



Schweizerisches Talsperrenkomitee
Comité suisse des barrages
Comitato svizzero delle dighe
Swiss Committee on Dams



BOIS FLOTTANT AUX EVACUATEURS DE CRUES DES BARRAGES

Rapport du comité suisse des barrages
sur l'état du problème lié au bois flottant pour les évacuateurs de crues
(EDC) des barrages



Table des matières	Page
Résumé	4
1. Introduction	5
1.1 Motivation et contexte	5
1.2 Objectifs	5
1.3 Méthodologie.....	5
1.4 Exclusion des centrales électriques au fil de l'eau.....	6
1.5 Définition de bois flottant (BF) et de débris flottants	6
1.6 Cadre légal en Suisse	6
2 Concepts de gestion des débris flottants aux barrages	9
2.1 Introduction	9
2.2 Aperçu des structures d'entrée des évacuateurs de barrages.....	9
2.3 Mesures prises dans les bassins versants.....	12
2.4 Passage des débris flottants.....	13
2.5 Enlèvement des débris du réservoir.....	14
3 Réglementation et l'état actuel de la technique	16
3.1 Suisse	16
3.2 International	17
3.3 Modélisation numérique.....	21
4 Sondage et études de cas	22
4.1 Enquête auprès des exploitants de centrales hydroélectriques en Suisse	22
4.2 Etudes de cas	25
5 Critères d'évaluation des EDC de barrages concernant les dangers potentiels	26
5.1 Mobilisation et transport de bois flottant.....	26
5.2 Survenance de bois flottant dans les bassins versants	26
5.3 Influence des réservoirs et des affluents sur l'apport en bois flottant aux évacuateurs de crues des barrages.....	31
5.4 Probabilité d'obstruction des EDC de barrages	32
5.5 Augmentation du niveau d'eau de rétention dû aux obstructions	36
5.6 Forces d'impacts sur les EDC.....	38
6 Mesures.....	39
6.1 Mesures structurelles pour le passage du bois flottant.....	39
6.2 Mesures de Rétention.....	43
6.3 Mesures opérationnelles.....	49
7 Conclusions et recommandations.....	51
8 Références.....	54
Annexe 1: Questionnaire du Sondage	58
Annexe 2: Etudes de Cas	60



En 2012 le comité suisse des barrages (CSB) a décidé d'établir le groupe de travail sur le "bois flottant aux évacuateurs de crue de barrages" ayant pour but d'investiguer la situation actuelle des barrages Suisses en relation à ce phénomène.

Le présent rapport a été préparé par le groupe de travail, approuvé et mis en oeuvre par la commission technique (TECO) du comité suisse des barrages le 15.11.2017.

Membres du groupe de travail :

Robert M. Boes (Président)	VAW, EPFZ
Marius Bühlmann	VAW, EPFZ
Heinz Hochstrasser	Au nom de AWEL, Canton de Zürich
Jean-Claude Kolly	Groupe E
Guido Lauber	Emch + Berger AG
Judith Monney-Ueberl	AWA Canton de Berne
Michael Pfister	LCH, EPFL / HEIA Fribourg (HES-SO)
Riccardo Radogna	Ofima SA
Lukas Schmocker	VAW, EPFZ / Basler & Hofmann AG
Adrian Stucki	AF-Consult Switzerland AG
Fathen Urso	Holinger AG

Photo de couverture: bois flottant obstruant l'évacuateur de crue du barrage de Palagnedra durant la crue de 1978
(Photo: Ofima)

Résumé

En plus du charriage et des matières en suspension, des débris flottants, tels que le bois flottant et d'autres déchets anthropiques sont souvent emportés par les crues, ce qui peut poser des problèmes au niveau des structures d'entrée des évacuateurs de crue des barrages. En particulier, l'obstruction des crêtes ou des vannes des barrages peut considérablement réduire la capacité de décharge et causer des niveaux d'eau trop élevés dans les réservoirs de stockage. Le dégagement de revanche requis ne peut plus être garanti. En plus de l'évaluation du risque d'obstruction, la question fondamentale est de savoir si le bois flottant doit être retenu ou si son passage doit être autorisé. Les deux cas nécessitent une conception correspondante de l'évacuateur du barrage, ou des mesures appropriées au niveau du réservoir.

En l'absence de directives généralement acceptées et valides concernant le traitement des gros débris de bois et flottants au niveau des évacuateurs de barrages, un groupe de travail a été créé en 2013 au sein du comité suisse des barrages. Son objectif est d'évaluer le statut international des règles et pratiques sur le sujet. Dans le cadre de ce projet, une étude a été réalisée sur les débris flottants à 60 barrages suisses. On peut constater que pour la plupart de ces barrages, des débris flottants s'accumulent et sont ensuite éliminés. De plus, des problèmes de débris flottants se sont déjà produits à plusieurs installations. Des études de cas ont été réalisées à ces installations afin d'en tirer les leçons des expériences passées et d'appuyer les décisions futures. En outre, le groupe de travail a récolté des expériences spécifiques ainsi que des directives de pointe en provenance de l'étranger.

Enfin, le groupe de travail a formulé des recommandations à l'intention des exploitants de barrages concernant: (1) l'évaluation des évacuateurs de barrages en ce qui concerne le danger potentiel des débris flottants, c'est-à-dire la quantité de bois flottant dans les bassins versants ou la probabilité de blocage des évacuateurs de crue des barrages; (2) concepts possibles pour la gestion des débris flottants au niveau des barrages (passage ou rétention); (3) possibilités d'optimisation des entrées ainsi que des mesures opérationnelles possibles.

Le principal résultat de ces travaux a été l'élaboration d'un diagramme d'évaluation des dangers. Sur la base des effets observés de bois flottant sur l'hydraulique des évacuateurs de crue des barrages et de leur conception, la probabilité d'obstruction et ses conséquences peuvent être estimées dans un premier temps. Le potentiel de danger qui en résulte pour le barrage peut déclencher des mesures (adaptation de l'évacuateur du barrage, rétention ou transit). Enfin, les recommandations les plus importantes pour les ingénieurs-conseils, les autorités, et les exploitants sont résumées.



1. Introduction

1.1 Motivation et contexte

En plus du charriage et des matières en suspension, des substances flottantes telles que le bois flottant (BF) et d'autres déchets anthropiques sont souvent transportés lors de crues, ce qui peut poser des problèmes à l'entrée des évacuateurs de crue des barrages. En particulier, l'obstruction des crêtes ou des vannes de barrages peut considérablement réduire la capacité de décharge et provoquer des niveaux d'eau trop élevés dans le réservoir. Le dégagement de revanche requis ne peut donc plus être garanti. De plus, en obstruant les entrées des évacuateurs d'un barrage, les débris flottants peuvent entraîner une charge accrue sur ce dernier. Outre l'évaluation du risque de blocage, la question fondamentale est de savoir si le BF doit être retenu ou être libre de transiter. Les deux cas nécessitent une conception correspondante des évacuateurs du barrage ou des mesures appropriées au niveau des réservoirs.

1.2 Objectifs

L'état actuel des directives et des pratiques de traitement des débris sur les barrages au niveau international est discuté dans le présent rapport. Des recommandations sont ensuite formulées à partir d'analyses, d'expériences, et de recherches expérimentales sur les obstructions observées aux évacuateurs de barrages, concernant les aspects suivants:

- Evaluation des évacuateurs du barrage en ce qui concerne le potentiel de danger de débris flottants; Estimation de la probabilité d'obstruction;
- Concepts possibles pour gérer les débris au niveau des barrages, à savoir le passage ou la rétention;
- Possibilités d'optimisation de l'hydraulique de la structure d'entrée;
- Possibilités de mesures opérationnelles.

Le présent rapport résume les résultats des recherches effectuées à ce jour et fournit des recommandations concernant le traitement des débris flottants au niveau des évacuateurs de crue des barrages à l'intention des ingénieurs-conseils, des autorités, et des exploitants de barrages.

1.3 Méthodologie

Afin d'arriver à une affirmation au sens large, les méthodologies suivantes ont été utilisées pour l'étude:

- Revue de la littérature;
- Questionnaires remis aux exploitants d'environ 60 barrages suisses;
- Evaluation d'études de cas antérieurs;
- Présentations par des experts lors de réunions;
- Collecte des expériences des pays voisins

Les conclusions ont été discutées lors des réunions régulières et complétées par les expériences des membres du groupe de travail.

1.4 Exclusion des centrales électriques au fil de l'eau

Les considérations du groupe de travail se limitent aux barrages auxquels s'appliquent les dispositions de la loi fédérale sur les ouvrages d'accumulation (LOA) et de l'ordonnance sur les ouvrages d'accumulation (OSOA) (www.admin.ch). L'applicabilité des recommandations doit être clarifiée au cas par cas pour les plus petits barrages placés dans la LOA, car il existe un potentiel de risque spécifique. Cela est particulièrement vrai pour les bassins de rétention de crues et de laves torrentielles qui possèdent un évacuateur.

Les centrales au fil de l'eau conventionnelles sans capacité de stockage importante (par rapport au ruissellement) ne sont pas couvertes par la présente étude. La dynamique des débris flottants dans les rivières diffère de celle des bassins de stockage en raison de la vitesse d'écoulement plus élevée. Les présentes recommandations ne peuvent donc pas être adoptées sans restriction pour les centrales au fil de l'eau.

1.5 Définition de bois flottant (BF) et de débris flottants

Le bois flottant et les débris organiques flottants naturels peuvent être charriés lors d'une crue en amont du barrage si le bassin versant est recouvert de forêts - et peuvent se présenter sous différentes formes (Lange et Bezzola 2006):

- Troncs et racines d'arbres naturels (bois mort ou vert);
- Bois provenant de l'exploitation forestière ou de la déforestation;
- Bois provenant de la construction de ponts et / ou de structures de berges.

