



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Energie BFE
Office fédéral de l'énergie OFEN
Ufficio federale dell'energia UFE
Uffizi federal d'energia UFE



(Photo : Ofima)

BOIS FLOTTANT AUX ÉVACUATEURS DE CRUE



CONTENU

Contexte

Étude VAW (2022) sur le bois flottant dans les barrages

- Modèle physique
- Probabilité d'embâcle
- Exhaussement

Thèse de doctorat VAW (Schalko 2018) sur le bois flottant dans les cours d'eau

- Exhaussement
- Volume caractéristique

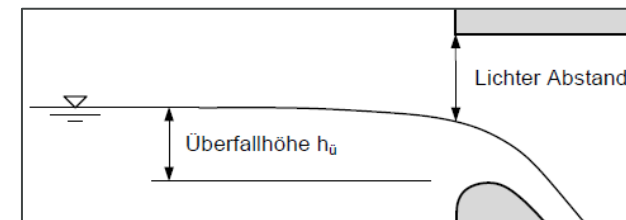


CONTEXTE - LITTÉRATURE

- Godtland K, Tesaker E (1994): Clogging of spillways by trash. Proc. 18th ICOLD Congress, Durban: 543–557
 - Probabilité d'embâcle de morceaux de bois isolés et de groupes de bois flottants
 - pour $b/L > 0.8$ ce sont surtout des morceaux de bois isolés qui passent
 - pour $b/L_{\max} > 1.1$ ce sont surtout des groupes de bois flottants
- STK (2017): Bois flottant aux évacuateurs de crues des barrages
- Schalko I (2018): Modeling hazards related to large wood in rivers. Communiqués du VAW 249, EPF Zurich
 - Exhaussement $\Delta H/H$ ($v \gg 0$)
 - Volume caractéristique du bois flottant V_c ($v \gg 0$)
- 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.
 - Groupes de bois flottant au déversoir standard
 - Exhaussement $\Delta H/H$
 - Si pilier en saillie $p/H_o > 0.35$ pas d'exhaussement
- Pfister M, Bénet L, De Cesare G (2022): Force imposée sur un râtelier en amont d'un évacuateur de crue par des bois flottants. Wasser Energie Luft, 114(4)



DIRECTIVE PARTIE C2



La largeur

...de l'ouverture de décharge doit être supérieure à 80% de la longueur possible des troncs d'arbres (Godtland & Tesaker, 1994)

Staukote	$z \leq 600$ m ü. M.	600 m ü. M. $< z < 1800$ m ü. M.	$z \geq 1800$ m ü. M.
Minimale Breite der Entlastungsöffnung	15 m	Lineare Interpolation	4 m

La largeur minimale de l'ouverture de décharge dépend de la cote de retenue (CFBR 2013)

La hauteur

...de l'ouverture de décharge doit être supérieure à 15% de la longueur possible des troncs d'arbres (pour $b > 110\% \cdot L$)
...de l'ouverture de décharge doit être supérieure à 20% de la longueur possible des troncs d'arbres (pour $b = 80\% \dots 110\% \cdot L$) (Godtland & Tesaker, 1994)

Überfallhöhe (vgl. Abbildung 6) in der aussergewöhnlichen Situation	$h_u \leq 2$ m	$h_u > 2$ m
Mindestmass des lichten Abstands (vgl. Abbildung 6) in der aussergewöhnlichen Situation	2 m	1.5 m

La distance libre minimale dépend de la hauteur de déversement (CFBR 2013)



«Une évaluation spécifique du risque d'obstruction doit être effectuée.»



ÉTUDE DU VAW SUR LES BOIS FLOTTANTS (2022)

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE
Aufsicht Talsperren

Schlussbericht Version 2.0 vom 23. März 2023

Schwemmholz am Mauerüberfall von Talsperren

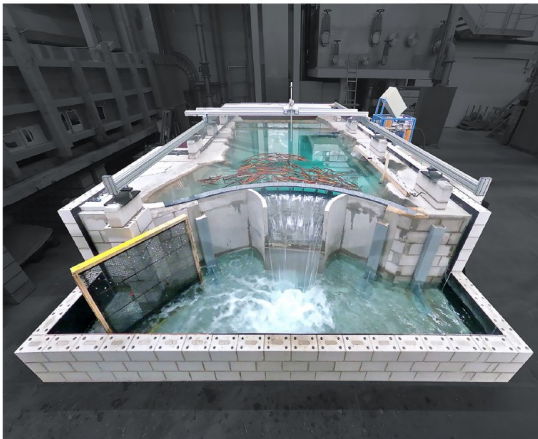


Foto: VAW 2020



Versionshistorie	Bemerkungen
V 1.0 (16.06.2022)	Erstausgabe
V 2.0 (23.03.2023)	Anpassung von Gleichung (5) zur Bestimmung des lichten Abstands a , so dass sie für einen grösseren Wertebereich der Pfeilerauskrängung p_k anwendbar ist

ETH zürich



Versuchsanstalt für Wasserbau,
Hydrologie und Glaziologie

Datum: 23. März 2023

Auftraggeberin:
Bundesamt für Energie BFE
Sektion Aufsicht Talsperren
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Beauftragte:
ETH Zürich
Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW)
Hönggerberggring 26, CH-8093 Zürich
www.vaw.ethz.ch

Autoren:
Barbara Stocker
Adriano Lais
Prof. Dr. Robert Boes

BFE-Projektbegleitung:
Dr. Markus Schwager
Dr. Helge Fuchs

BFE-Vertragsnummer: SI/502153-01

Diese Studie wurde im Rahmen des Forschungsprogrammes Stauanlagensicherheit durchgeführt. Für den Inhalt der Studie sind ausschliesslich deren Autoren verantwortlich.

2/117

- ≈120 pages
- Conclusions principales résumées en 12 pages aux chapitres 7 et 8.

Les contenus suivants proviennent, sauf indication contraire, du rapport du VAW ou de discussions liées au projet.

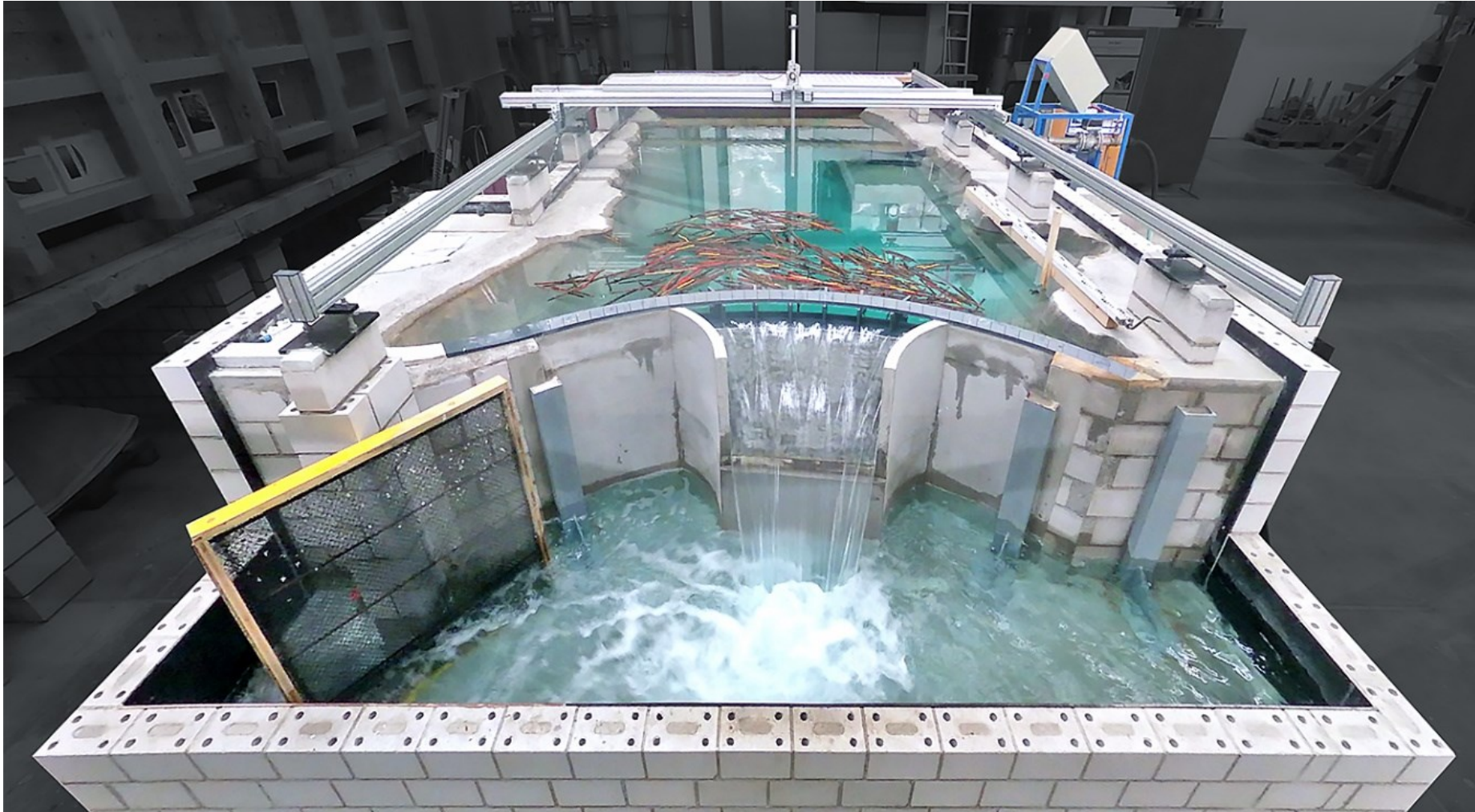


OBJECTIFS DE L'ÉTUDE DU VAW SUR LES BOIS FLOTTANTS

- Confirmer ou infirmer les conclusions d'études antérieures
- Probabilité d'embâcle P de morceaux de bois isolés et rétention RV de groupes de bois flottants
- Déterminer la surélévation du plan d'eau ΔH en cas d'obstruction complète de l'évacuateur de crue autour de piliers ou aux grilles (en fonction du pilier en saillie p , de la part de matériaux fins m , de la porosité n)
- Volume caractéristique du bois flottant V_c aux évacuateurs de crue de barrages
- Influence de différents profils de déversoir sur la surélévation du plan d'eau ΔH suite à un embâcle

