Wasser Energie Luft* 92(1/2), 1-5.
- Hartung, F., Knauss, J. (1976). Considerations for spillways exposed to dangerous clogging conditions. Proc. Intl. Conf. ICOLD, Mexico, Q47, R2, 741-749.
- Kälin, R., Ballini, D., Meier, J. (2005). Abspülen von Geschwemmteppichen: Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit von Stahlwasserbauten. *Wasser Energie Luft* 97(1/2), 11-13.
- Lange, D., Bezzola, G.R. (2006). Schwemmholtz, Probleme und Lösungsansätze. VAW Mitteilung 188, ETH Zürich.
- Majtan, E., Cunningham, L.S., Rogers, B. (2021). Flood-Induced Hydrodynamic and Debris Impact Forces on Single-Span Masonry Arch Bridge. *Journal of Hydraulic Engineering* 147(11), 04021043.
- Möller, G., Weitbrecht, V., Nussle, D. (2009). Matteschwelle Bern – Erkenntnisse zur Hochwassersicherheit aus hydraulischen Modellversuchen. *Wasser Energie Luft* 101(2), 83-88.
- 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.

- Perham, E.R. (1986). Floating debris control system for hydroelectric plant intakes. *The REMR Bulletin* (3)2, USCE, 1-3.
- Pfister, M. (2010). Schwemmholtzrückhalt beim Einlaufbauwerk zum Lyssbachstollen. *Wasser Energie Luft* 102(4), 275-280.
- 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., Bénet, L., De Cesare, G. (2020). Effet des bois flottants obstruant un évacuateur de crue dans des conditions extrêmes. *Wasser, Energie, Luft* 112 (2), 77-83.
- Pfister, M., Capobianco, D., Tullis, B., Schleiss, A.J. (2013). Debris blocking sensitivity of Piano Key weirs under reservoir type approach flow. *Journal of Hydraulic Engineering* 139(11), 1134-1141.
- Pfister, M., De Cesare, G., Bénet, L. (2019). Effet des bois flottants bloquant un évacuateur de crue sous des conditions extrêmes. *Rapport final*, Office fédéral de l'énergie OFEN, Berne.
- Pfister, M., Ribi, J.-M. (2020). Les modèles réduits des ouvrages particuliers dans les réseaux de canalisations. *Séminaire Hydraulique des Canalisations*, VSA, HEIA-FR, Fribourg.
- Rickli, C., Hess, J. (2009). Aspects de la formation des bois flottants. *Cours de formation continue KHOS « Protection contre les crues »*, Fribourg, 1-15.
- Ruiz-Villanueva, V., Piégay, H., Gurnell, A. M., Marston, R. A., Stoffel, M. (2016). Recent advances quantifying the large wood dynamics in river basins: New methods and remaining challenges. *Reviews of Geophysics* 54(3), 611-652.
- Schalko, I., Schmocke, L., Weitbrecht, V., Boes, R. (2019). Gefahrenbeurteilung von Schwemmholtzverklausungen in Flüssen: Teil 2 – Aufstau. *Wasser Energie Luft* 111(2), 71-77.
- Schmocke, L., Hager, W.H. (2013). Scale modelling of wooden debris accumulation at a debris rack. *Journal of Hydraulic Engineering* 139(8), 827-836.
- Schmocke, L., Weitbrecht, V. (2013). Driftwood: Risk analysis and engineering measures. *Journal of Hydraulic Engineering* 139(7), 683-695.
- 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.
- Wohl, E., Bledsoe, B.P., Fausch, K.D., Kramer, N., Bestgen, K.R., Gooseff, M.N. (2016). Management of Large Wood in Streams: An Overview and Proposed Framework for Hazard Evaluation. *Journal of the American Water Resources Association* 52(2), 315-335.
- 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.