Le bois mort est généralement déjà présent dans les réseaux hydrographiques et est entraîné lors des crues. L'élévation des niveaux d'eau et l'érosion des berges ou des glissements de terrain contribuent également à entraîner le bois vert dans le système d'eau.

En plus des déchets organiques, les masses d'eau contiennent souvent des quantités considérables de débris anthropiques en cas de crue. Celles-ci sont constituées de divers types de déchets volumineux tels que des balles d'ensilage (**Figure 1**) qui sont stockées ou entreposées près de l'eau et peuvent même inclure des bateaux (**Figure 2**), des voitures ou des maisons. Sauf indication contraire, les expressions "bois flottant" et "débris flottants" désignent à la fois les débris naturels et les débris anthropiques. La glace n'est pas prise en compte dans la présente étude.

1.6 Cadre légal en Suisse

L'article 41 de la loi fédérale du 24 janvier 1991 sur la protection des eaux (LEaux) régit les modalités de traitement des débris flottants aux barrages. Cet article stipule que l'exploitant du barrage ne peut remettre à l'eau aucun débris préalablement enlevé. Les propriétaires de barrage sont obligés de collecter périodiquement des débris flottants dans la zone de leurs installations. Des exceptions sont toutefois possibles en accord avec les autorités compétentes. Le plus souvent, l'entretien du tronçon à débit résiduel à l'aval du barrage est transféré à l'exploitant. Un degré élevé de peuplement forestier dans le bassin versant devrait être évité. En cas de crue, le tronçon à écoulement résiduel peut être inondé et cela peut causer d'autres problèmes à l'aval, en raison de l'accumulation de débris flottants. Il est généralement impossible d'éliminer tous les débris flottants lors d'une crue en raison des volumes importants. En outre, si l'évacuateur du barrage est activé, une décharge partielle de débris flottants via l'évacuateur de crue du barrage pourra difficilement être empêchée.

D'un point de vue écologique, il est souhaitable de laisser le bois dans l'eau. La LEaux s'efforce d'être cohérente, non seulement en ce qui concerne les sédiments et les poissons, mais également pour les matières flottantes naturelles. Les bois flottant contribuent à la formation de structures de lits de cours d'eau fournissant des abris, des habitats et des sources de nourriture pour de nombreuses espèces, et améliorent généralement le fonctionnement écologique d'un cours d'eau.



Figure 1: Evacuateur obstrué par des balles d'ensilage à Trondelag, Norvège (Photo: L. Lia, NTNU).



Figure 2: Débris flottants devant l'évacuateur du barrage de Thurnberg sur la rivière Kamp en Basse-Autriche lors de la crue extrême de 2002 (Photo: Office fédéral de l'agriculture et des forêts, de l'environnement et de la gestion de l'eau, Autriche).



2 Concepts de gestion des débris flottants aux barrages

2.1 Introduction

Il y a généralement trois options afin de traiter le problème lié aux débris flottants aux barrages:

- (1) Mesures prises dans le bassin versant pour minimiser l'accumulation de BF;
- (2) Laisser les débris passer à travers le déversoir du barrage;
- (3) Retenir les débris et les retirer ensuite du réservoir.

En fonction du type d'évacuateur de crue du barrage, seule la mesure (2) peut être possible (parfois uniquement après la mise en œuvre de mesures de modification / d'adaptation). Les mesures de type (1) et (3) peuvent également être envisagées du point de vue de l'évaluation des risques, de sorte que les débris doivent être tenus à l'écart de l'évacuateur du barrage. Ces trois types de mesures sont abordés dans les chapitres suivants. Les mesures opérationnelles sont également décrites au chapitre 6.3.

2.2 Aperçu des structures d'entrée des évacuateurs de barrages

En fonction du type d'évacuateurs du barrage, des mesures de type (2) passage des débris, et (3) de rétention et d'enlèvement dans le réservoir sont utilisées. Les types les plus courants de structures d'entrée des évacuateurs de barrages sont illustrés ci-dessous (**Figure 3** à **Figure 8**) et les paramètres les plus importants sont définis schématiquement.

2.2.1 Evacuateurs libres

Ouvertures de déversoirs sans pont / superstructure:

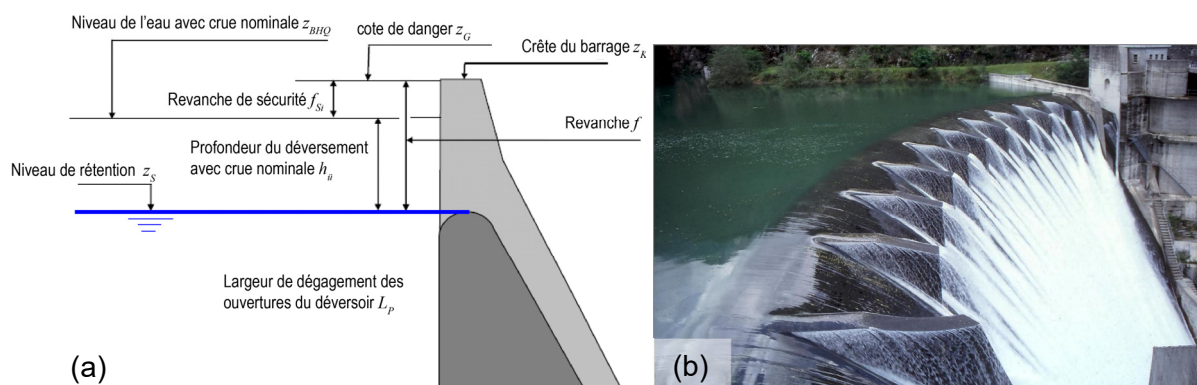


Figure 3: (a) Schéma de la structure d'entrée de l'évacuateur du barrage à déversement libre sans pont / superstructure de déversoir, (b) déversoir du barrage de Palagnedra, Suisse (Photo: Helga Ammann).

Ouvertures de déversoirs avec pont / superstructure:

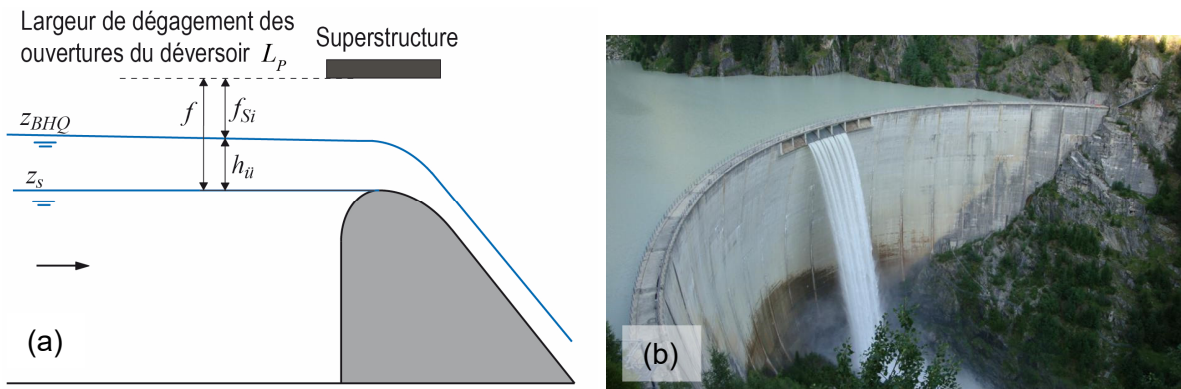


Figure 4: (a) Schéma de la structure d'entrée du déversoir du barrage à déversement libre avec pont / superstructure, (b) structure du canal d'évacuation du déversoir au barrage de Gebidem, Valais, Suisse (Photo: VAW).

f	Revanche
f_{Si}	Revanche de sécurité
L_p	Largeur de dégagement des ouvertures du déversoir
h_u	Profondeur du déversement avec crue nominale
z_{BHQ}	Niveau de l'eau avec crue nominale
z_s	Niveau de rétention

2.2.2 Déversoirs à régulation par vannes

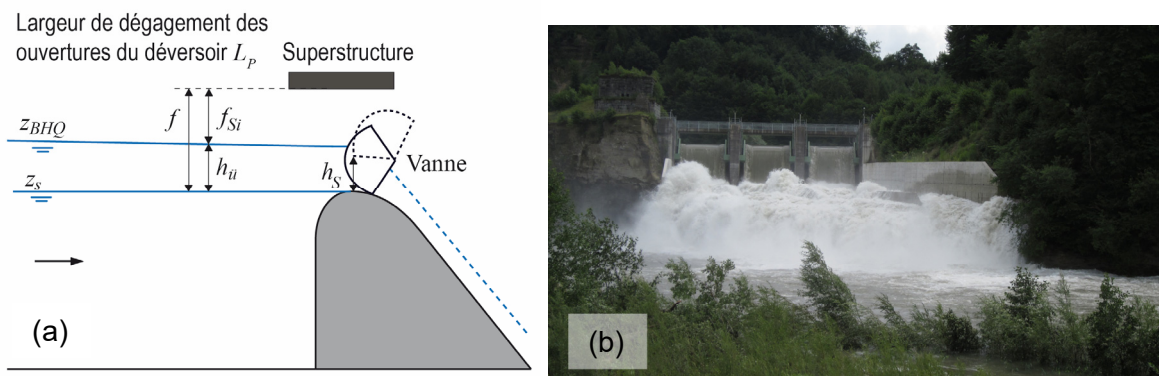


Figure 5: (a) Schéma d'un déversement régulé, (b) déversoir à régulation par vannes du barrage de Maigrage, Suisse (Photo: Group e).