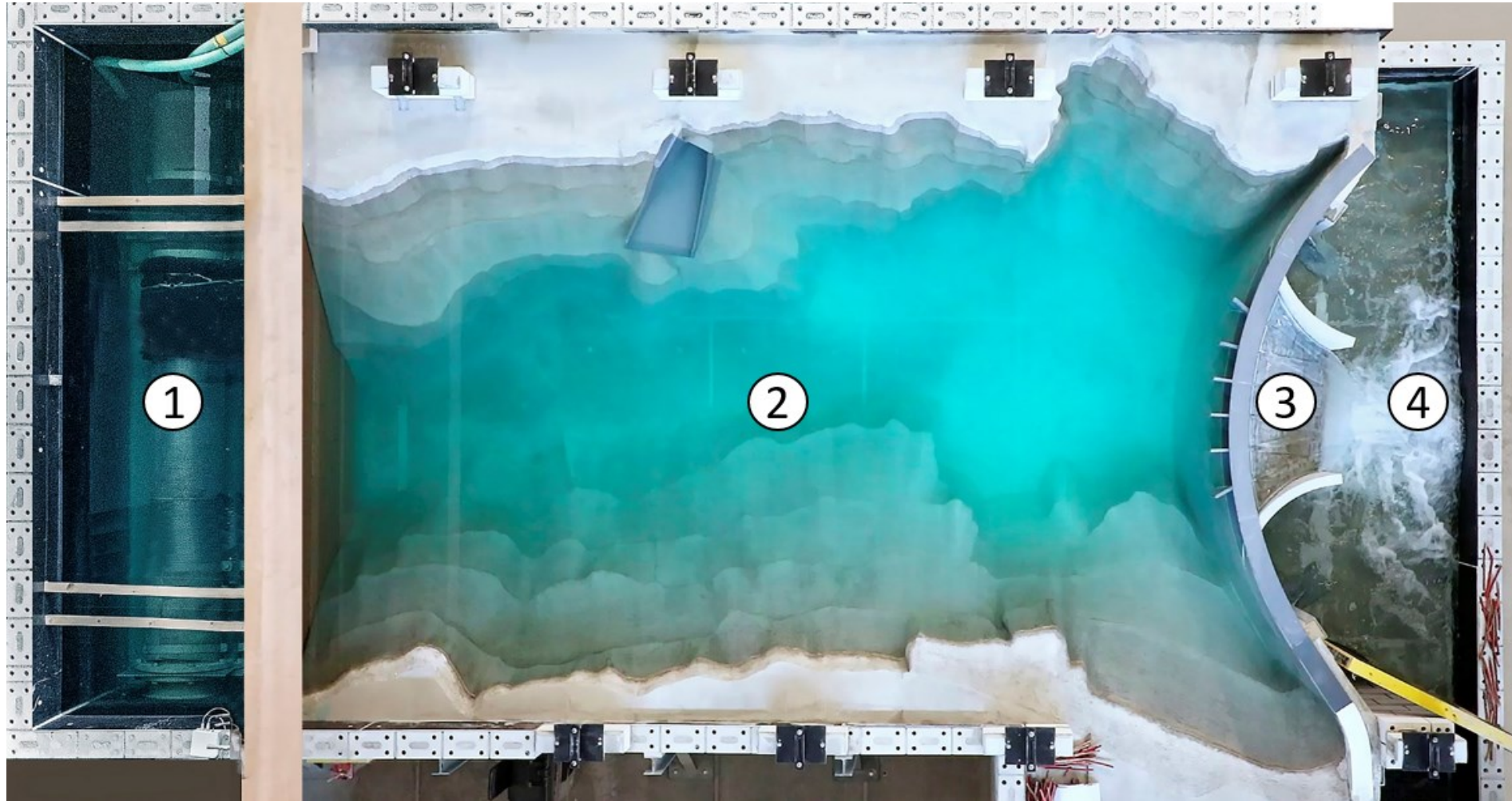


MODÈLE PHYSIQUE OVA SPIN (1:30)





MODÈLE PHYSIQUE OVA SPIN (1:30)

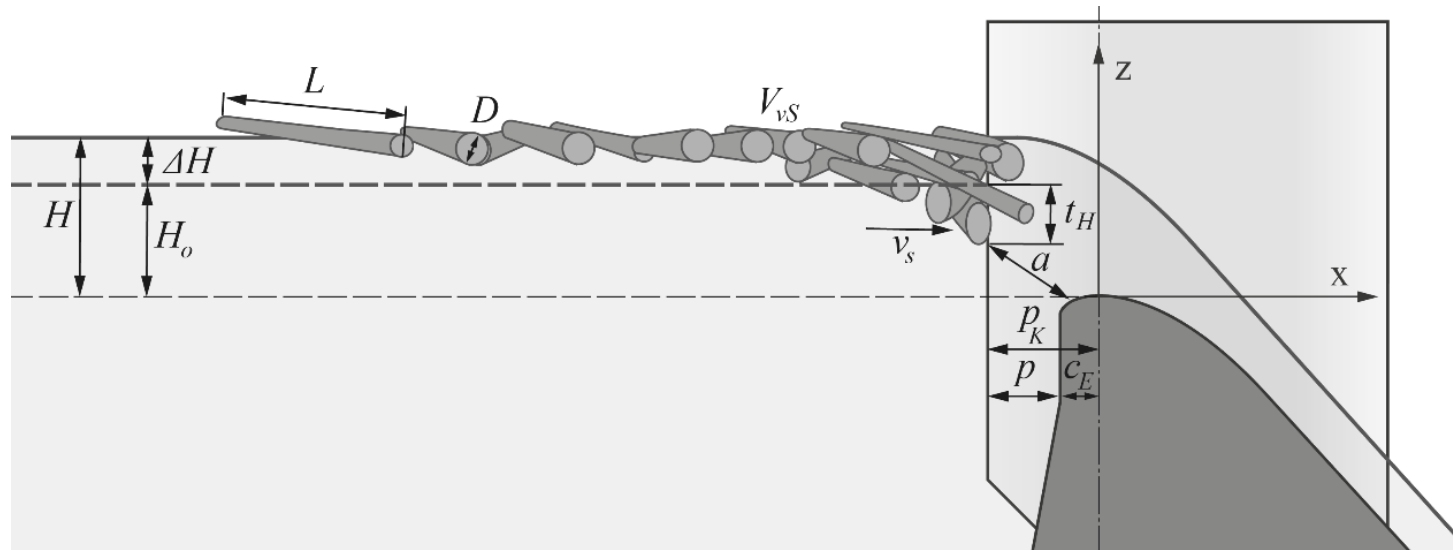




13. FACHVERANSTALTUNG KANTONE ▪ HELGE FUCHS ▪ 14. NOVEMBER 2023



DÉFINITION

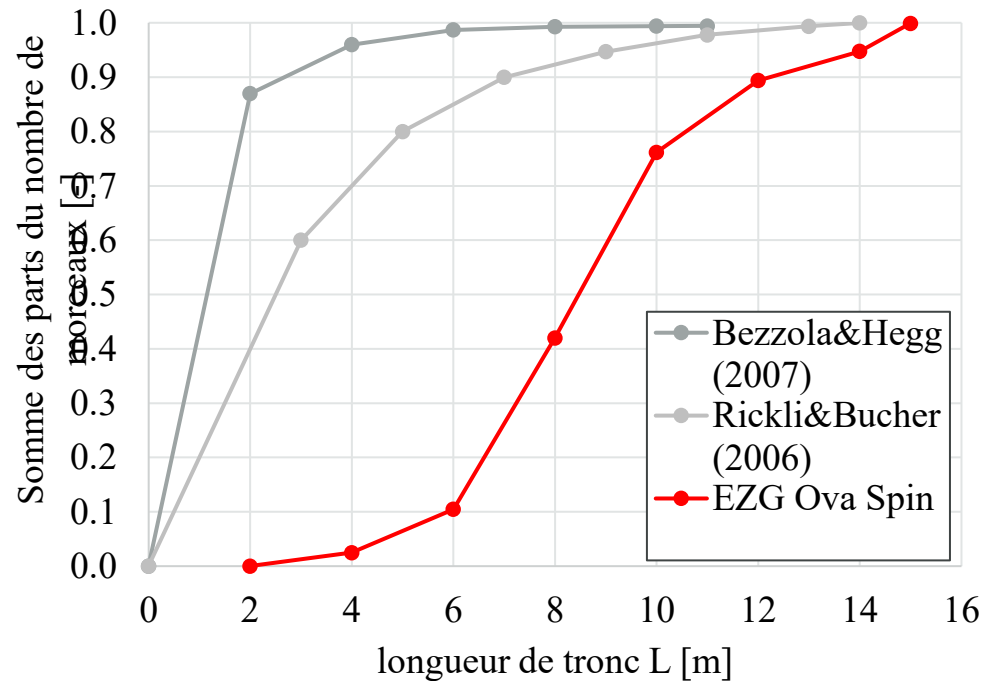


H_o Hauteur de déversement de référence
 v_s Vitesse de référence aux nez de pilier
 p_K Distance amont par rapport à la crête de l'évacuateur de crue
 c_E Distance horizontale
 L Longueur des bois
 D Diamètre des bois

V_{vS} Volume de bois flottant formant l'embâcle
 t_H Profondeur d'immersion de l'embâcle
 a Distance libre entre embâcle et barrage
 ΔH Surélévation du plan d'eau suite à l'embâcle
 H Hauteur de déversement suite à l'embâcle



CARACTÉRISTIQUES DES BOIS FLOTTANTS (LONGUEUR)



Bezzola & Hegg (2007): Données de l'analyse d'un événement de crue 2005, sur le plateau, env. 90% du bois flottant déposé $L < 2$ m, $L/D \approx 20$