10 Annexes

Annexe 1a : tableau des paramètres testés pour le râtelier complet

Annexe 1b : tableau des résultats pour le râtelier complet

Annexe 2a : tableau des paramètres testés pour le râtelier partiel

Annexe 2b : tableau des résultats pour le râtelier partiel

Annexe 3a : tableau des paramètres testés pour les plus faibles apparitions de bois flottants

Annexe 3b : tableau des résultats pour les plus faibles apparitions de bois flottants

10.1 Annexe 1a : Paramètres testés pour le râtelier complet

Test	X (équation 11)	Débit Q	b/L_M	b_r/L_M	Position râtelier (équations 6 à 8)	a/H_r	Froude amont F_o (équation 23)	Vitesse moyenne barre râtelier U_M	Vitesse à la surface U_B
[-]	[-]	[m ³ /s]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[m/s]	[m/s]
1	0.33	0.028	0.60	0.60	proche	2.60	0.018	0.07	0.10
2	0.34	0.028	0.60	0.60	proche	2.57	0.019	0.07	0.10
3	0.67	0.085	0.60	0.60	proche	1.30	0.048	0.20	0.26
4	0.67	0.085	0.60	0.60	proche	1.30	0.048	0.20	0.26
5	1.01	0.165	0.60	0.60	proche	0.86	0.082	0.34	0.43
6	1.01	0.165	0.60	0.60	proche	0.86	0.082	0.34	0.43
7	0.34	0.028	0.60	0.60	interm.	4.73	0.018	0.06	0.07
8	0.33	0.028	0.60	0.60	interm.	4.77	0.018	0.06	0.07
9	0.66	0.084	0.60	0.60	interm.	2.39	0.048	0.16	0.19
10	0.67	0.085	0.60	0.60	interm.	2.37	0.048	0.16	0.19
11	1.01	0.165	0.60	0.60	interm.	1.57	0.082	0.29	0.33
12	1.01	0.165	0.60	0.60	interm.	1.57	0.082	0.29	0.33
13	0.33	0.028	0.60	0.60	distant	6.95	0.018	0.05	0.06
14	0.33	0.028	0.60	0.60	distant	6.95	0.018	0.05	0.06
15	0.67	0.085	0.60	0.60	distant	3.47	0.048	0.15	0.16
16	0.67	0.085	0.60	0.60	distant	3.46	0.048	0.15	0.16
17	1.01	0.165	0.60	0.60	distant	2.29	0.082	0.26	0.28
18	1.01	0.165	0.60	0.60	distant	2.29	0.082	0.26	0.28
19	0.34	0.030	0.77	0.77	proche	3.31	0.019	0.07	0.13
20	0.33	0.029	0.77	0.77	proche	3.34	0.019	0.07	0.13
21	0.66	0.087	0.77	0.77	proche	1.68	0.049	0.18	0.32
22	0.66	0.087	0.77	0.77	proche	1.69	0.049	0.18	0.32
23	1.01	0.170	0.77	0.77	proche	1.11	0.085	0.32	0.50
24	1.01	0.170	0.77	0.77	proche	1.11	0.085	0.32	0.50
25	0.33	0.029	0.77	0.77	interm.	4.43	0.019	0.06	0.07
26	0.33	0.029	0.77	0.77	interm.	4.41	0.019	0.06	0.07
27	0.67	0.088	0.77	0.77	interm.	2.21	0.050	0.17	0.19
28	0.66	0.087	0.77	0.77	interm.	2.23	0.049	0.17	0.19
29	1.01	0.170	0.77	0.77	interm.	1.46	0.085	0.30	0.33