f	Revanche
f_{Si}	Revanche de sécurité
h_s	Hauteur de l'ouverture des vannes
L_p	Largeur de dégagement des ouvertures du déversoir
h_u	Profondeur du déversement avec crue nominale
z_{BHQ}	Niveau de l'eau avec crue nominale
z_s	Niveau de rétention



2.2.3 Evacuateurs en tulipe

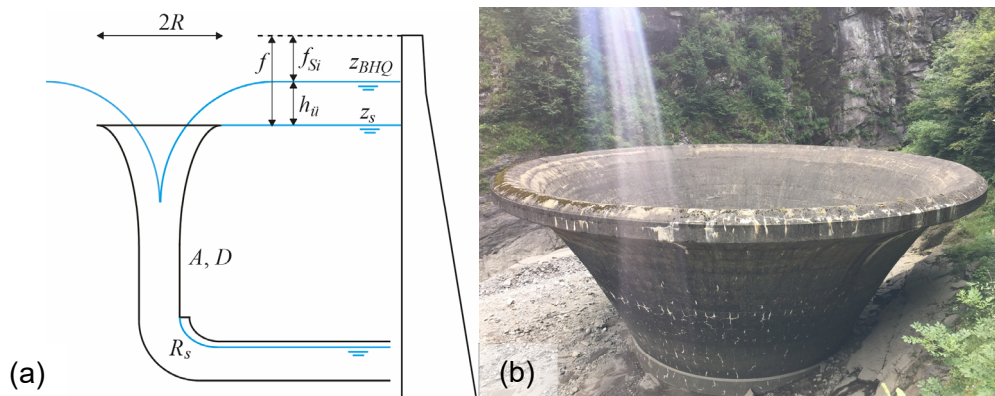


Figure 6: (a) Schéma d'un évacuateur en tulipe (b) d'un évacuateur en tulipe au barrage de Malvaglia, Suisse (Source: VAW).

A	Aire transversale du puits
D	Diamètre du puits
f	Revanche
f_{Si}	Revanche de sécurité
$h_{\ddot{u}}$	Profondeur de déversement lors de la crue nominale
z_{BHQ}	Niveau d'eau lors de la crue nominale
z_s	Niveau de rétention
R	Rayon de l'évacuateur
R_s	Rayon de courbure du puits

2.2.4 Déversoirs en touches de piano

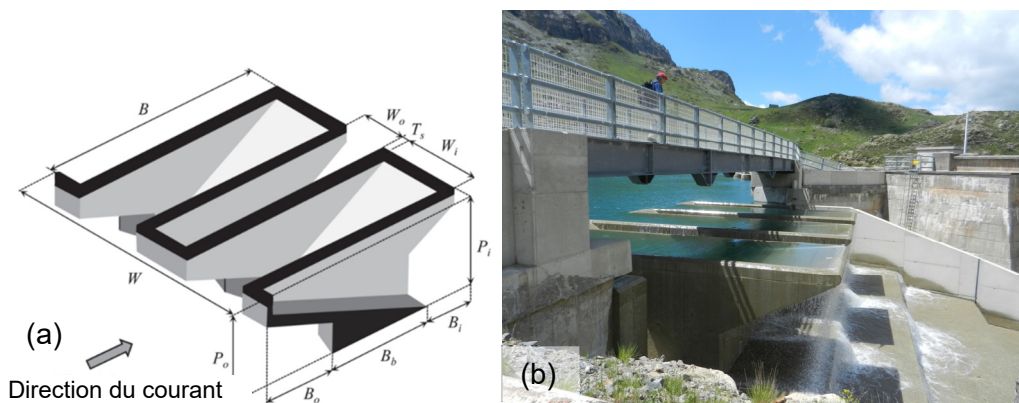


Figure 7: (a) Schéma de la structure d'entrée du déversoir en touches de piano, (b) déversoir en touches de piano du barrage de Gloriette en France (Photo: La Fourmi des Montagnes)

B	Longueur en direction du courant
L	Longueur rectiligne totale de la crête
P	Hauteur du mur
T_s	Epaisseur du mur
W	Largeur totale du déversoir
Index b	Empreinte
Index i	Structure d'admission (Inlet)
Index o	Structure d'évacuation (Outlet)

2.2.5 Evacuateur du déversoir latéral et canal latéral

Avec ou sans vannes de régulation

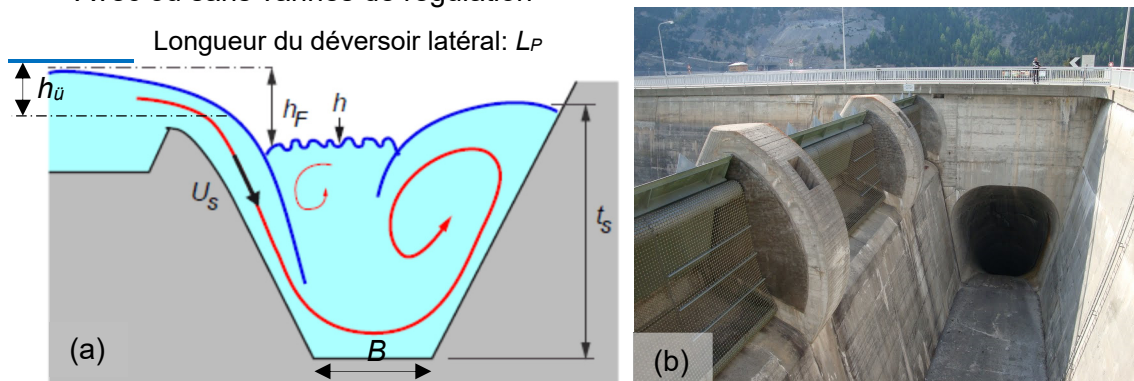


Figure 8: (a) Schéma d'un évacuateur de déversoir latéral, (b) évacuateur de déversoir latéral à régulation par vannes du barrage Punt dal Gall, Suisse (Source: Michael Mülheim)

B	Largeur de fond du canal latéral
h	Débit du canal latéral
h_u	Profondeur de déversement
F	Profondeur de déversement en relation à la profondeur de débit du canal latéral
L_p	Longueur du déversoir latéral
t_s	Profondeur de rétention du canal latéral
U_s	Vitesse du débit d'admission latéral

2.3 Mesures prises dans les bassins versants

Afin de minimiser la quantité de bois flottant dans le bassin versant, des mesures de protection préventives sont nécessaires (Covi 2009). Pour ce faire, il faut éviter les glissements de terrain et l'érosion des berges. À moyen terme, il faudrait créer des berges et des pentes stables aux abords des rivières, ainsi que des ressources forestières bien structurées à proximité des rives du réservoir. Le sol doit être retenu par les racines des arbres. Les arbres stables et bien ancrés doivent être préservés. Par contre, les arbres susceptibles de tomber ou qui ne sont pas bien ancrés devraient être éliminés. Les arbres dans les lits de rivières ainsi que le bois mort doivent être laissés et / ou enlevés conformément aux mesures appropriées de protection contre les crues. De telles opérations de nettoyage peuvent être en conflit avec les avantages écologiques de laisser du bois dans les rivières.

La gestion des bassins versants et des berges de réservoirs est généralement difficile, techniquement complexe et souvent très coûteuse. Afin de répondre aux besoins à la fois des mesures de sécurité et de l'écologie, une coopération étroite entre les services forestiers, les agents de protection de la nature et les autres parties prenantes est d'une grande importance.

Des systèmes de rétention pour le bois flottant en tant que mesures techniques peuvent être fournis dans les bassins versants et pour les rivières en amont des barrages. La rétention de bois flottant peut être réalisée directement dans la rivière ou dans une zone de rétention dédiée à cela, tel que dans des bassins de rétention de débris et / ou dans des canaux utilisant des râteliers, ou des filets pour le bois flottant,



ainsi que des systèmes de rétention sélective pour le bois flottant etc. (**Figure 9**; Zollinger 1983, Bänziger 1990, Rimböck 2003).

Sur des terrains difficiles d'accès, le coût du transport aérien de troncs d'arbres par hélicoptère est prohibitif. Dans de tels cas les troncs sont plutôt coupés à des longueurs pas dangereuses (comme pratiqué par exemple dans le canton de Berne). Il est évident que, malgré la gestion forestière et les importantes mesures de rétention du bois dans le bassin versant, la présence de débris flottants en cas de crues ne peut être exclue.