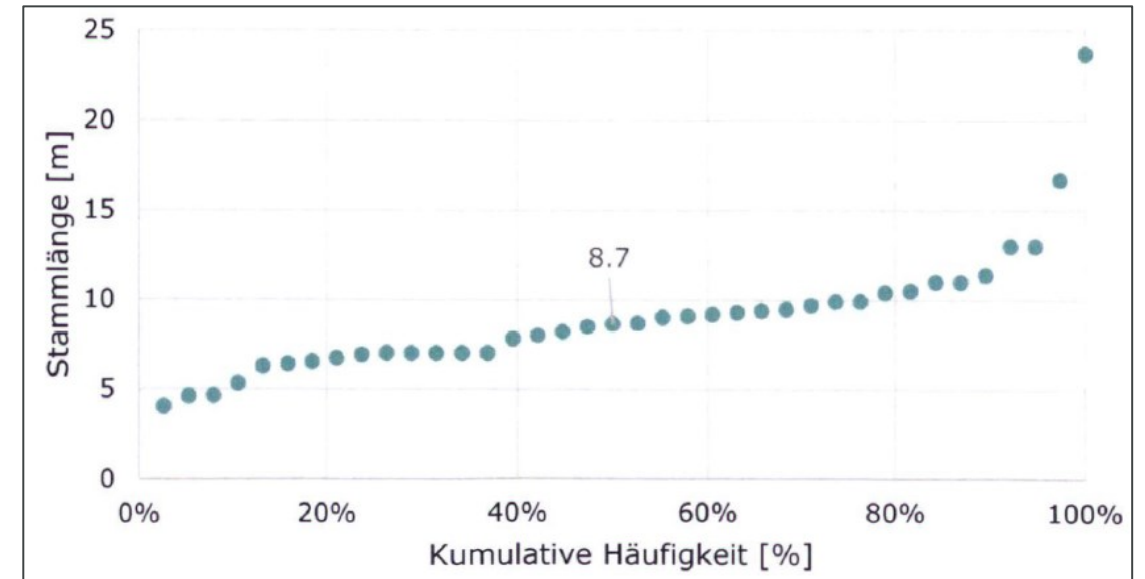
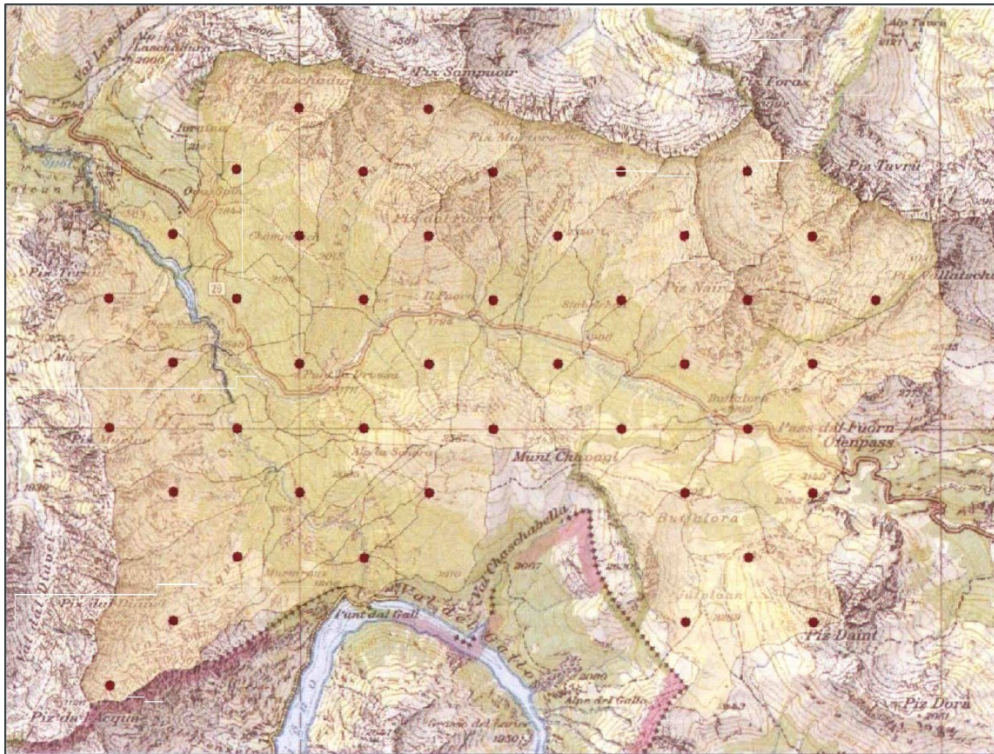
Rickli & Bucher (2006): Bois flottant mesuré dans des torrents, longueur nettement supérieure

Bassin versant *Ova Spin* (1630 m d'altitude): Dans l'espace alpin, apport d'arbres par des glissements de terrain sur une très courte distance, amenant des bois flottants encore entiers à l'évacuateur de crue



CARACTÉRISTIQUES DES BOIS FLOTTANTS (LONGUEUR) – OVA SPIN

- Données de mesure provenant de l'Inventaire forestier national (IFN) de l'institut fédéral WSL
- Échantillon de 38 arbres morts d'au moins 12 cm de diamètre à hauteur de poitrine.



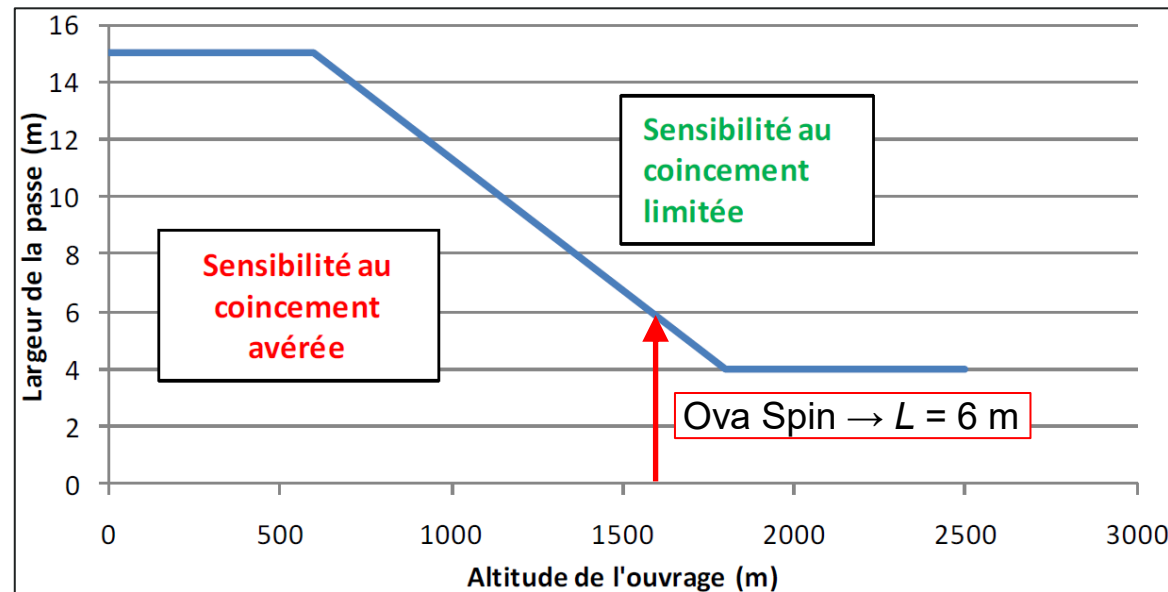
(Étude sur le bois flottant Ova Spin, AF-Consult 2018)



CARACTÉRISTIQUES DES BOIS FLOTTANTS (LONGUEUR)

Comité Français des Barrages et Réservoirs (CFBR 2013):

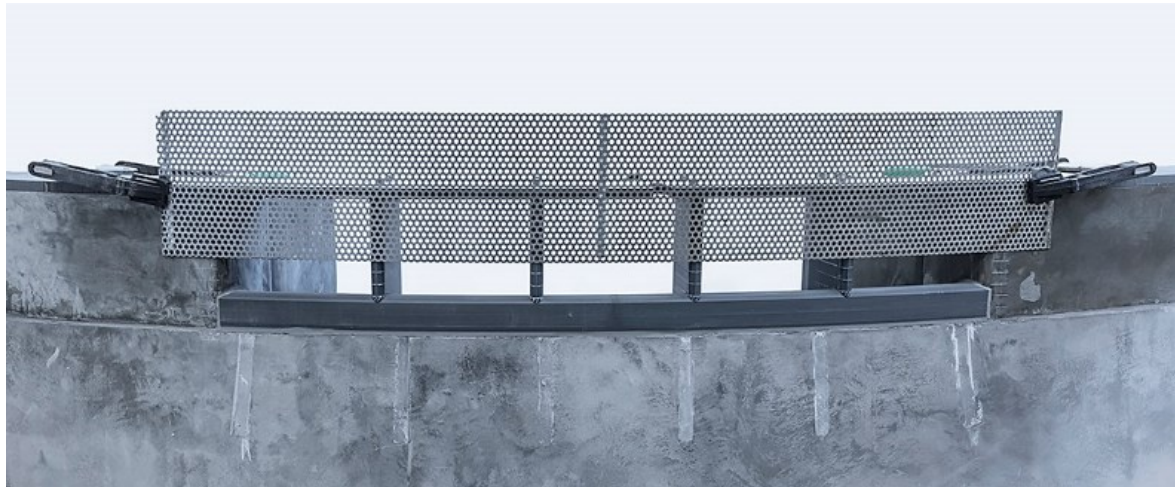
- Largeur minimale des nouveaux barrages 10...15 m
- Modification due au changement climatique (1°C repousse les valeurs de 180 m)
- (Transport/réduction de la taille non pris en compte)





CARACTÉRISTIQUES DES BOIS FLOTTANTS (MORCEAUX ISOLÉS)

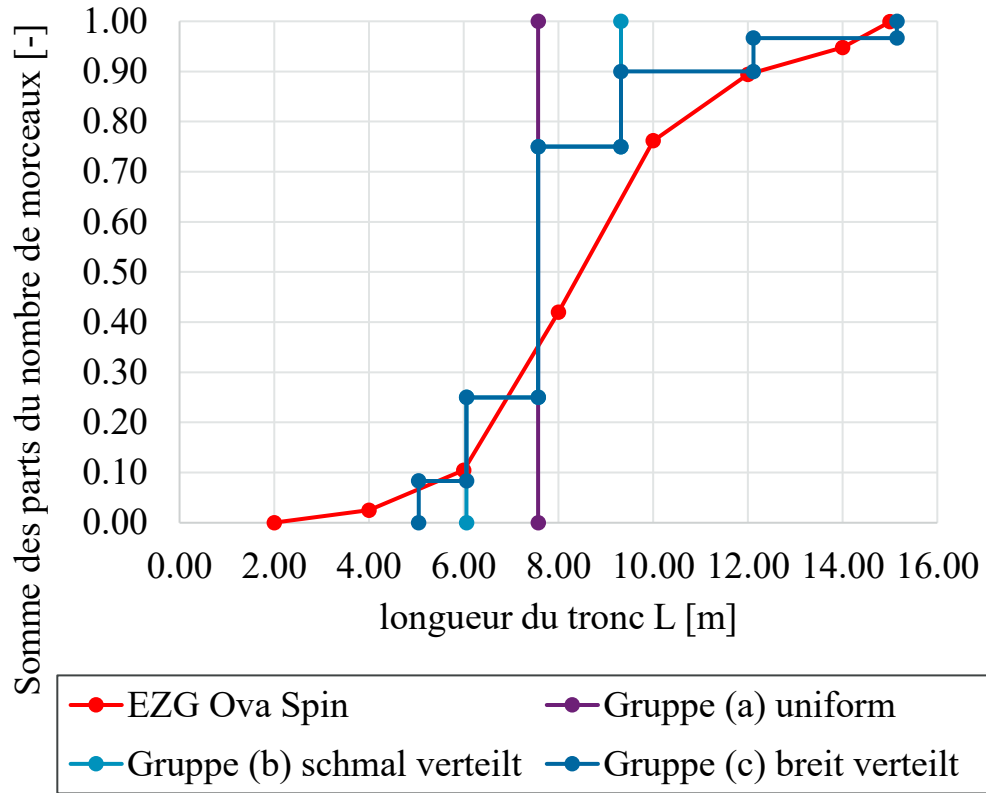
- Reproductibilité
- Échelle géométrique
- Bois scié et ébranché (pas d'accrochage des bois → compactage dense)
- Rigidité trop importante des bois utilisés pour le modèle (comparé à ce qu'on trouve dans la nature)
- $\rho \approx 800 \text{ kg/m}^3$
- $L = B$, $L = 1.25 \cdot B$ (G&T 1994), $L = 2 \cdot B$
- Pas de feuilles, une tôle perforée de porosité n joue le rôle des matériaux fins