30	1.01	0.170	0.77	0.77	interm.	1.46	0.085	0.30	0.33
31	0.33	0.029	0.77	0.77	distant	5.50	0.019	0.06	0.05
32	0.34	0.030	0.77	0.77	distant	5.40	0.019	0.06	0.05
33	0.67	0.088	0.77	0.77	distant	2.74	0.050	0.16	0.15
34	0.66	0.087	0.77	0.77	distant	2.76	0.049	0.16	0.15
35	1.01	0.170	0.77	0.77	distant	1.81	0.085	0.28	0.27
36	1.01	0.170	0.77	0.77	distant	1.81	0.085	0.28	0.27
37	0.34	0.019	0.40	0.40	proche	1.73	0.012	0.08	0.08
38	0.33	0.019	0.40	0.40	proche	1.74	0.012	0.08	0.08
39	0.67	0.057	0.40	0.40	proche	0.87	0.032	0.22	0.23
40	0.67	0.057	0.40	0.40	proche	0.87	0.032	0.22	0.23
41	1.01	0.111	0.40	0.40	proche	0.58	0.054	0.37	0.39
42	1.01	0.111	0.40	0.40	proche	0.58	0.054	0.37	0.39
43	0.33	0.019	0.40	0.40	interm.	4.82	0.012	0.06	0.07
44	0.34	0.019	0.40	0.40	interm.	4.75	0.013	0.06	0.07
45	0.67	0.057	0.40	0.40	interm.	2.41	0.032	0.16	0.20
46	0.67	0.057	0.40	0.40	interm.	2.41	0.032	0.16	0.20
47	1.01	0.111	0.40	0.40	interm.	1.59	0.054	0.29	0.34
48	1.01	0.111	0.40	0.40	interm.	1.59	0.054	0.29	0.34
49	0.33	0.019	0.40	0.40	distant	7.90	0.012	0.05	0.06
50	0.34	0.019	0.40	0.40	distant	7.80	0.012	0.05	0.06
51	0.67	0.057	0.40	0.40	distant	3.94	0.032	0.14	0.18
52	0.67	0.057	0.40	0.40	distant	3.93	0.032	0.14	0.18
53	1.01	0.111	0.40	0.40	distant	2.60	0.054	0.26	0.31
54	1.01	0.111	0.40	0.40	distant	2.60	0.054	0.26	0.31

10.2 Annexe 1b : Résultats pour le râtelier complet

Test	Force eau			Force bois flottants (μ)			Force bois flottants ($\mu+\sigma$)		
	Force râtelier	Force par barre	C_{WE} (équation 17)	Force râtelier (équation 18)	Force par barre (équation 19)	C_{WB} (équation 20)	Force râtelier (équation 18)	Force par barre (équation 19)	C_{WB} (équation 20)
	[\cdot]	[N]	[N]	[\cdot]	[N]	[N]	[\cdot]	[N]	[N]
1	0.182	0.046	2.01	0.251	0.063	2.21	0.300	0.075	2.63
2	0.284	0.071	3.14	0.210	0.053	1.85	0.246	0.062	2.16
3	1.171	0.293	1.42	3.708	0.927	4.67	3.975	0.994	5.00
4	1.162	0.291	1.41	4.577	1.144	5.76	4.890	1.223	6.15
5	4.514	1.128	1.54	17.476	4.369	8.16	18.249	4.562	8.52
6	4.615	1.154	1.58	19.047	4.762	8.90	19.683	4.921	9.19
7	0.143	0.036	2.58	0.165	0.041	3.25	0.204	0.051	4.02
8	0.289	0.072	5.21	0.043	0.011	0.85	0.073	0.018	1.44
9	1.018	0.254	1.87	2.815	0.704	6.88	3.062	0.765	7.48
10	1.032	0.258	1.90	2.774	0.694	6.78	3.002	0.751	7.33