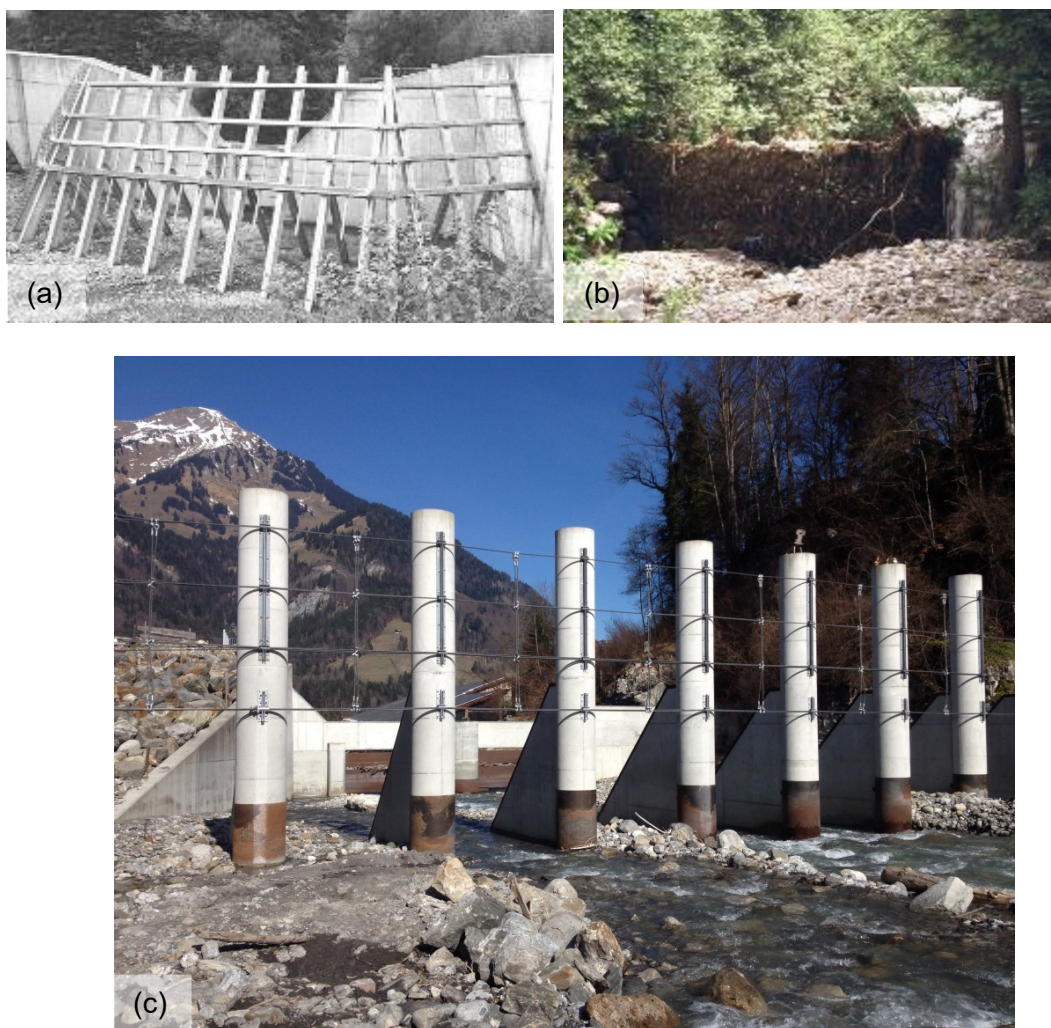


Figure 9: Rétention de bois flottant au moyen de (a) râteliers dans le bassin de rétention de Sachseln, canton d'Obwald (photo: VAW), (b) d'un filet de câbles à Faukengraben, en Haute-Bavière, Allemagne (Photo: Institut d'ingénierie hydraulique et des ressources en eau, TU Munich) et c) combinaison de râteliers et de filets à câbles pour le bois flottant et autres débris sur la rivière Chiene, canton de Berne (Photo: Emch + Berger AG).

2.4 Passage des débris flottants

Lors de fortes crues avec de grandes quantités de débris flottants, la seule option est de faire passer les débris en aval, car le bois flottant est transporté par le courant dans le réservoir vers l'évacuateur de crue du barrage. Le passage des débris flottants n'est praticable que si la possibilité d'obstruction du déversoir (**Figure 10a**) est exclue. À

cette fin, soit les ouvertures de déversement de la structure d'entrée de l'évacuateur de crue doivent être suffisamment grandes (voir chapitres 3.1, 3.2 et 5.3), soit il doit y avoir une structure de déversoir libre, suffisamment large, et sans superstructures (**Figure 10b**). La conception structurelle du déversoir du barrage doit faciliter le passage du BF (surfaces lisses, formes arrondies, entrées en forme de trompette). Les troncs d'arbres flottant transversalement par rapport au sens du courant peuvent être réorientés au moyen d'un pilier placé devant l'évacuateur de crue du barrage (voir chapitre 6.1.2). Cela permettrait aux troncs d'arbres de passer à travers le déversoir du barrage. Les mesures opérationnelles possibles telles que le contrôle du déversoir par la régulation des vannes de l'évacuateur de crues sont décrites au chapitre 6.2.

Bien que le passage de débris flottants atténue le risque de blocage du déversoir du barrage, ce risque peut simplement être déplacé vers l'aval. Par conséquent, il convient d'examiner les effets du passage de débris flottants sur le tronçon en aval du barrage, en particulier en présence de sections de rivière étroites, de ponts ou d'autres structures susceptibles d'augmenter le risque d'obstruction.



Figure 10: a) Blocage de la structure d'entrée de l'évacuateur de crue du barrage (évacuateur de crue avec pont de déversoir) au barrage de Palagnedra, canton du Tessin, 1978; (b) nouvelle structure d'entrée de l'évacuateur du barrage sans pont de déversoir (Photos: Ofima).

2.5 Enlèvement des débris du réservoir

Les réservoirs permettent généralement l'enlèvement des débris accumulés, pour autant que l'accessibilité aux grosses machines soit assurée. Les faibles vitesses d'écoulement permettent aux bateaux de collecter les débris flottants. Cela peut



empêcher le BF d'atteindre l'évacuateur du barrage en cas de crue ou de couler et d'obstruer et / ou nuire au fonctionnement des conduites forcées ou des voies d'évacuation aux niveaux inférieurs. Le bois vert flotte généralement pendant plusieurs mois (Zollinger, 1983), ce qui signifie qu'il est suffisant de le retirer deux fois par an. Le BF n'est généralement pas réparti sur l'ensemble du réservoir, mais est poussé par le vent dans les baies ou sur certaines berges. Les chaînes flottantes se sont révélées utiles pour la collecte de bois à la surface des réservoirs. Cependant, les forces sont généralement trop fortes lors de crues en raison de la quantité élevée de BF, et les chaînes flottantes ne sont alors pas très fiables, et ont également déjà aggravé les problèmes lorsqu'elles se sont rompues par le passé.

En cas de crues impliquant une grande quantité de débris flottants, il est presque impossible de tout enlever, car les performances des excavatrices ou des râteliers nettoyeurs sont généralement trop faibles (**Figure 11**). Le dégagement d'un déversoir bloqué à l'aide d'excavatrices est pratiquement impossible en raison de la quantité de débris flottants, de la vitesse d'écoulement et du coincement des débris. Il est donc conseillé d'empêcher tout débris d'entrer dans l'évacuateur du barrage dès le début, s'il ne peut pas passer au travers. Les débris flottants qui ont été interceptés peuvent être enlevés du réservoir après la crue, avec les coûts associés pour leur enlèvement, leur transport et leur élimination.



Figure 11: Enlèvement de débris flottants avec des excavatrices au barrage de Yarzagyo, lors de la crue de 2015 au Myanmar (Photo: M. Wieland).

3 Réglementation et l'état actuel de la technique

Des directives et des réglementations concernant le problème des débris flottants au niveau des évacuateurs de crues de barrages sont disponibles dans différents pays. Dans la plupart des cas, il s'agit de dimensions minimales à respecter pour les déversoirs du barrage. Les équations et les recommandations suivantes ont été largement dérivées sur la base d'expériences avec des modèles hydrauliques, et d'expériences réelles. Les formules respectives se limitent donc aux conditions de simulation ou à des barrages spécifiques, mais peuvent être utilisées pour de premières estimations grossières.

3.1 Suisse

Selon la documentation de base sur la sécurité des ouvrages d'accumulation (OFEN 2016), les évacuateurs et les ouvertures de décharge devraient être suffisamment larges pour que les obstructions de déversoirs dues aux arbres et autres débris flottants puissent être évitées. Selon les expériences, une largeur de 10 m peut, dans la mesure où les conditions topographiques et spatiales le permettent, être jugée suffisante, car des observations ont révélé que les troncs d'arbres dans les rivières et les cours d'eau de montagne transportés par des crues sont rapidement réduits à des longueurs maximales d'environ 10 m. Dans les réserves naturelles / parcs nationaux ou dans les cours d'eau naturels non protégés de montagne, la situation en ce qui concerne les débris flottants et ses dimensions devrait être évaluée au cas par cas. Pour les barrages situés dans les rivières principales et en plaine, la largeur de l'évacuateur de crue devrait être supérieure à 10 m.

Lors de la conception des évacuateurs du barrage, un dégagement de revanche suffisant de 1,5 à 2 m au moins doit être disponible sous un pont de déversoir ou autre superstructure. Si nécessaire, un pont de déversoir devrait être conçu de manière à pouvoir être enlevé ou emporté en cas de crues exceptionnelles.

L'OFEN (2016) formule des recommandations pour la largeur de dégagement minimale L_p et la hauteur de dégagement minimale H_b des ouvertures de l'évacuateur de crue du barrage en fonction de la longueur probable des arbres H_t (**Figure 12**):

$$L_p \geq 0.8H_t \quad (1)$$

$$H_b \geq 0.15H_t \quad \text{pour } L_p > 1.1H_t \quad (2a)$$

$$H_b \geq 0.2H_t \quad \text{pour } L_p \leq 1.1H_t \quad (2b)$$

Ces recommandations sont basées sur l'étude de Godtland & Tesaker (1994). La longueur potentielle des arbres H_t peut être estimée sur le terrain sur la base du peuplement forestier dominant. Des informations correspondantes sont également disponibles dans l'inventaire national suisse des forêts (www.lfi.ch). Les longueurs d'arbres observées lors de crues dans le passé peuvent également servir de référence (Bezzola & Hegg 2007, 2008).