	Masse volumique [kg/m ³]
Arole	580 – 720
Épicéa	700 – 850
Pin	750 – 850
Mélèze	750 – 900



CARACTÉRISTIQUES DES BOIS FLOTTANTS (GROUPE)



	Groupe (a) uniforme	Groupe (b) répartition étroite	Groupe (c) répartition large
L_{50}	7,6 m	7,6 m	7,6 m
L_m	7,6 m	7,6 m	7,9 m
L_{90}	7,6 m	9,3 m	10,7 m
L_{max}	7,6 m	9,3 m	15,1 m
L_{min}	7,6 m	6,1 m	5,1 m
σ	0,0 m	1,2 m	2,1 m



CARACTÉRISTIQUES DES BOIS FLOTTANTS (EXHAUSSEMENT)

- Longueur du tronc $L = 1,3 \dots 1,4 \cdot B$
- Volume max. de l'embâcle $V_{vS} = 415 \text{ m}^3$



		Classe A	Classe B	Classe C
Diamètre D	[m]	$0,37 \pm 0,05$	$0,20 \pm 0,05$	$0,54 \pm 0,07$
Longueur du tronc L	[m]	$7,91 \pm 1,04$	$7,59 \pm 0,45$	$7,80 \pm 0,53$
Masse volumique ρ	[kg/m ³]	843 ± 23	779 ± 10	817 ± 32



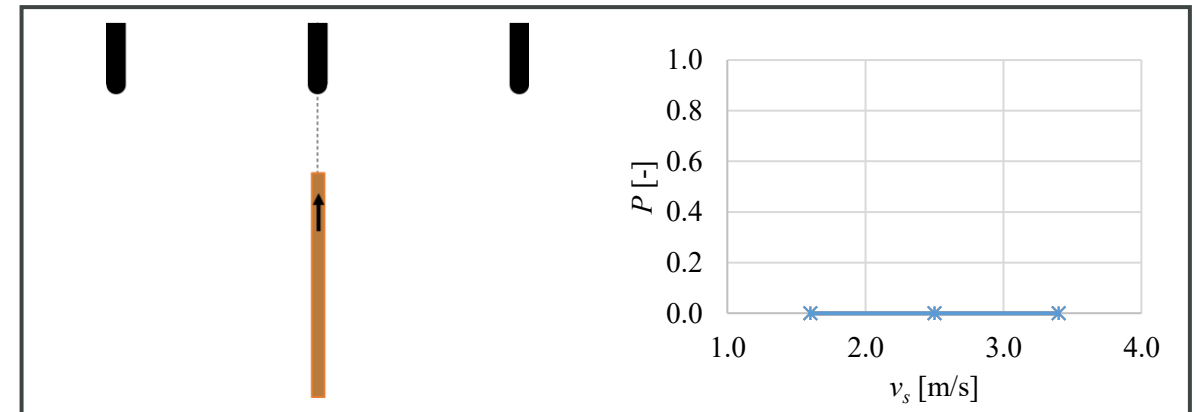
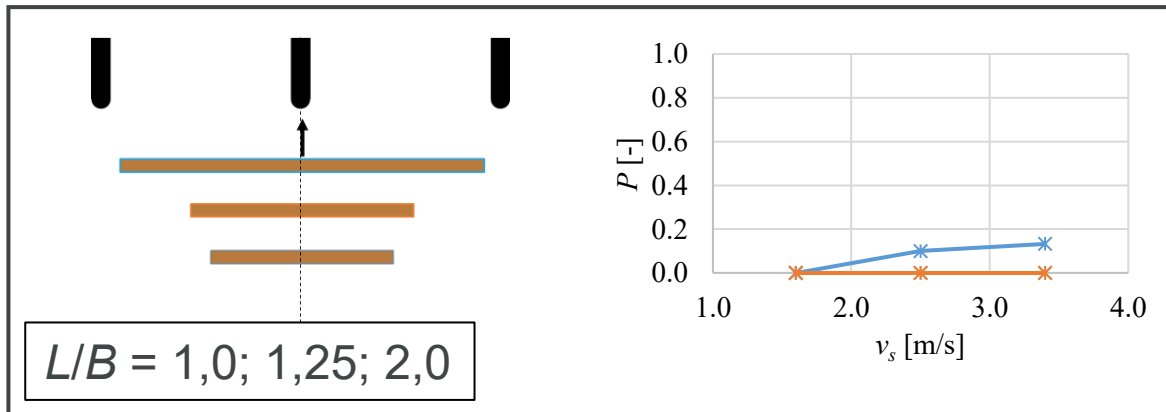
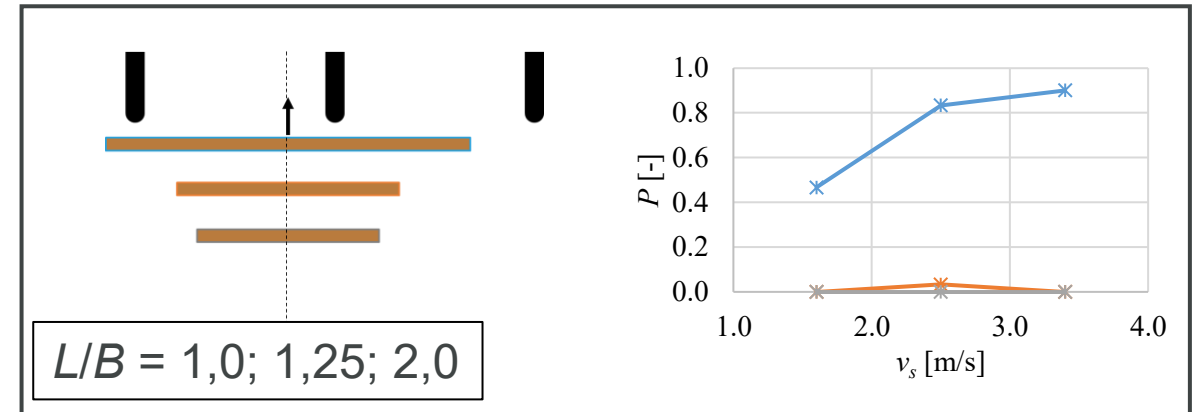
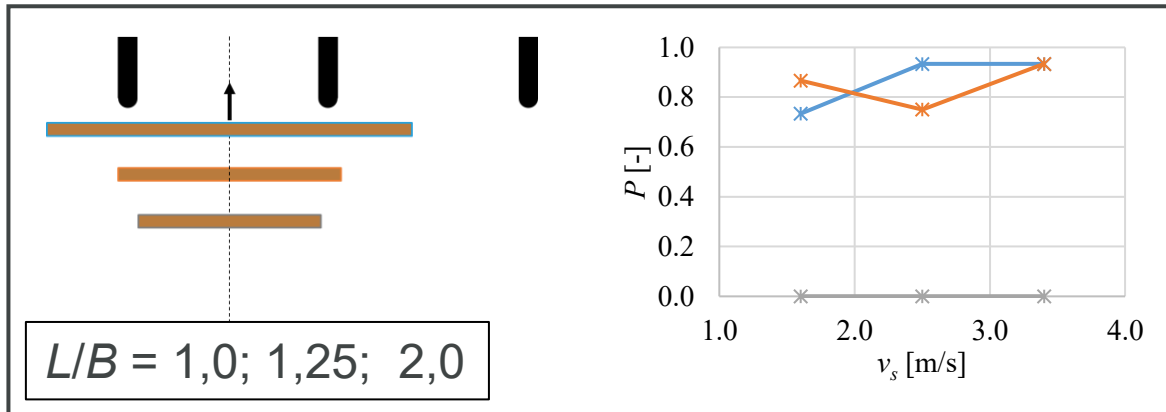
CARACTÉRISTIQUES DU BOIS (POROSITÉ)

$$\text{Facteur de masse } AF = \frac{\text{Volume de bois accumulé en vrac } V_L}{\text{Volume plein du bois formant l'embâcle } V_{vs}}$$

- Mesures de terrain après des inondations en Suisse (Lange & Bezzola, 2006):
 AF = de 2 (très compact) à 5 (accumulation foisonnée) → porosité $n = 0,5 \dots 0,8$ (sans matériaux fins)
- Livers & Wohl (2021) ont mesuré 183 embâcles de bois flottant formés naturellement sur des fleuves du parc national Rocky Mountain, au Colorado (USA):
porosité évaluée visuellement $n = 0,05 \dots 0,75$ (médiane = 0,35)
- Spreitzer et al. (2020) ont étudié des bois flottants rassemblés autour de piliers de pont (bois disposé de manière aléatoire dans un embâcle): $n = 0,6 \dots 0,7$