11	3.227	0.807	1.60	12.214	3.054	9.87	12.810	3.203	10.35
12	3.271	0.818	1.62	12.573	3.143	10.16	13.165	3.291	10.64
13	0.265	0.066	6.15	0.493	0.123	14.13	0.554	0.139	15.89
14	0.086	0.022	2.00	0.251	0.063	7.20	0.285	0.071	8.18
15	0.745	0.186	1.71	3.201	0.800	11.04	3.562	0.890	12.28
16	1.020	0.255	2.35	1.998	0.500	6.89	2.231	0.558	7.69
17	2.128	0.532	1.28	11.121	2.780	12.59	12.357	3.089	13.99
18	2.427	0.607	1.46	8.685	2.171	9.84	9.267	2.317	10.49
19	0.136	0.045	2.48	1.070	0.357	5.64	1.297	0.432	6.84
20	0.177	0.059	3.21	0.822	0.274	4.33	0.924	0.308	4.87
21	1.811	0.604	3.52	4.263	1.421	3.80	4.975	1.658	4.43
22	1.591	0.530	3.09	4.756	1.585	4.24	5.277	1.759	4.70
23	4.281	1.427	2.30	20.954	6.985	7.63	22.834	7.611	8.31
24	3.800	1.267	2.04	22.672	7.557	8.25	24.844	8.281	9.04
25	0.012	0.004	0.27	0.462	0.154	9.67	0.529	0.176	11.08
26	0.097	0.032	2.20	0.363	0.121	7.61	0.413	0.138	8.66
27	0.780	0.260	1.81	2.732	0.911	7.06	3.193	1.064	8.25
28	0.575	0.192	1.34	2.668	0.889	6.89	3.150	1.050	8.14
29	2.517	0.839	1.59	10.335	3.445	8.81	11.792	3.931	10.05
30	2.098	0.699	1.32	13.971	4.657	11.91	15.506	5.169	13.22
31	0.025	0.008	0.68	0.830	0.277	26.92	0.976	0.325	31.65
32	0.215	0.072	5.76	0.590	0.197	19.12	0.665	0.222	21.58
33	1.068	0.356	2.88	3.508	1.169	13.67	4.042	1.347	15.74
34	0.613	0.204	1.66	2.620	0.873	10.21	3.202	1.067	12.48
35	2.905	0.968	2.10	10.967	3.656	13.75	12.368	4.123	15.50
36	2.410	0.803	1.74	10.295	3.432	12.90	11.735	3.912	14.71
37	0.382	0.064	2.04	0.490	0.082	6.09	0.524	0.087	6.51
38	0.126	0.021	0.67	0.605	0.101	7.52	0.654	0.109	8.13
39	1.962	0.327	1.23	4.225	0.704	6.95	4.392	0.732	7.22
40	2.314	0.386	1.44	3.615	0.603	5.94	3.748	0.625	6.16
41	6.664	1.111	1.22	13.767	2.294	7.93	14.439	2.407	8.32
42	6.998	1.166	1.29	18.745	3.124	10.80	19.196	3.199	11.06
43	-0.349	-0.058	-4.27	-0.256	-0.043	-4.56	-0.225	-0.038	-4.02
44	0.059	0.010	0.73	-0.164	-0.027	-2.93	-0.107	-0.018	-1.91
45	0.820	0.137	1.02	0.531	0.088	1.18	0.602	0.100	1.34
46	0.847	0.141	1.05	0.572	0.095	1.27	0.664	0.111	1.48
47	2.502	0.417	0.84	3.864	0.644	2.88	4.215	0.702	3.14
48	2.697	0.449	0.90	4.153	0.692	3.09	4.552	0.759	3.39
49	-0.074	-0.012	-1.21	0.297	0.049	6.85	0.320	0.053	7.37
50	0.322	0.054	5.28	-0.058	-0.010	-1.33	-0.037	-0.006	-0.85
51	0.616	0.103	1.00	0.687	0.114	1.93	0.751	0.125	2.11
52	0.507	0.084	0.82	0.961	0.160	2.70	1.044	0.174	2.93
53	1.814	0.302	0.77	2.689	0.448	2.45	2.930	0.488	2.67
54	1.698	0.283	0.72	2.559	0.427	2.33	2.832	0.472	2.58