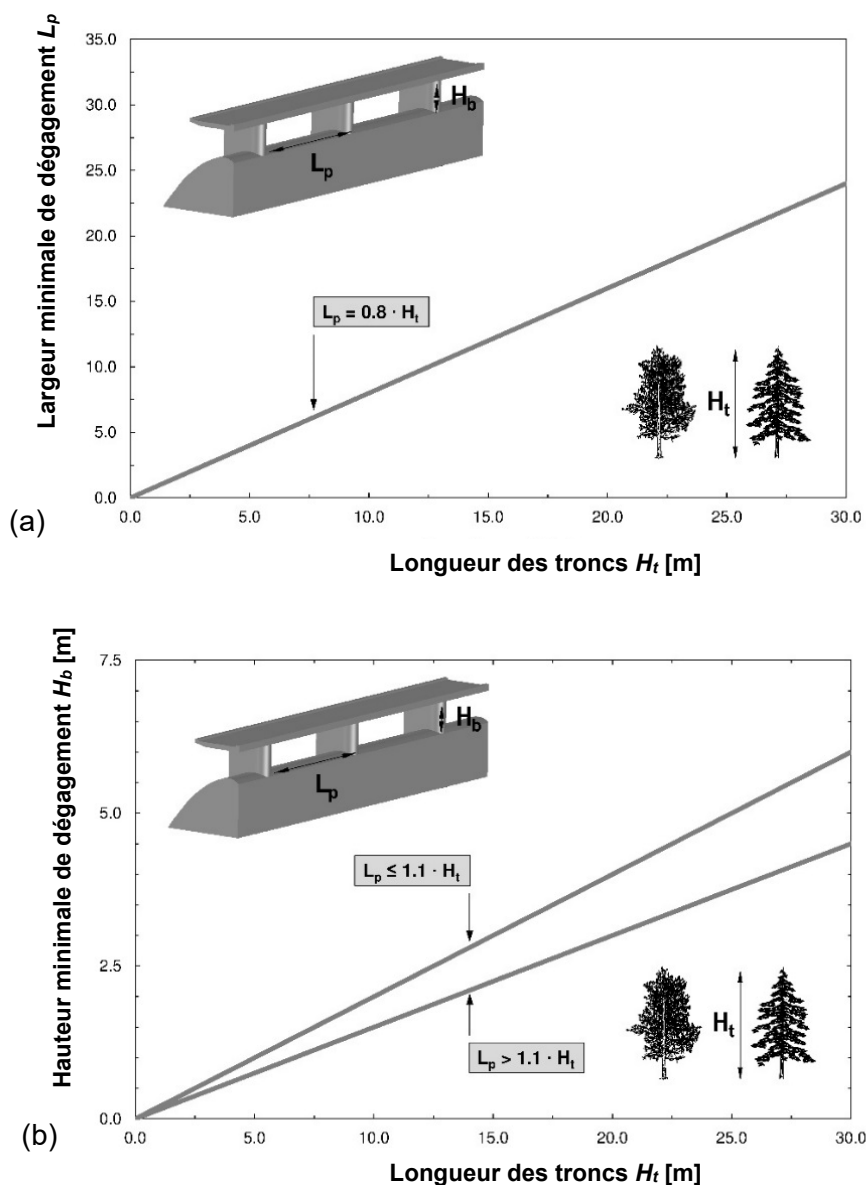


Figure 12: Caractéristiques permettant de déterminer (a) la largeur minimale de dégagement des ouvertures du déversoir L_p ; (b) la hauteur minimale de dégagement de l'ouverture du déversoir H_b .

3.2 International

3.2.1 France

Le Comité français des barrages et réservoirs (Cfbr) estime que les déversoirs de barrages avec ponts et superstructures sont sujets aux obstructions pour les niveaux de crues nominales conçus par le BHQ (HQ_{1000} pour les barrages en béton et en briques, HQ_{5000} pour les barrages poids, et $HQ_{10'000}$ pour les barrages en remblai), si l'un des critères suivants s'applique (Cfbr 2013):

$$\begin{array}{ll}
 h_{Kr} < 0.5 \text{ m} & (3a) \\
 f_{ii} < 2 \text{ m} & \text{si } 0.5 \text{ m} \leq h_{Kr} \leq 2 \text{ m} \quad (3b) \\
 f_{Si} < 1.5 \text{ m} & \text{si } h_{Kr} > 2 \text{ m} \quad (3c)
 \end{array}$$

où f_{ii} = distance verticale la plus courte entre le niveau de l'eau et le bord inférieur de la structure du déversoir, h_{Kr} = hauteur du déversement dans la section respective (f_{ii}) à la crête du barrage et f_{Si} = revanche de sécurité en amont de la courbe de rabattement (**Figure 13**). En règle générale, $h_{Kr} \approx h_{cr} \approx 2/3 h_{ii}$, avec h_{cr} = profondeur de débit critique, qui se produit généralement à la crête du barrage.

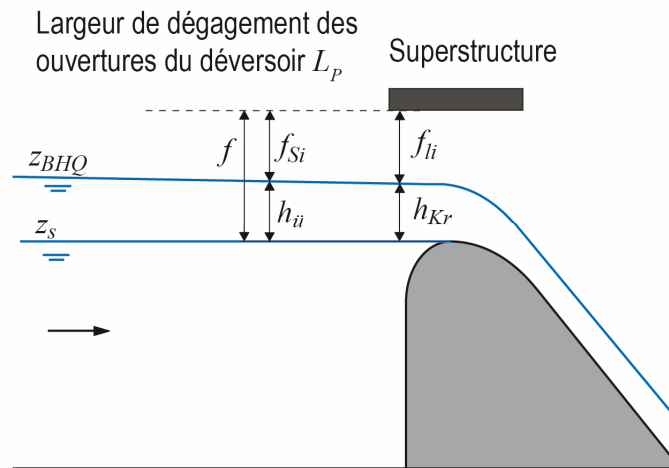


Figure 13: Schéma de la structure d'admission de l'évacuateur de crue du barrage avec pont de déversoir traversant.

Pour les structures nouvellement construites, une largeur de dégagement minimale de 10 à 15 m de l'ouverture du déversoir est recommandée. Selon Cfbr (2013), lors de la détermination de la largeur du déversoir requise L_p , l'altitude z [AMSL] du barrage doit être prise en compte (**Figure 14**):

$$\begin{array}{ll}
 L_p \geq 15 \text{ m} & \text{pour } z \leq 600 \text{ m s.m.} \quad (4a) \\
 L_p \geq 20.5 - 11z/1200 & \text{pour } 600 < z \leq 1800 \text{ m s.m.} \quad (4b) \\
 L_p \geq 4 \text{ m} & \text{pour } z > 1800 \text{ m s.m.} \quad (4c)
 \end{array}$$

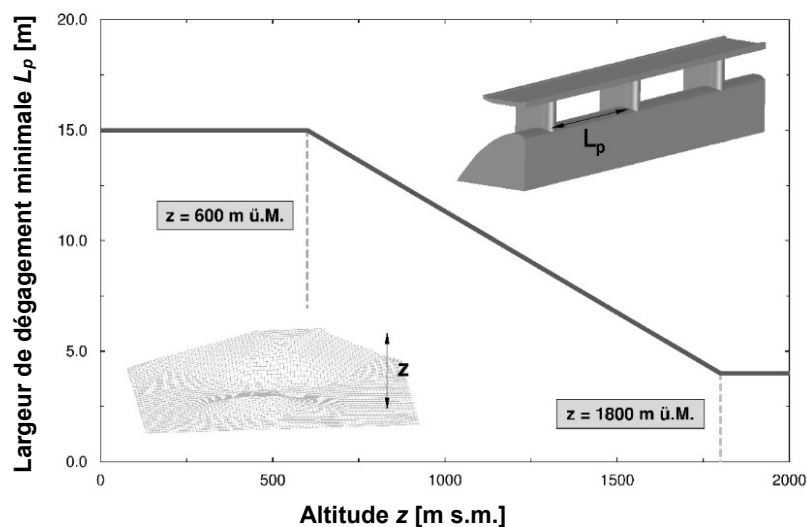


Figure 14: Largeur de dégagement minimale requise de l'ouverture du déversoir L_p en fonction de l'altitude z du barrage (selon Cfbf 2013).

3.2.2 Autriche

Il n'y a pas de réglementation générale concernant les débris flottants aux évacuateurs de crues de barrages en Autriche. Les évacuateurs de crues de barrages dont la largeur du déversoir $L_p < 20$ m sont toutefois considérés comme sujets aux obstructions. Des ouvertures de déversoir de 15 m de largeur sont acceptables en fonction du bassin versant et de la hauteur de dégagement H_b (s'il y a un pont de déversoir). Les largeurs de déversoir de plus petites dimensions sont considérées comme susceptibles aux obstructions dans tous les cas (Czerny 2015).

3.2.3 Allemagne

Il n'y a pas de réglementation générale concernant les débris flottants aux évacuateurs de crue de barrages en Allemagne. La Ruhrverband a mené une enquête sur l'obstruction des EDC de barrages par des débris flottants lors des crues parmi 23 opérateurs et pour 83 barrages (Roesler & Bettzieche, 2000). L'enquête a montré que dans 88% des barrages, aucune obstruction des EDC de barrages n'avait été détectée et que la présence de BF avait été très faible jusque-là. Des obstructions avaient cependant déjà été observées à 10 barrages, mais jamais plus de 10% des EDC des barrages n'avaient été obstrués. L'enquête n'a pas permis d'établir une menace réaliste de débris flottants pour les EDC de barrages. Il convient de noter que les principales crues survenues après 1999 en Allemagne ne sont pas prises en compte dans cette étude. Ce problème aurait autrement probablement plus de poids aujourd'hui. La rupture du barrage de Glashütte en août 2002 est attribuée, entre autres, à une structure d'évacuation de fond obstruée (Bornschein et al. 2002).