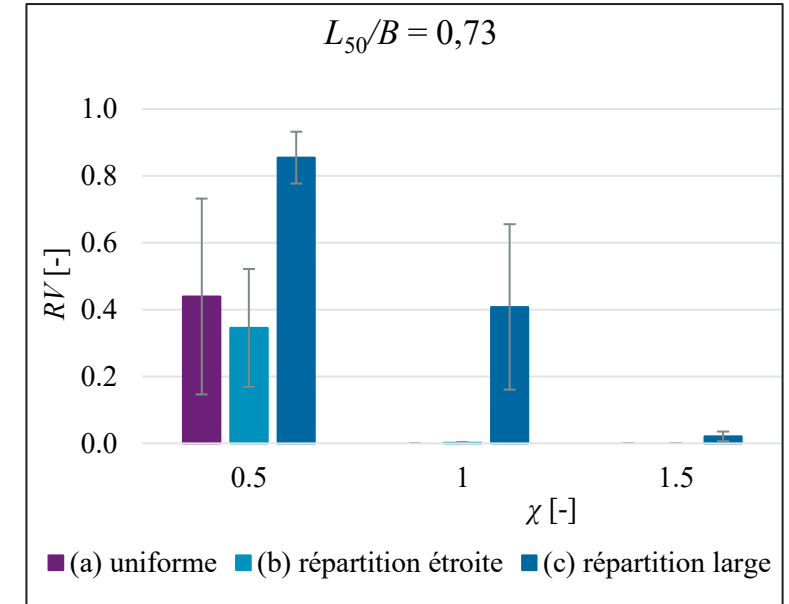
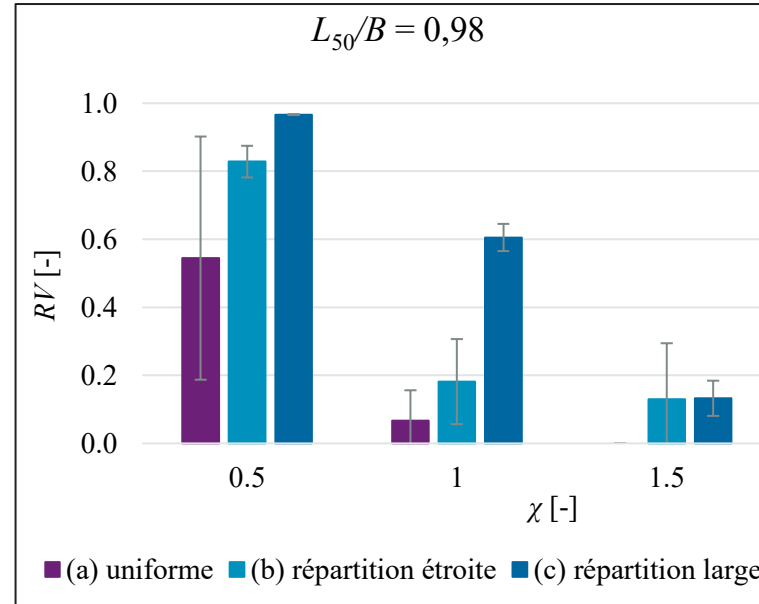
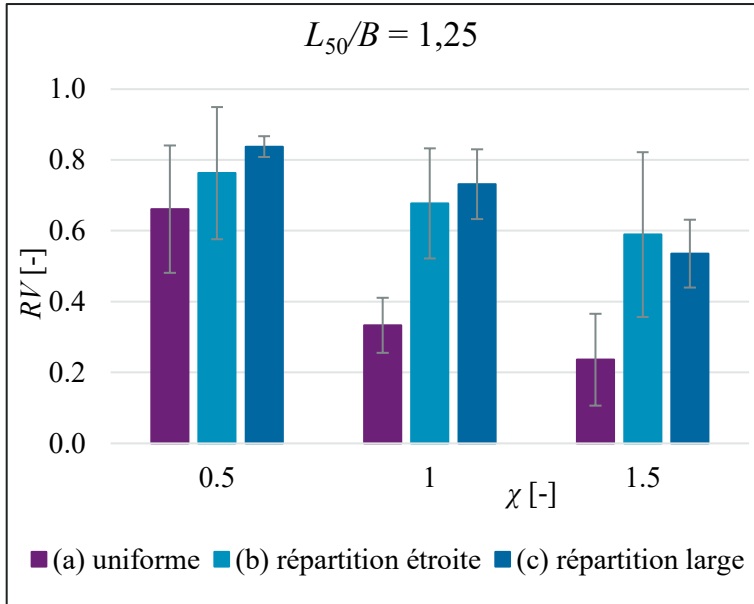


RÉSULTAT CONCERNANT LA PROBABILITÉ D'EMBÂCLE DE MORCEAUX DE BOIS ISOLÉS





RÉSULTATS CONCERNANT LA PROBABILITÉ D'EMBÂCLE DE GROUPES DE BOIS FLOTTANTS



La rétention RV augmente

- lorsque la hauteur relative du déversement $\chi = H/H_d$ diminue
- lorsque la longueur relative des troncs L/B augmente
- lorsque la largeur de la répartition des longueurs de tronc du radeau de bois flottant augmente



CARACTÉRISTIQUES DES BOIS FLOTTANTS – MANIÈRE DE S'AJOUTER À L'EXHAUSSEMENT

Groupes



Radeau de bois flottant

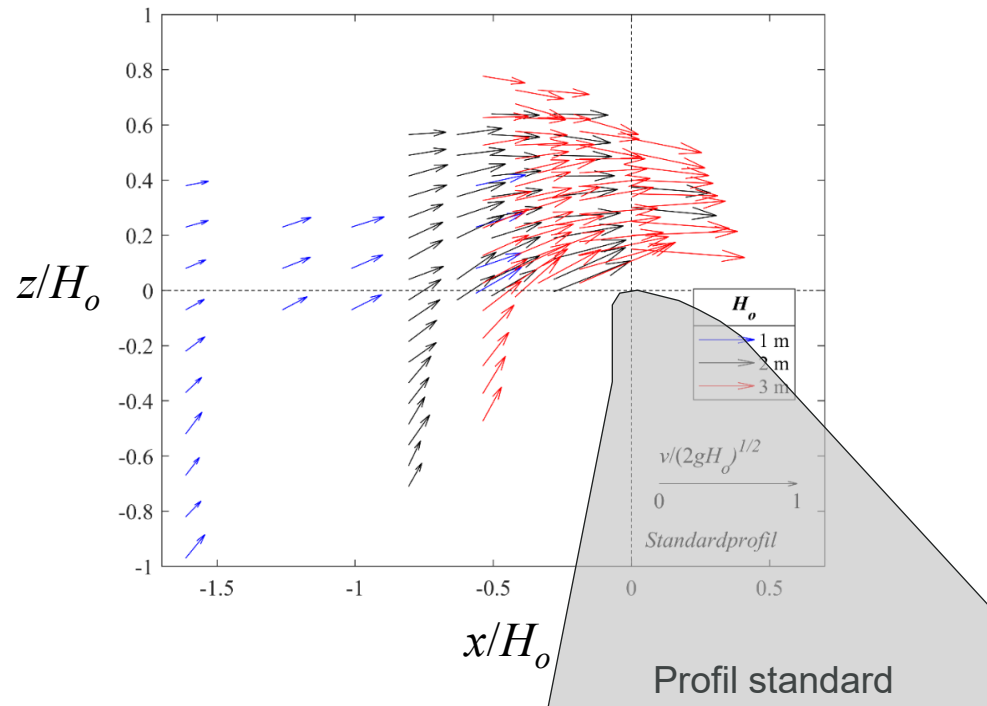


Ajout individuel systématique

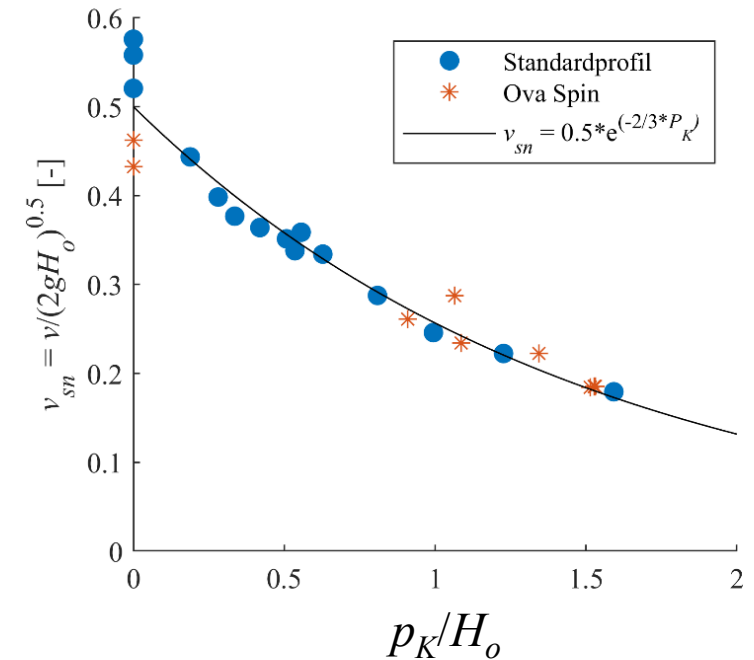




HYDRAULIQUE DES PASSES



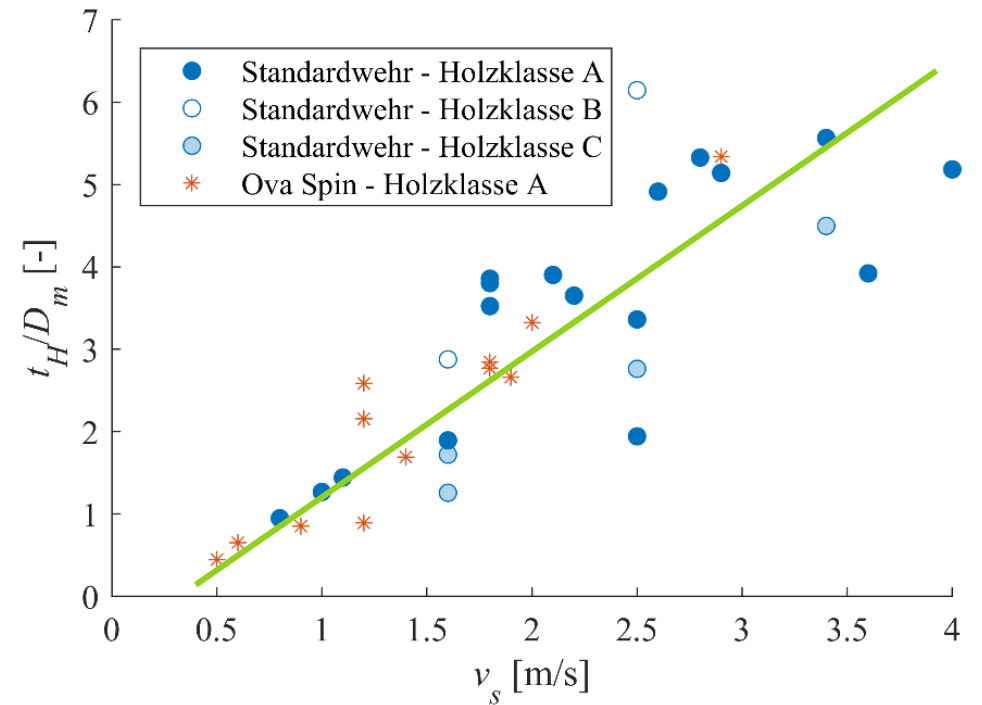
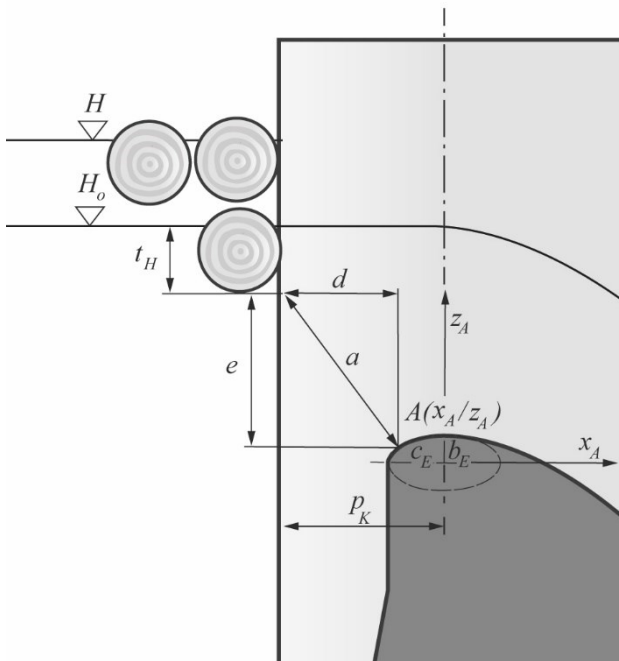
Géométrie (x, z) normalisée avec hauteur du déversement $H_o \rightarrow$ champs de vitesse similaires au niveau géométrique