10.3 Annexe 2a : Paramètres testés pour le râtelier partiel

Test	X (équation 11)	Débit Q	b/L_M	b_r/L_M	Position râtelier (équations 6 à 8)	a/H_r	Froude amont F_o (équation 23)	Vitesse moyenne barre râtelier U_M	Vitesse à la surface U_B
[-]	[-]	[m ³ /s]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[m/s]	[m/s]
55	0.34	0.028	0.60	1.20	proche	2.59	0.018	0.07	0.10
56	0.33	0.028	0.60	1.20	proche	2.59	0.018	0.07	0.10
57	0.67	0.085	0.60	1.20	proche	1.30	0.047	0.20	0.26
58	0.67	0.085	0.60	1.20	proche	1.30	0.047	0.20	0.26
59	1.01	0.165	0.60	1.20	proche	0.86	0.079	0.34	0.43
60	1.01	0.165	0.60	1.20	proche	0.86	0.080	0.34	0.43
61	0.33	0.028	0.60	1.20	interm.	4.77	0.018	0.06	0.07
62	0.33	0.028	0.60	1.20	interm.	4.79	0.018	0.06	0.07
63	0.67	0.084	0.60	1.20	interm.	2.38	0.048	0.16	0.19
64	0.67	0.085	0.60	1.20	interm.	2.38	0.048	0.16	0.19
65	1.01	0.165	0.60	1.20	interm.	1.57	0.081	0.29	0.33
66	1.01	0.165	0.60	1.20	interm.	1.57	0.082	0.29	0.33
67	0.34	0.028	0.60	1.20	distant	6.86	0.019	0.05	0.06
68	0.33	0.028	0.60	1.20	distant	6.91	0.018	0.05	0.06
69	0.67	0.085	0.60	1.20	distant	3.45	0.048	0.15	0.16
70	0.67	0.085	0.60	1.20	distant	3.46	0.048	0.15	0.16
71	1.01	0.165	0.60	1.20	distant	2.29	0.082	0.26	0.28
72	1.01	0.165	0.60	1.20	distant	2.29	0.081	0.26	0.28
73	0.33	0.030	0.77	1.54	proche	3.35	0.019	0.07	0.13
74	0.33	0.029	0.77	1.54	proche	3.34	0.019	0.07	0.13
75	0.67	0.087	0.77	1.54	proche	1.68	0.049	0.18	0.32
76	0.67	0.087	0.77	1.54	proche	1.68	0.049	0.18	0.32
77	1.01	0.170	0.77	1.54	proche	1.11	0.084	0.32	0.50
78	1.01	0.170	0.77	1.54	proche	1.11	0.083	0.32	0.50
79	0.33	0.029	0.77	1.54	interm.	4.40	0.019	0.06	0.07
80	0.34	0.029	0.77	1.54	interm.	4.36	0.019	0.06	0.07
81	0.66	0.088	0.77	1.54	interm.	2.22	0.049	0.17	0.19
82	0.66	0.087	0.77	1.54	interm.	2.22	0.050	0.17	0.19
83	1.01	0.170	0.77	1.54	interm.	1.46	0.085	0.30	0.33
84	1.01	0.170	0.77	1.54	interm.	1.46	0.085	0.30	0.33
85	0.34	0.029	0.77	1.54	distant	5.44	0.019	0.06	0.05
86	0.33	0.030	0.77	1.54	distant	5.50	0.019	0.06	0.05
87	0.66	0.088	0.77	1.54	distant	2.76	0.049	0.16	0.15
88	0.66	0.087	0.77	1.54	distant	2.75	0.049	0.16	0.15
89	1.01	0.170	0.77	1.54	distant	1.81	0.084	0.28	0.27
90	1.01	0.170	0.77	1.54	distant	1.81	0.085	0.28	0.27
91	0.34	0.019	0.40	0.80	proche	1.74	0.012	0.08	0.08
92	0.33	0.019	0.40	0.80	proche	1.74	0.012	0.08	0.08
93	0.67	0.057	0.40	0.80	proche	0.87	0.032	0.22	0.23