3.2.4 Italie

Les recommandations suivantes s'appliquent en Italie en ce qui concerne le fonctionnement des EDC de barrages (Ruggeri 2015):

- Le déversoir du barrage doit être conçu de manière à garantir le passage de débris flottants entre le niveau de l'eau et toute superstructure.

- **Aux déversoirs régulés avec n vannes**, un nombre entier de vannes est supposé être défaillant pour le calcul de la capacité de déversement, à savoir:
 $\geq 0,5n$ aux barrages en remblai,
 $\geq 0,2n$ aux barrages en béton.
- Dans ce cas, il doit être démontré que lors de la décharge d'une crue nominale BHQ (HQ1000 pour les barrages en béton, HQ3000 pour les barrages en remblai), le seuil de sécurité réel f_{Si} (**Figure 5**) est toujours d'au moins $f/3$ en cas d'accumulation de débris flottants, c'est-à-dire $f_{Si} \geq f/3$.
- **Pour les évacuateurs de crue avec vannes à écoulement par en-dessous**, il faut supposer, pour le calcul de la capacité de débit, qu'au moins 30% de l'ouverture de la vanne h_S (**Figure 5**) est obstruée. En cas de largeur de dégagement de l'ouverture du déversoir $L_p < 12$ m, il faut supposer qu'au moins 50% de l'ouverture de la vanne h_S est obstruée.
- Pour les évacuateurs à crête fixe avec déversement, il faut supposer, pour le débit nominal, qu'au moins 20% de la hauteur de dégagement de revanche f (**Figure 4**) est obstruée. En cas de largeur de dégagement de l'ouverture du déversoir $L_p < 12$ m, au moins 50% de la hauteur de dégagement de l'ouverture du déversoir f doit être considérée comme obstruée.

3.2.5 Norvège

En Norvège, des expériences par modélisation (Godtland & Tesaker, 1994) ont examiné le risque d'obstruction d'évacuateurs de crue de barrages avec déversoir fixe et de ponts à piliers multiples. Les recommandations suivantes ont été dérivées des simulations du modèle et adoptées par l'OFEN (2016) (voir chapitre 3.1):

- La largeur minimale de l'évacuateur de crue du barrage, L_p , doit être au moins égale à 80% de la longueur prévue des troncs H_i ;
- La hauteur minimale de dégagement H_b de l'évacuateur de crue du barrage (**Figure 12b**) doit être au moins égale à 15% de la longueur prévue des troncs H_i ;
- S'il n'y a pas de superstructures, les arbres passent au-dessus de la crête du déversoir pour des profondeurs de débit supérieures à env. 10-15% de la longueur des troncs H_i (voir chapitre 5.3.2).

3.2.6 Comparaison des réglementations

Les valeurs générales concernant les dimensions minimales des ouvertures de déversoirs, conformément aux recommandations autrichiennes peuvent être utilisées comme une règle approximative. Les directives de l'autorité de surveillance suisse OFEN ont été extraites des recommandations norvégiennes, qui reposent sur un seul modèle de recherche. La base de données permettant de déterminer les dimensions minimales requises des ouvertures de déversoirs est donc très modeste. Dans les directives françaises, la largeur minimale des ouvertures de déversoirs dépend de l'altitude du barrage et des longueurs de troncs existants. Appliquées directement à la Suisse, les conditions climatiques partiellement différentes (température, précipitations, etc.), qui sont très déterminantes pour la croissance des arbres, rendent cette méthode peu significative. En Italie, non seulement les critères géométriques sont pris en compte, mais également les critères de capacité de débit. On suppose qu'il existe un certain degré d'obstruction, ce qui semble réaliste et significatif.

Les dimensions minimales requises des EDC des barrages dépendent principalement des dimensions du BF. La longueur des arbres joue un rôle clé en particulier dans les risques d'obstruction des EDC des barrages. Étant donné que des considérations



relatives à la sécurité des EDC des barrages lors de crues extrêmes sont en jeu, une hypothèse prudente devrait être émise concernant les longueurs maximales prévues des arbres.

3.3 Modélisation numérique

Les premières approches en matière de simulations numériques de systèmes fluviaux complexes et du comportement des flux de végétation datent généralement de la période allant de 1990 à 2000 comme le montrent Bertoldi et Ruiz-Villanueva (2015). Ces approches se sont souvent concentrées sur l'interaction entre la végétation, la croissance de biomasse, des types de bois, de la morphologie des rivières, et de l'hydrodynamique simplifiée. L'échelle de référence est souvent la totalité du bassin versant (Lancaster et Hayes, 2001). Les structures techniques et leur comportement de débit complexe ont rarement été pris en compte. Ces études portent principalement sur des bassins fluviaux semi-naturels et naturels. Les approches récentes prennent en compte la mobilisation du bois, examinant l'interaction entre le tronc et le flux, et simultanément pour différents types de bois (Braudrick et Grant 2000, Bocchiola et al. 2002). Les résultats des simulations numériques sont essentiellement des projections en 1D ou 2D simplifiées, et rarement comparées aux expériences avec des modèles physiques. Une simulation hydrodynamique déterministe a été rapportée par Ruiz-Villanueva et al. (2014) selon lesquels les calculs hydrodynamiques en 2D étaient corrélés à la mobilisation du bois.

Représenter la géométrie du bois dans un modèle numérique est un défi. Allen & Smith (2012) ont étudié l'incidence des simplifications géométriques sur les interactions des flux. Ils se sont intéressés aux habitats des poissons dans les systèmes racinaires, mais pas aux interactions entre les troncs et les constructions techniques.

En plus de la mobilisation de BF, le processus d'obstruction au niveau des ponts a été modélisé numériquement (Mazzorana et al 2010, Ruiz-Villanueva et al. 2014). Les simulations de processus d'obstruction aux ponts avec des modèles et des prototypes pourraient être reproduites de manière satisfaisante avec le modèle numérique. Plusieurs simulations du même scénario avec des dimensions de bois et de ponts différentes permettent de tirer des conclusions sur la probabilité d'obstruction. La modélisation numérique peut donc être utilisée pour l'analyse des risques au niveau des barrages, par ex. pour l'identification précoce des EDC de barrages qui risquent d'être obstrués.

Cependant, la fiabilité des modèles numériques concernant les processus hydrodynamiques d'obstructions est encore faible. Les calculs hydrodynamiques lors d'obstructions ne sont ajustés que progressivement. De plus, la capacité résiduelle des évacuateurs de crue des barrages en cas d'obstruction et les remous ne sont pas représentés avec suffisamment de précision.

La précision des simulations numériques réside dans la précision de la modélisation de présence de BF et de sa mobilisation dans le bassin versant jusqu'au réservoir, et dans la prévision de la direction probable où le bois dérivera dans le réservoir en fonction du vent et des vagues. La valeur informative des modèles numériques pour les processus d'obstruction à petite échelle et l'impact du bois sur les EDC des barrages est encore très vague.

4 Sondage et études de cas

4.1 Enquête auprès des exploitants de centrales hydroélectriques en Suisse

En décembre 2013, des questionnaires ont été distribués à 60 exploitants de centrales hydroélectriques à réservoirs (pas de centrales au fil de l'eau), dont 52 ont été renvoyés dans leur intégralité. Le questionnaire se trouve en annexe 1 et est structuré comme suit: La première partie contient des informations sur le barrage, les évacuateurs de crues et l'hydrologie. La deuxième partie traite de l'accumulation et du traitement des problèmes et des dommages dus au bois flottant. Les résultats de l'enquête peuvent être résumés comme suit:

- Sur 46 des 52 barrages (88%), il y a présence de bois flottant;
- Le bois flottant est enlevé sur 32 de ces 46 installations (70%);
- Sur 18 de ces 46 installations (39%), le bois flottant est évacué par les évacuateurs de crue (dont 7 éliminent également les débris flottants);
- Les volumes de débris enlevés sont connus pour 5 installations;
- Les dimensions de BF sont connues pour 7 installations (dont le volume est également connu pour l'une d'entre elles);
- Sur 8 des 52 installations (17%), des problèmes (généralement des obstructions) ont déjà été observées. Des dégâts ont été signalés pour 5 installations.

La **figure 15** présente un aperçu géographique de la situation en Suisse. Sur les 52 barrages de cette étude, tous ont un bassin versant couvert de forêts (altitude <2000 m s.m.). Ainsi, le BF est présent à pratiquement tous les barrages qui se situent sous la limite des arbres.

Étant donné que seuls 8 des 52 barrages ont déjà subi des dommages, une évaluation statistique détaillée du potentiel de risque était difficile à réaliser en raison de la petite taille de l'échantillon. En outre, de nombreux petits barrages n'ont pas été inclus dans l'étude (par exemple, le réservoir de Schlattli, où des problèmes ont été signalés en 2010, voir annexe 2).

Les études de cas présentées au chapitre 4.2 montrent que la situation est souvent incontrôlable lorsque les quantités de BF sont importantes, et que les risques d'obstruction et les dommages augmentent rapidement. Une comparaison avec les recommandations indique également que de nombreux EDC de barrages ne respectent pas les dimensions minimales recommandées. Il faut donc supposer qu'aucune crue majeure contenant de grandes quantités de BF n'a eu lieu dans la plupart des barrages. Par conséquent, aucun problème n'a été observé jusqu'à présent. Avec la survenance de BF similaire à celle de Palagnedra en 1978 ou de Schlattli en 2010, de nombreux EDC de barrages actuels en Suisse seraient probablement obstrués.