Vitesse en surface normalisée en fonction de la distance par rapport à la crête du couronnement du déversoir

MORCEAUX DE BOIS FLOTTANT PROFONDEUR D'IMMERSION t_H

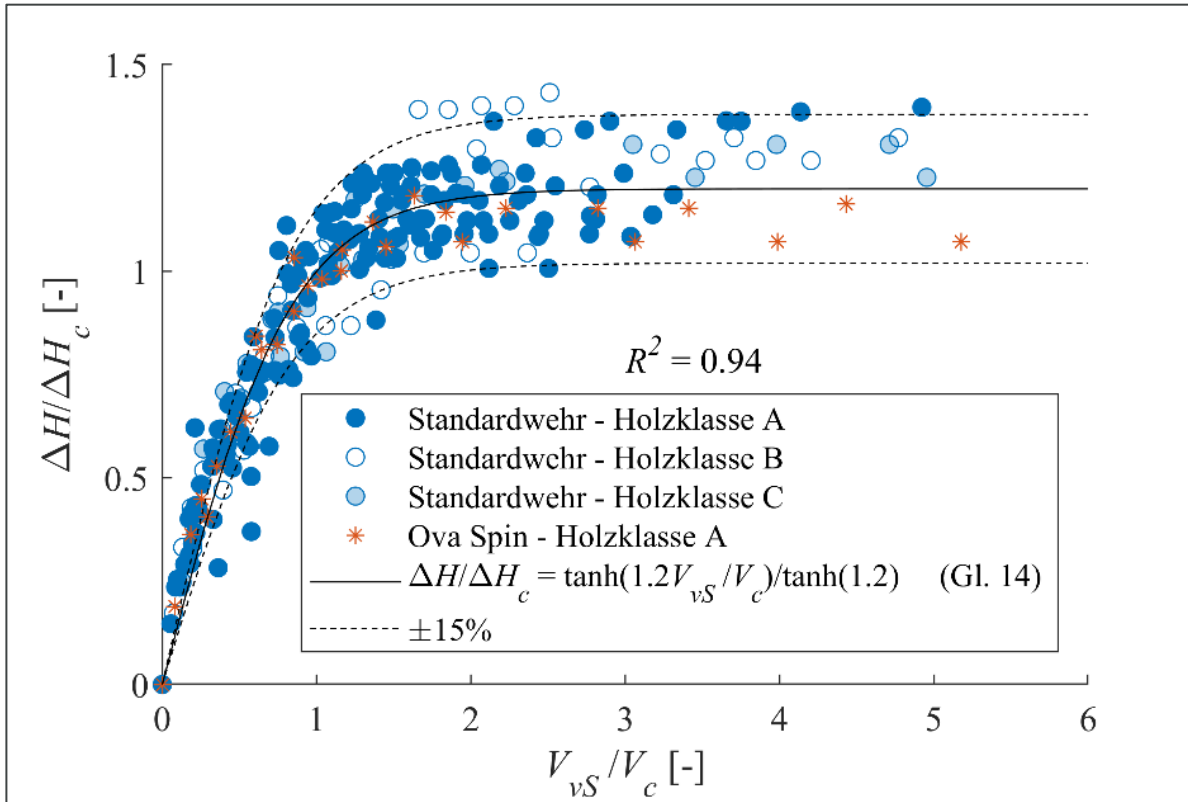
Fonction de la vitesse d'écoulement (densité et diamètre de tronc)



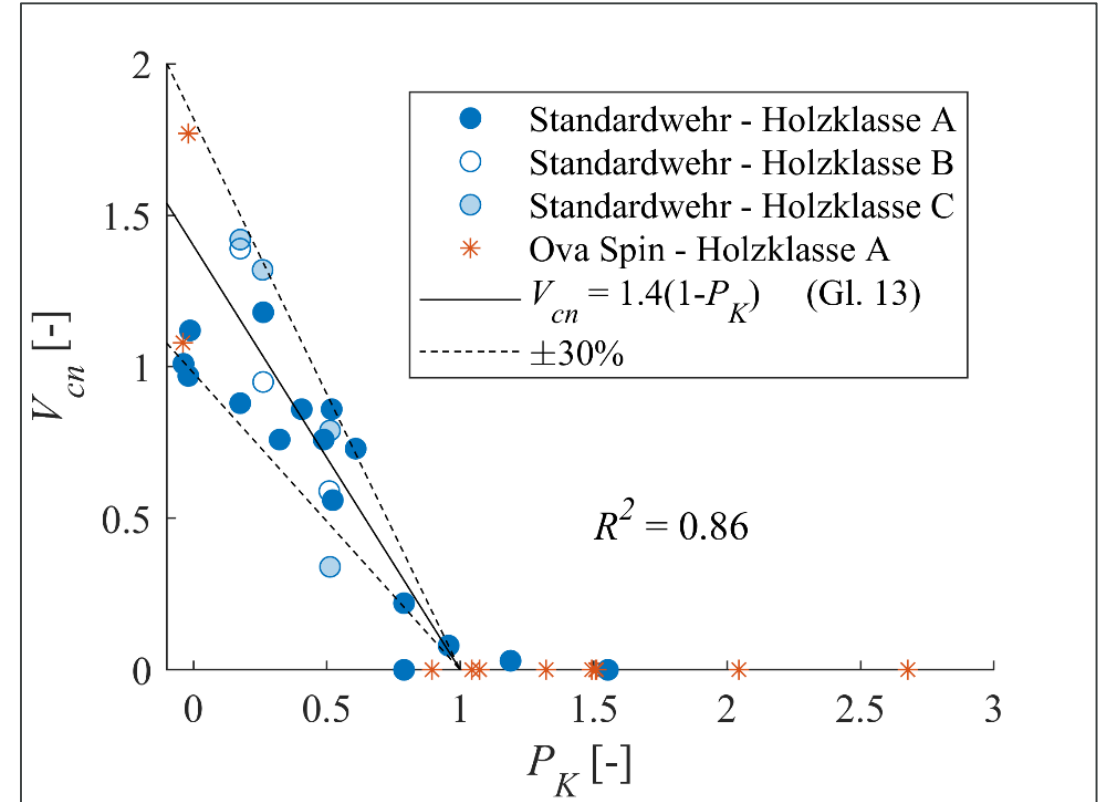
Jusqu'à $v_s = 1,0$ m/s → tapis de bois flottant à 1 couche



VOLUME DE BOIS FLOTTANT CARACTÉRISTIQUE V_{cn}



$$\frac{\Delta H}{\Delta H_c} = \frac{\tanh\left(1,2 \cdot \frac{V_{vS}}{V_c}\right)}{\tanh(1,2)}$$

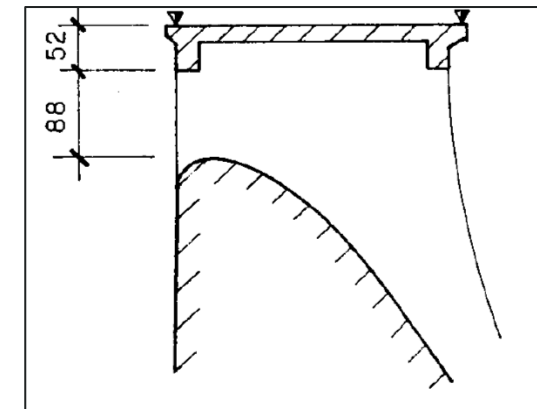
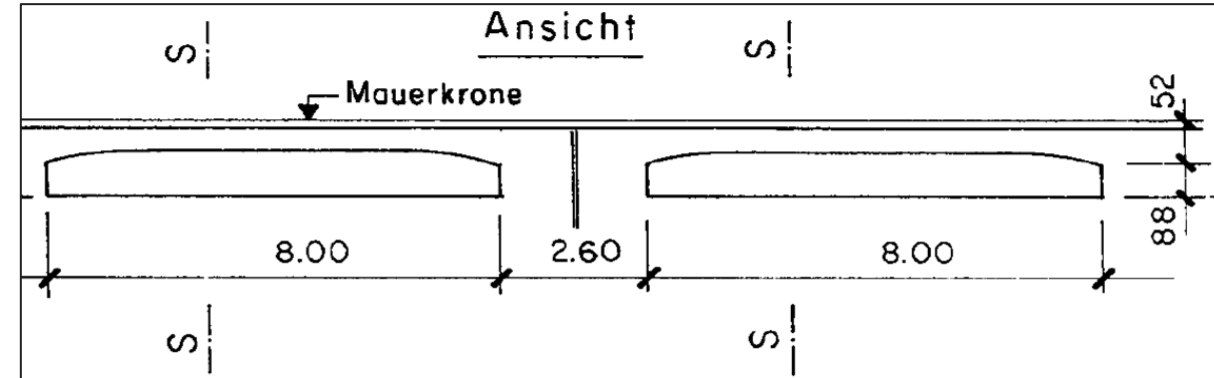


$$V_{cn} = \frac{V_c}{WH_o D_m} = \max[1,4 \cdot (1 - P_K), 0]$$



VOLUME DE BOIS FLOTTANT CARACTÉRISTIQUE V_{CN}

- Exemple fictif





VOLUME DE BOIS FLOTTANT CARACTÉRISTIQUE V_{CN}

- Saillie des piles $p_k \approx 0,35$ m
- Débit considéré comme une crue $Q_{in} = 35\text{m}^3/\text{s}$
- Écoulement via l'évacuateur de crues $Q_{out} = 32\text{m}^3/\text{s} \rightarrow H_o = 1,0$ m
- Saillie des piles relative $P_K = p_K/H_o = 0,35/1,0 = 0,35$