94	0.67	0.057	0.40	0.80	proche	0.87	0.032	0.22	0.23
95	1.01	0.111	0.40	0.80	proche	0.58	0.054	0.37	0.39
96	1.01	0.111	0.40	0.80	proche	0.58	0.053	0.37	0.39
97	0.33	0.019	0.40	0.80	interm.	4.81	0.012	0.06	0.07
98	0.33	0.019	0.40	0.80	interm.	4.83	0.012	0.06	0.07
99	0.67	0.057	0.40	0.80	interm.	2.42	0.032	0.16	0.20
100	0.67	0.057	0.40	0.80	interm.	2.41	0.032	0.16	0.20
101	1.01	0.111	0.40	0.80	interm.	1.59	0.054	0.29	0.34
102	1.01	0.111	0.40	0.80	interm.	1.59	0.054	0.29	0.34
103	0.33	0.019	0.40	0.80	distant	7.91	0.012	0.05	0.06
104	0.34	0.019	0.40	0.80	distant	7.81	0.012	0.05	0.06
105	0.67	0.057	0.40	0.80	distant	3.95	0.032	0.14	0.18
106	0.67	0.057	0.40	0.80	distant	3.95	0.032	0.14	0.18
107	1.01	0.111	0.40	0.80	distant	2.60	0.054	0.26	0.31
108	1.01	0.111	0.40	0.80	distant	2.60	0.054	0.26	0.31

10.4 Annexe 2b : Résultats pour le râtelier partiel

Test	Force bois flottants (μ)			Force bois flottants ($\mu+\sigma$)		
	Force râtelier (équation 18)	Force par barre (équation 19)	C_{WB} (équation 20)	Force râtelier (équation 18)	Force par barre (équation 19)	C_{WB} (équation 20)
	[\cdot]	[N]	[\cdot]	[\cdot]	[N]	[\cdot]
55	1.353	0.676	14.26	1.522	0.761	16.05
56	0.691	0.346	7.29	0.785	0.393	8.28
57	4.747	2.374	7.17	5.164	2.582	7.80
58	3.219	1.610	4.86	3.723	1.861	5.62
59	13.164	6.582	7.39	13.808	6.904	7.75
60	13.513	6.756	7.58	14.529	7.265	8.15
61	0.616	0.308	14.63	0.649	0.325	15.41
62	0.206	0.103	4.89	0.237	0.119	5.64
63	1.697	0.848	4.98	1.995	0.997	5.85
64	2.185	1.092	6.41	2.554	1.277	7.49
65	2.811	1.406	2.73	3.403	1.702	3.30
66	7.191	3.596	6.98	7.816	3.908	7.58
67	0.425	0.212	14.63	0.456	0.228	15.71
68	0.091	0.046	3.14	0.175	0.087	6.02
69	2.602	1.301	10.78	3.096	1.548	12.82
70	2.650	1.325	10.98	2.978	1.489	12.33
71	10.894	5.447	14.82	11.961	5.980	16.27
72	12.739	6.369	17.32	13.483	6.741	18.34
73	0.124	0.062	0.76	0.172	0.086	1.05
74	0.404	0.202	2.47	0.494	0.247	3.02
75	2.977	1.489	3.08	3.358	1.679	3.47