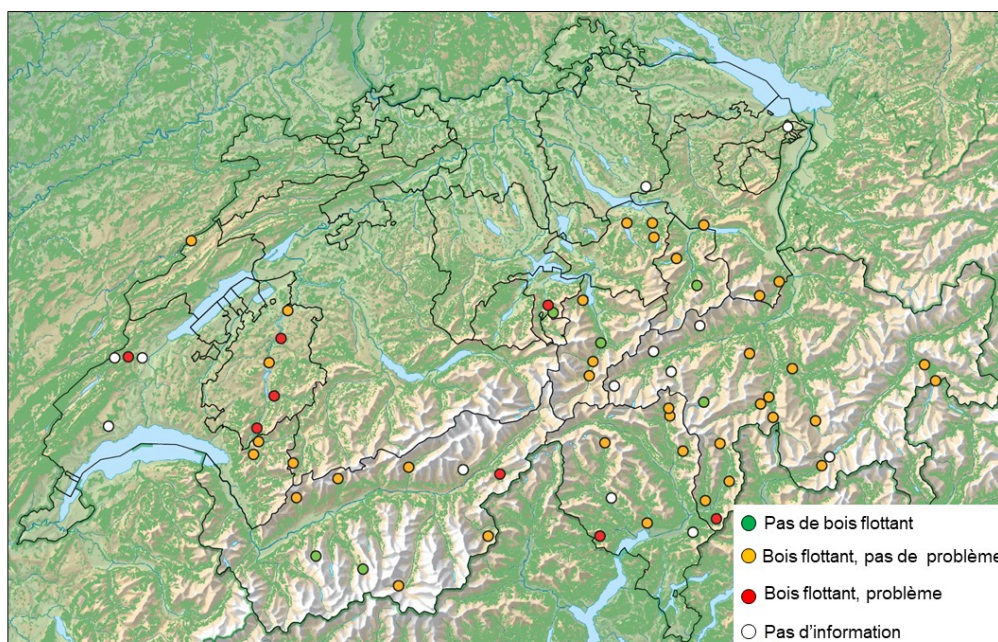


Figure 15: Résultats du sondage auprès des opérateurs de barrages; Aucun retour n'a été obtenu de huit opérateurs de barrages.

Les retours reçus ont été évalués afin d'établir des corrélations entre les principales caractéristiques du barrage et les problèmes causés par le BF. Parmi les données disponibles, le type d'évacuateur de crue du barrage, la taille du bassin versant et l'altitude du barrage ont été choisis comme critères. Les **figures 16** et **17** illustrent les effets de ces critères sur la survenue de BF ainsi que l'apparition de problèmes aux évacuateurs de crue des barrages. Les déclarations suivantes peuvent en être dérivées:

- Les évacuateurs en tulipe présentent généralement plus de problèmes que d'autres types d'entrées d'évacuateurs de crue. Les systèmes à déversement libre sont les moins sensibles. En raison de la conception de leur construction, il faut s'attendre à un risque d'obstruction plus élevé pour les évacuateurs en tulipe.
- Les problèmes liés au BF sont survenus quelle que soit la taille du bassin versant. Cependant, les bassins versants plus grands présentent un plus grand nombre de problèmes, car le potentiel d'accumulation de BF augmente avec la taille du bassin versant, entre autres facteurs (section 5.1.1). Étant donné que de faibles quantités de BF peuvent déjà poser des problèmes aux évacuateurs de barrages, le potentiel de risque pour ces derniers situés dans de plus petits bassins versants n'est pas nécessairement plus faible.
- Les barrages situés à basse altitude sont généralement plus vulnérables. Il y a deux raisons à cela: il y a généralement une couverture forestière plus large dans ces bassins versants, et l'on peut s'attendre à ce que les longueurs d'arbres soient plus grandes à des altitudes inférieures.

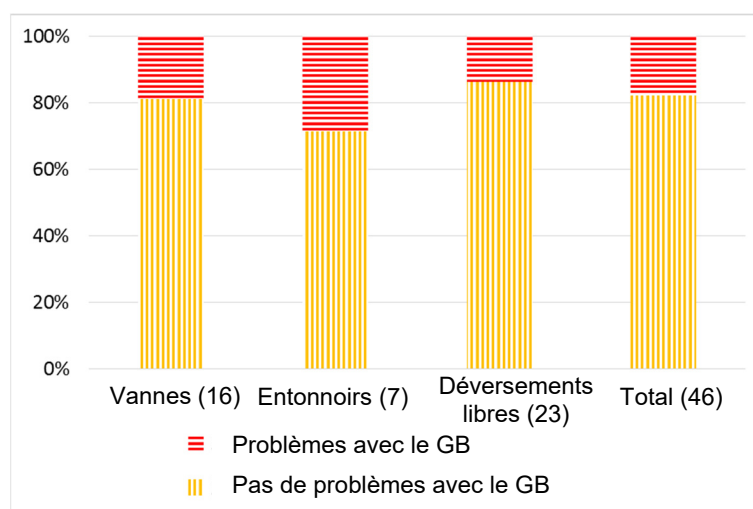


Figure 16: Influence du type d'évacuateur de crue du barrage sur l'apparition de problèmes dus au BF. Nombre entre parenthèses: Nombre de barrages avec type de déversoir respectif.

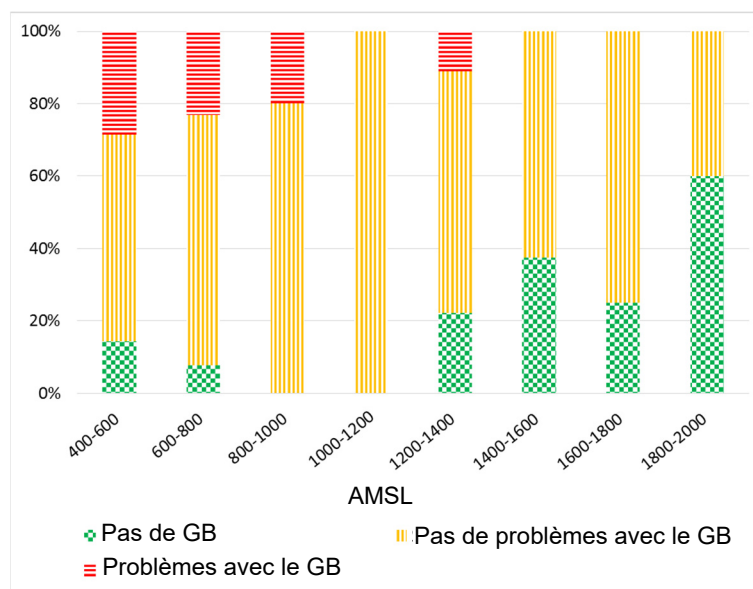


Figure 17: Influence de l'altitude du barrage sur la survenue de problèmes dus au BF.

Selon le sondage, 17% des barrages en Suisse ont connu des problèmes et des dégâts dus au BF (voir ci-dessus). Afin de mieux estimer le potentiel de risque existant, les dimensions minimales recommandées des évacuateurs de crue des barrages conformément aux directives en vigueur (chapitre 3) peuvent être comparées aux dimensions réelles. La **figure 18** montre la proportion d'évacuateurs de crue de barrages qui répondent à la largeur minimale requise conformément à la directive suisse ($L_p \geq 0.8H_i$). Les longueurs de troncs prévues entre 5 et 20 m ont été prises en compte. Avec une longueur de tronc de 10 m, environ 50% seulement des EDC de barrages sont conformes aux recommandations de la directive suisse. Avec une longueur de tronc de 15 m, il n'y a qu'un peu moins de 15% des EDC de barrages



conformes à la directive. Il existe donc un potentiel de risque d'obstruction élevé des EDC de barrages en cas de crue avec une grande quantité de BF avec de longs troncs.

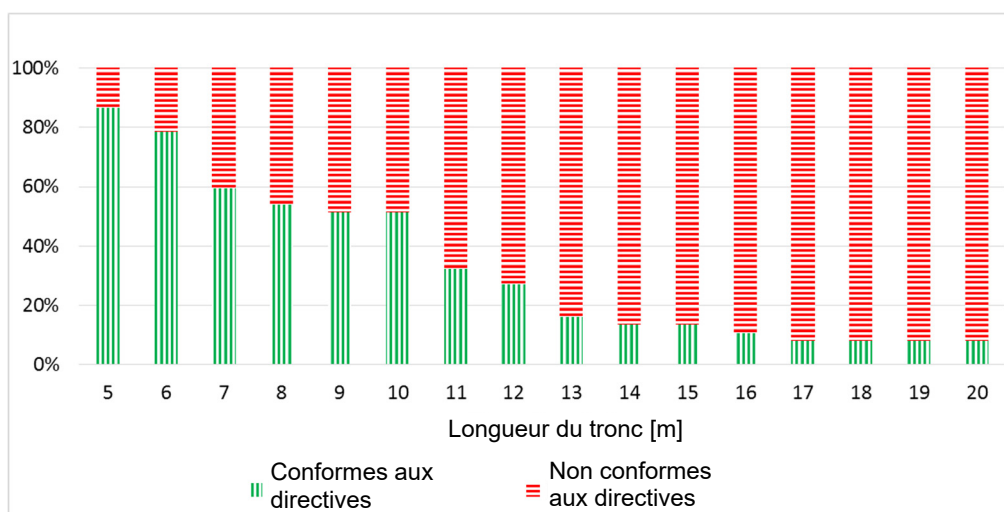


Figure 18: Pourcentage des EDC de barrages conformes ou non conformes aux directives suisses (OFEN 2016) avec largeur minimale de l'ouverture de décharge, respectivement, en fonction de la longueur potentielle des troncs.