- Largeur du déversoir $W = 2 \cdot 8,0$ m
- Diamètre du bois $D = 0,3$ m

$$\begin{aligned} V_c &= (WH_oD_m) \cdot 1,4 \cdot (1 - P_K) \\ &= (2 \cdot 8\text{m} \cdot 1,0\text{m} \cdot 0,3\text{m}) \cdot 1,4 \cdot (1 - 0,35) \approx 4,4\text{m}^3 \end{aligned}$$

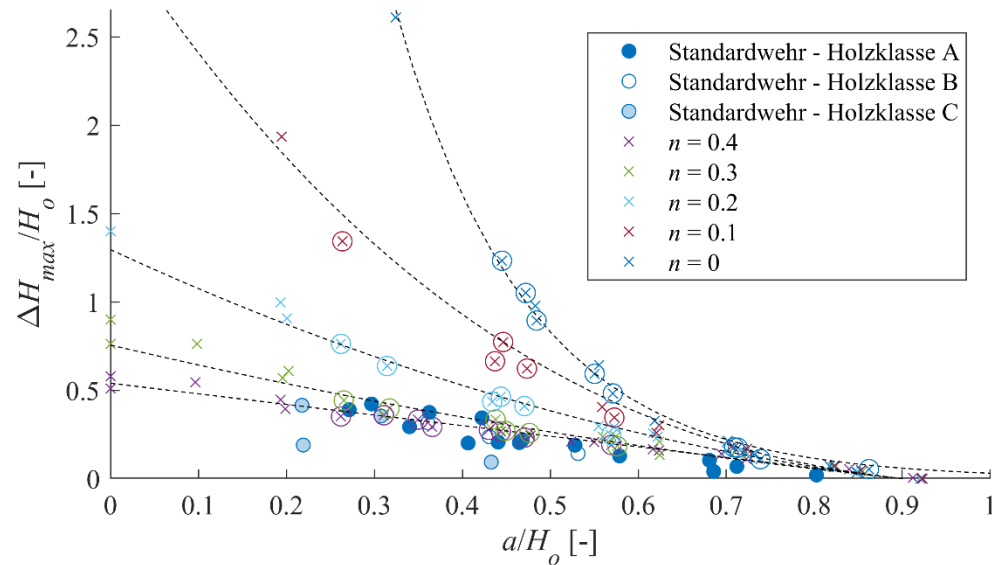


SCHÉMA DE CALCUL

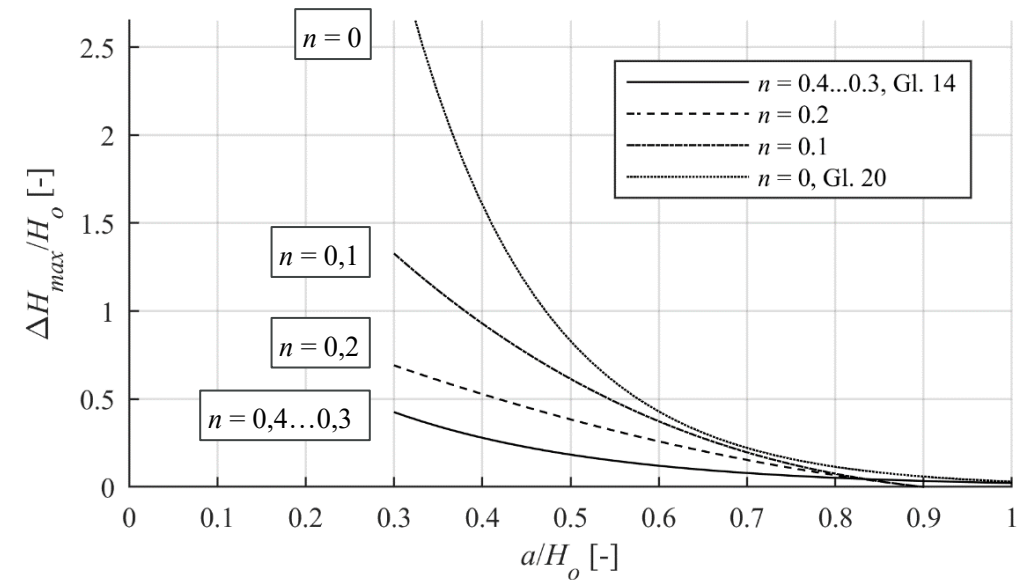
1. Vitesse en surface normalisée v_{sn} au niveau de la tête des piles
(pour $P_K = p_K/H_o = 0 \dots 2,0$)
$$v_{sn} = \frac{v_s}{\sqrt{2gH_o}} = 0.5 \cdot e^{-\frac{2}{3} \cdot P_K}$$
2. Profondeur d'immersion relative de l'embâcle
 $T_H = t_H/H_o$
$$T_H = 1.82 \cdot v_{sn} = 0.91 \cdot e^{-\frac{2}{3} \cdot P_K}$$
3. Distance libre a entre l'embâcle et le déversoir
$$a = \sqrt{\left(p_K - \frac{2}{3} c_E\right)^2 + (H_o - t_H + 0.127 c_E)^2}$$
4. Exhaussement maximal relatif du plan d'eau $\Delta H_{max}/H_o$
(pour $a/H_o > 0,3$)
$$\frac{\Delta H_{max}}{H_o} = 1.5 e^{-4.2 \frac{a}{H_o}}$$



CALCUL – POROSITÉ



Des tôles perforées poreuses à 30% et 40% créent un exhaussement semblable à celui des essais avec du bois



Détermination graphique pour $a/H_o \geq 0.3$ et $n \leq 0.3$



CONCLUSIONS DE L'ÉTUDE VAW SUR LE BOIS FLOTTANT

- Longueur moyenne des bois L_{50} non déterminante pour le processus d'embâcle
- Les tapis de bois flottant, les troncs avec branches et les souches ne peuvent être exclus

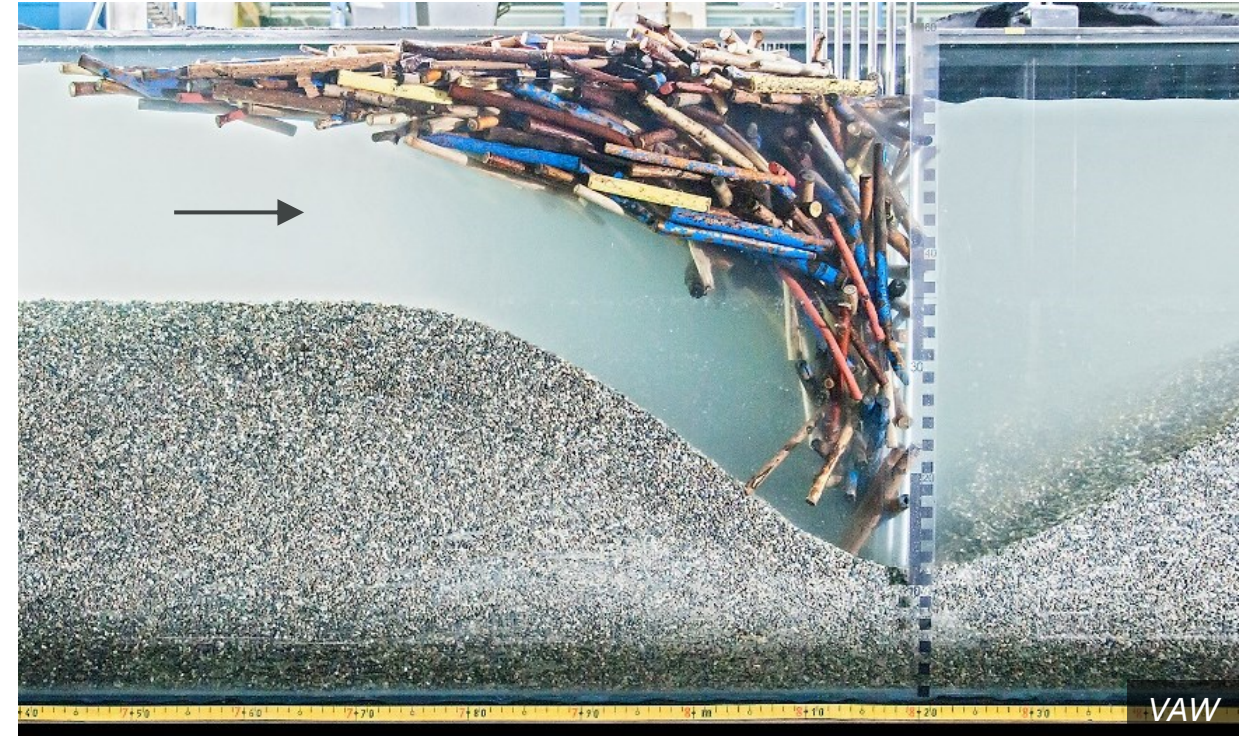


Critère de Godtland et Tesaker pour la probabilité d'un embâcle ($b/L > 0,8$) non suffisant pour la directive de l'OFEN, partie C2

- Équations applicables uniquement si l'espace libre $a/H_o \geq 0,3$
- Calcul non applicable aux déversoirs à seuil épais
- Pas d'exhaussement notable si le bois est retenu dans des zones où $v_s < 0,8-1,0$ m/s
- Grille retenant le bois flottant à avancer de $p_K = H_o$ (exhaussement $\leq 10\%$)
- Non pris en compte dans le processus de calcul: embâcle sur le seuil du déversoir ($D_{max}/H_o \geq 0,35$), influence de la densité du bois, influence de la répartition des diamètres



BOIS FLOTTANT DANS LES COURS D'EAU



→ en fonction de la géométrie, la vitesse de débit dans le canal d'alimentation n'est pas négligeable



BOIS FLOTTANT DANS LES COURS D'EAU



Versuchsanstalt für Wasserbau
Hydrologie und Glaziologie
der Eidgenössischen
Technischen Hochschule Zürich

Mitteilungen

249

Modeling hazards related to large wood in rivers

Isabella Schalko

Zürich, 2018

Herausgeber: Prof. Dr. Robert Boes

ETH zürich

Zitiervorschlag für VAW-Mitteilungen:

Schalko, I. (2018).
Modeling hazards related to large wood in rivers.

VAW-Mitteilungen 249, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW),
(R. M. Boes, ed.), ETH Zürich, Schweiz.