76	3.096	1.548	3.20	3.460	1.730	3.58
77	11.403	5.701	4.82	12.728	6.364	5.38
78	9.321	4.661	3.94	10.329	5.165	4.36
79	0.885	0.442	21.52	1.038	0.519	25.25
80	0.668	0.334	16.26	0.793	0.396	19.28
81	4.629	2.315	13.88	5.302	2.651	15.89
82	3.119	1.559	9.35	3.648	1.824	10.94
83	9.580	4.790	9.48	12.109	6.055	11.98
84	12.567	6.284	12.43	14.098	7.049	13.95
85	0.817	0.409	30.76	0.905	0.452	34.04
86	0.278	0.139	10.46	0.337	0.168	12.67
87	2.571	1.286	11.62	3.129	1.565	14.15
88	2.114	1.057	9.56	2.594	1.297	11.73
89	9.598	4.799	13.96	10.943	5.472	15.92
90	10.590	5.295	15.40	12.161	6.081	17.69
91	0.789	0.263	9.80	0.810	0.270	10.07
92	0.073	0.024	0.90	0.094	0.031	1.17
93	4.182	1.394	6.88	4.307	1.436	7.08
94	2.277	0.759	3.74	2.465	0.822	4.05
95	13.234	4.411	7.62	13.520	4.507	7.79
96	7.219	2.406	4.16	7.745	2.582	4.46
97	-0.079	-0.026	-1.40	-0.040	-0.013	-0.72
98	0.022	0.007	0.39	0.045	0.015	0.80
99	1.079	0.360	2.40	1.166	0.389	2.60
100	1.169	0.390	2.61	1.250	0.417	2.79
101	4.295	1.432	3.20	4.608	1.536	3.43
102	4.304	1.435	3.20	4.844	1.615	3.61
103	0.471	0.157	10.88	0.490	0.163	11.31
104	0.191	0.064	4.40	0.208	0.069	4.79
105	1.285	0.428	3.61	1.361	0.454	3.82
106	0.949	0.316	2.66	1.007	0.336	2.83
107	2.926	0.975	2.66	3.141	1.047	2.86
108	2.322	0.774	2.12	2.596	0.865	2.36

10.5 Annexe 3a : Paramètres testés pour les plus faibles apparitions de bois flottants

Test	X (équation 11)	Débit Q	b/L_M	b_r/L_M	Position râtelier (équations 6 à 8)		a/H_r	Froude amont F_O (équation 23)	Vitesse moyenne barre râtelier U_M	Vitesse à la surface U_B
					[\cdot]	[\cdot]	[m^3/s]	[\cdot]	[\cdot]	[m/s]
1	1.014	0.111	0.40	0.40	proche		0.58	0.054	0.37	0.39
2	1.014	0.111	0.40	0.40	proche		0.58	0.054	0.37	0.39
3	1.014	0.111	0.40	0.40	proche		0.58	0.054	0.37	0.39
4	1.014	0.111	0.40	0.40	proche		0.58	0.054	0.37	0.39
41	1.01	0.111	0.40	0.40	proche		0.58	0.054	0.37	0.39
42	1.01	0.111	0.40	0.40	proche		0.58	0.054	0.37	0.39

10.6 Annexe 3b : Résultats pour les plus faibles apparitions de bois flottants

Test	Force bois flottants (μ)			Force bois flottants ($\mu+\sigma$)				Troncs bloqués	Volume spécifique V_s	Volume caractéristique (Schalko et al., 2019)
	Force râtelier (équation 18)	Force par barre (équation 19)	C_{WB} (équation 20)	Force râtelier (équation 18)	Force par barre (équation 19)	C_{WB} (équation 20)	[\cdot]			
[\cdot]	[N]	[\cdot]	[\cdot]	[\cdot]	[N]	[N]	[\cdot]	[\cdot]	[m^3]	[m^3]
109	8.491	1.415	4.89	8.931	1.488	5.14	18	0.003	0.041	
110	6.997	1.166	4.03	7.442	1.240	4.29	22	0.004	0.033	
111	14.453	2.409	8.33	14.876	2.479	8.57	173	0.028	0.034	
112	10.368	1.728	5.97	10.818	1.803	6.23	163	0.027	0.033	
41	13.767	2.294	7.93	14.439	2.407	8.32	2840	0.038	0.034	
42	18.745	3.124	10.80	19.196	3.199	11.06	2840	0.038	0.034	

Responsable de l'étude : Prof. Dr. Michael Pfister, HEIA-FR

Etudiant Master : Loïc Bénet, MSE HES-SO//Master et HEIA-FR

Partenaire scientifique : Dr. Giovanni de Cesare, PL-LCH, EPFL

Partenaire financier : Office fédéral de l'énergie, recherche énergétique et cleantech

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

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

Bd de Pérolles 80, CH-1705 Fribourg