Im Eigenverlag der
Versuchsanstalt für Wasserbau,
Hydrologie und Glaziologie
ETH Zürich
CH-8093 Zürich

Tel.: +41 - 44 - 632 4091
Fax: +41 - 44 - 632 1192
e-mail: info@vaw.baug.ethz.ch

Zürich, 2018

ISSN 0374-0056

Sauf mention contraire, les
textes et images suivants
sont tirés du projet de thèse
de I. Schalko.

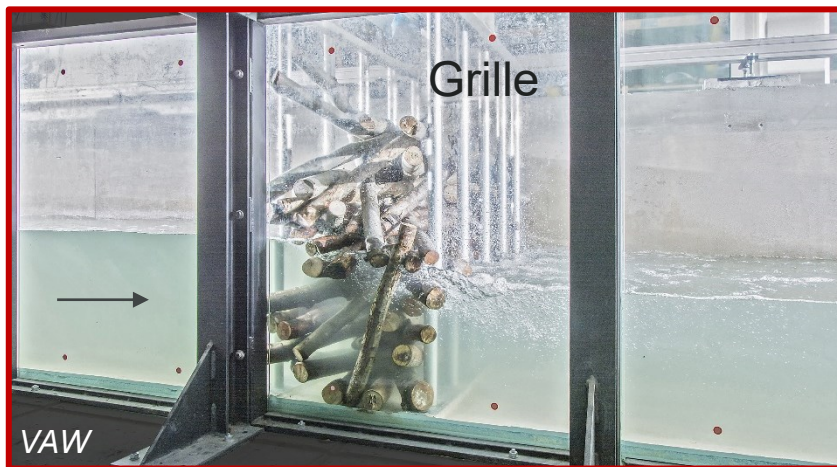


BOIS FLOTTANT DANS LES COURS D'EAU

Embâcle prédéfini (A)

Embâcle naturel (B)

Embâcle naturel (C)



Exhaussement
Effets d'échelle



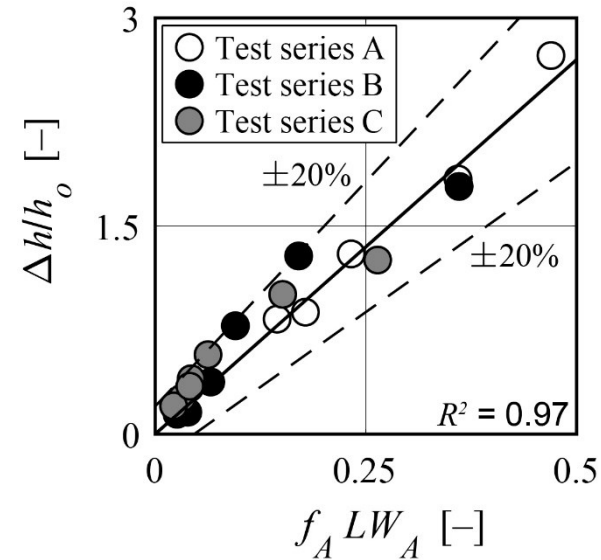
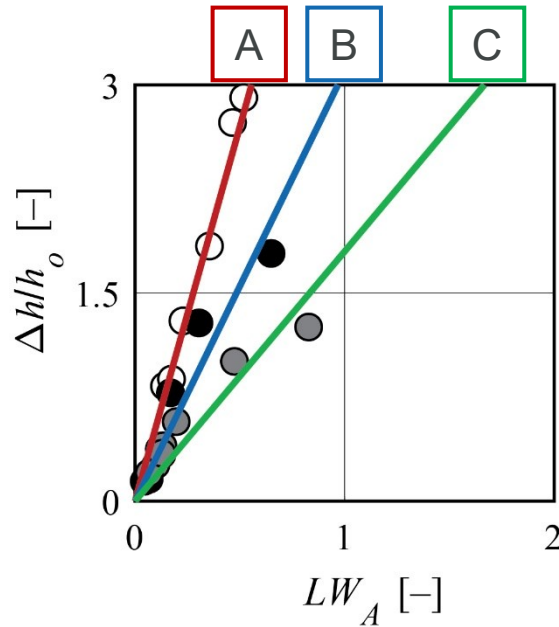
Exhaussement
Processus d'embâcle



Exhaussement
Profondeur d'affouillement



BOIS FLOTTANT DANS LES COURS D'EAU



$$\frac{\Delta h}{h_0} = 5.4 f_A LW_A$$

$$LW_A = F_o \phi^{4/3} u^{1/3} (9FM + 1)$$

f_A = forme d'embâcle (0,3 ... 1,0)

F_o = nombre de Froude

ϕ = compression du bois V_s/V_l (0,2 ... 0,5)

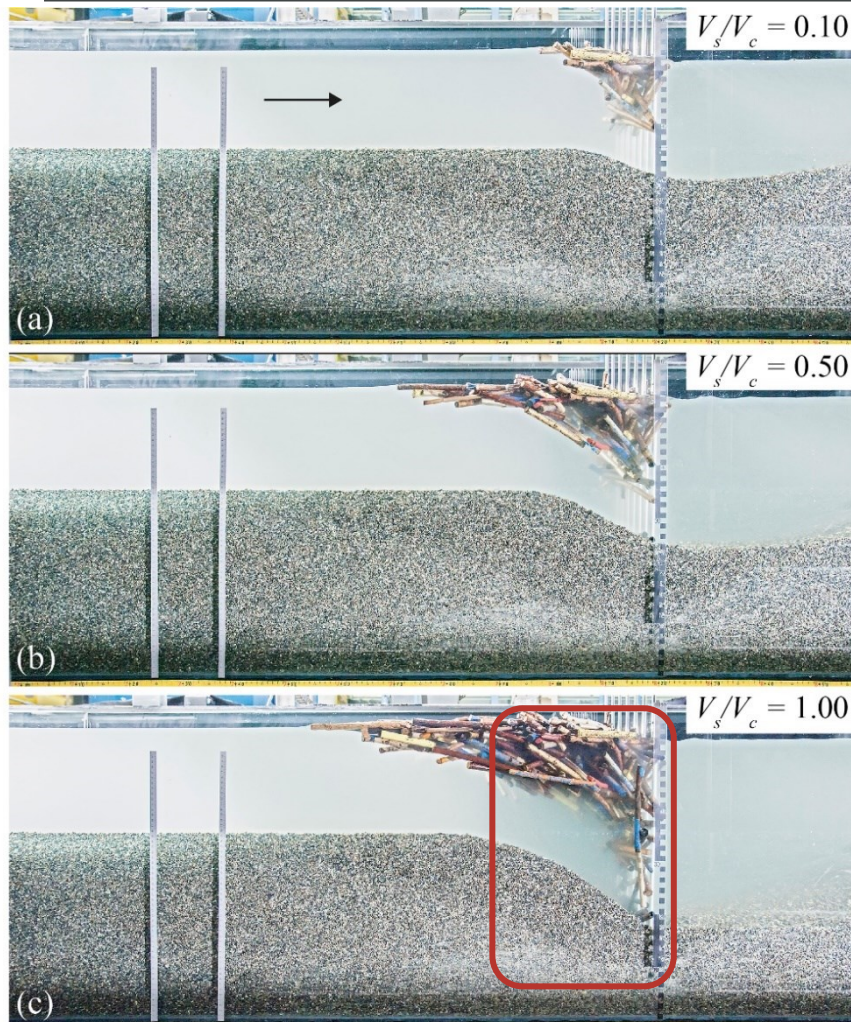
u = déviation du courant L_j/D

FM = proportion de matériaux fins (0,05 ... 0,15)



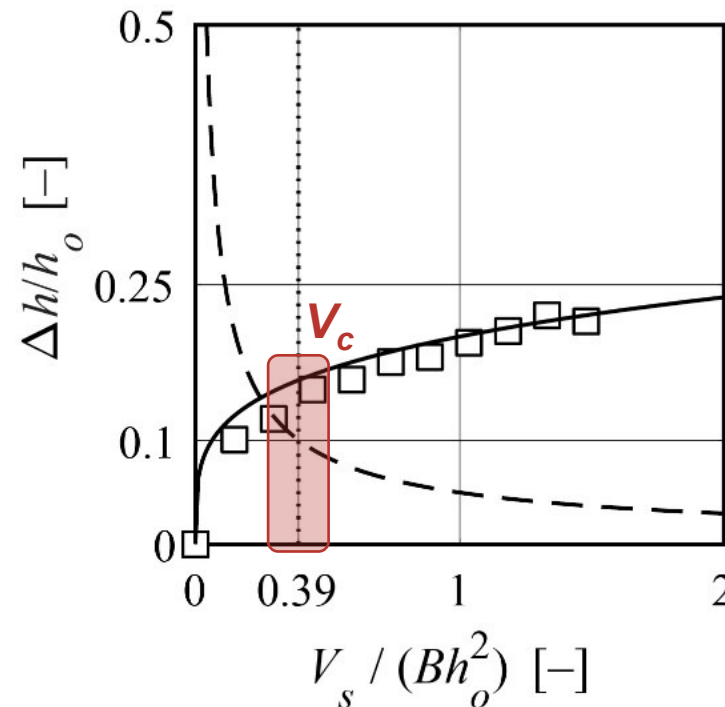


BOIS FLOTTANT DANS LES COURS D'EAU



V_c = volume à l'origine de l'exhaussement déterminant Δh

(volume de bois présent à la grille avant formation d'un tapis de bois flottant)

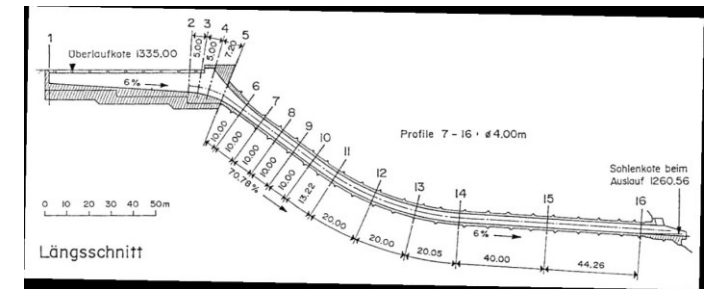


$$\frac{V_c}{Bh_o} = 3.1F_o \left(\frac{h_o}{d_m} \right)^{-0.2}$$



LIMITES D'APPLICATION/RECHERCHES À MENER

- Processus liés au bois flottant différents entre les barrages ($v \approx 0$) et les cours d'eau ($v \gg 0$)
- Effets du bois flottant sur les puits de chute (mis en eau) inconnus (probabilité d'embâcle et exhaussement)
- Probabilité d'embâcle (pertinence d'un examen statistique de grande ampleur pour les ouvrages d'accumulation?)
- Apport et transport de bois flottant (quels sont les processus de réduction, sont-ils pertinents pour les ouvrages d'accumulation?)
- Analyses des événements (enseignements retenus)





Merci de votre attention