4.2 Etudes de cas

Plusieurs études de cas en Suisse ont été sélectionnées sur la base de questionnaires et ont ensuite été examinées en détail (annexe 2). Les barrages et les crues suivants avec accumulation de BF et les problèmes qui en ont résulté sont été sélectionnés:

- Käppelistutz, crue d'août 2005;
- Schlattli, crue de juillet 2010;
- Palagnedra, crue d'août 1978;
- Montsalvens, crue de mai 2015

En plus, des études de cas individuelles réalisées à l'étranger sont également examinées (annexe 2).

5 Critères d'évaluation des EDC de barrages concernant les dangers potentiels

5.1 Mobilisation et transport de bois flottant

Les troncs lisses avec une densité de bois moyenne de 500 kg/m^3 peuvent être charriés et transportés dans une masse d'eau si la profondeur d'écoulement h est supérieure à la moitié du diamètre du tronc d (Lange & Bezzola 2005), c.-à-d. $h > d/2$. Dans les simulations de modèle pour le torrent de Riemenstaldner à écoulement supercritique (nombre de Froude $Fr = 2$), des troncs lisses ont été transportés avec des profondeurs d'écoulement minimales de $1.0d$ à $1.2d$. Pour mettre des troncs avec des branches en mouvement, des profondeurs d'écoulement de $1.2d$ à $1.5d$ étaient nécessaires. Les troncs avec des racines n'ont commencé à être charriés qu'avec des profondeurs d'écoulement de $1.7d$ (Bezzola et al. 2002). Selon Braudrick et Grant (2000), les profondeurs minimales d'écoulement h suivantes sont requises en écoulement subcritique avec $Fr = 0,75$ pour les troncs d'une densité de 500 kg/m^3 situés sur le lit de la rivière parallèlement au sens d'écoulement: (i) pour les troncs sans branches et sans racines avec des longueurs relatives de $L/d = 15$, $h = 0,45 d$; (ii) pour des troncs simples dont les racines (indice R) avec dimensions $d_R/d = 2$ et des longueurs relatives de $L/d = 15$ et 20 , $h = (0,6 \dots 0,65) d$; (iii) pour les troncs simples avec racines de dimension $d_R/d = 4$ et les longueurs relatives $L/d = 20$, $h = 0,9 d$. Une comparaison des profondeurs d'écoulement relatives minimales requises aboutit à une mobilisation de BF de plus petites dimensions pour un écoulement subcritique par rapport à un écoulement supercritique. Cependant, il convient de noter que les profondeurs d'écoulement sont plus élevées dans les écoulements sub-critiques que dans les écoulements supercritiques avec débit, rugosité et pente identiques (Boes et al. 2013). Pour les troncs simples dépourvus de branches et de racines, l'effet de la longueur relative L/d sur la profondeur d'eau relative requise h/d est faible pour une $L/d > 15$. La profondeur relative requise de l'eau augmente pour des densités de bois plus élevées. Pour les troncs avec $L/d = 30$ et une densité de bois de 750 kg/m^3 , h/d augmente d'environ 20-30% par rapport à une densité de 500 kg/m^3 (Braudrick & Grant 2000). La limite supérieure correspond aux troncs sans racines, la limite inférieure aux troncs avec racines.

5.2 Survenance de bois flottant dans les bassins versants

La quantité de BF qui peut survenir en cas de crue doit d'abord être clarifiée pour servir de base à toute évaluation de danger. En cas de crue, le BF peut pénétrer dans les affluents du réservoir ou directement dans le réservoir à la suite d'une érosion des berges ou de glissements de terrain. En outre, le bois mort existant dans la rivière est charrié. La détermination du potentiel de BF est sujette à de grandes incertitudes. Les estimations de la quantité de BF peuvent différer par un facteur de deux ou plus de la quantité de BF réellement charriée. Cependant, pour que des obstructions se produisent, la quantité exacte de BF n'a qu'une importance mineure, car même de gros troncs et de grandes racines suffisent pour bloquer une section transversale. Tout BF supplémentaire se coincerait alors dans le bois déjà accumulé et réduirait davantage la section transversale. Il n'y a pas de corrélation particulière entre les crues et la survenue de BF, la présence de ce dernier et sa mobilisation étant influencés par de nombreux facteurs différents. La forme et les dimensions de BF ont une influence sur le moment où il est transporté en aval. Le type de canaux (par exemple, les ravins étroits) par lesquels passe le BF influence également le temps ainsi que la distance de transport. Les profondeurs d'écoulement sont un facteur important dans le transport de



BF, comme indiqué au chapitre 5.1. Par exemple, la plus grande quantité de bois est généralement transportée pendant les pics de crue, ainsi que peu avant et après.

Le volume de bois dans le bassin versant et son entrée dans un réservoir peuvent être déterminés à l'aide de formules d'estimation fondées sur des bases de données de volumes de bois observés (chapitre 5.2.1). Cependant, il faut s'attendre à des quantités exceptionnelles de BF dans les cas de crues nominales et extrêmes. À cette fin, comme pour les considérations hydrologiques extrêmes, il est recommandé d'utiliser des courbes enveloppes (chapitre 5.2.2). La méthode la plus coûteuse, mais très précise, pour évaluer les risques posés par le BF est une analyse détaillée du bassin versant au moyen d'inspections sur le terrain et d'analyses GIS (Schalko et al. 2017a). Outre la quantité de BF, des informations sur ses dimensions (chapitre 5.2.3), sa flottabilité, et le temps de séjour (chapitre 5.2.4) sont également nécessaires.

Selon l'historique des crues du bassin versant, même des crues mineures peuvent provoquer une accumulation de BF, tandis que des crues plus importantes peuvent en déplacer moins, si le potentiel de bois restant est faible. Par conséquent, différents scénarios doivent toujours être pris en compte lors de l'estimation de la quantité de BF au moyen de formules empiriques ou d'évaluations sur le terrain. L'intervalle de temps depuis la dernière crue avec une quantité importante de mobilisation de BF doit également être pris en compte.

5.2.1 Formules d'estimations empiriques

Rickenmann (1997) a évalué les quantités documentées de BF pendant les crues de 1987 et 1993 pour plusieurs bassins versants en Suisse et en a déduit des formules d'estimation empiriques pour les quantités et le potentiel réels de BF. La base de données a été complétée par des crues documentées au Japon, en Allemagne et aux États-Unis (Ishikawa 1989 et Uchiogi et al. 1996). Les formules d'estimation empirique permettent d'estimer le volume réel de BF H [m³] en fonction des caractéristiques suivantes du bassin versant et de la crue:

- Grandeur du bassin versant (Rickenmann 1997):

$$H = 45 \cdot EG^{2/3} \quad (5)$$

où EG = grandeur du bassin versant en [km²]. Plage de validité: $EG = 0.054 - 6'273$ km². Quantité de BF H [m³] définit le volume de bois instable (facteur de masse $a = V_L/V_F = 2$ où V_L = volume instable et V_F = volume fixe).

- Volume de décharge (Rickenmann 1997):

$$H = 4 \cdot V_W^{2/5} \quad (6)$$

où V_W = volume de décharge [m³]. Plage de validité:
 $V_W = 2.16 - 390 \cdot 10^6$ m³.

- Charge sédimentaire (Ishikawa 1989 and Uchiogi et al. 1996):

$$H = 0.02 \cdot F \quad (7)$$

où F = charge sédimentaire de crue [m³]. Plage de validité:
 $F = 380 - 50'000$ m³.

Formules d'estimation empirique supplémentaires pour l'estimation du potentiel existant de BF H_{pot} [m³] sur la base des caractéristiques du bassin versant:

- Type de végétation dans le bassin versant (Ishikawa 1989 and Uchiogi et al. 1996):

$$H_{pot} = C \cdot EG \quad (8)$$

où C = coefficient sans dimension dépendant du type de végétation. Une distinction est faite entre forêt de conifères ($10 < C < 1000$) et forêt de feuillus ($10 < C < 100$). Plage de validité: $EG < 100$ km².

- Bassin versant boisé (Rickenmann 1997):

$$H_{pot} = 90 \cdot EG_W \quad (9)$$

où EG_W = bassin versant boisé [km²], valable pour $EG = 0.76 - 78$ km² and $EG_W = 0.3 - 21.1$ km².

- Longueur de berge boisée (Rickenmann 1997):

$$H_{pot} = 40 \cdot L_W^2 \quad (10)$$

où L_W = Longueur de berge boisée [km], valable pour $L_W < 20$ km.

Lange et Bezzola (2006) donnent des explications supplémentaires sur les formules empiriques. Les formules présentent généralement de grandes variations et sont sujettes à des incertitudes, car des facteurs tels que la fréquence annuelle des crues, l'historique du bassin versant (dernière crue), les conditions des berges ou la perte de pente et de stabilité des berges due aux crues ne sont pas pris en compte. Les équations empiriques sont également principalement basées sur des sondages et des observations de ruisseaux de montagne avec des bassins versants relativement petits.

5.2.2 Analyse des crues passées

L'analyse des crues passées concernant le volume réel de BF charrié fournit de bonnes indications pour évaluer les dangers. Si aucun événement de crue avec entraînement de BF n'est connu dans le bassin versant considéré, les données de bassins versants comparables présentant des conditions hydrologiques, topographiques et de couverture végétale similaires peuvent être utilisées. Les résultats des volumes de BF observés en Suisse figurent dans l'analyse des crues de 1987 et 1993 (Rickenmann 1997) et de 2005 (Bezzola & Hegg 2008). La **figure 19** montre les volumes de BF observés (volumes fixes) en fonction du bassin versant, ainsi que les enveloppes d'Uchiogi et al. (1996, équation 8) et l'estimation de Rickenmann (1997, équation 5). Des événements extrêmes tels que celui de 1978 à Palagnedra se rapprochent de la limite supérieure des forêts de conifères selon Uchiogi et al. (1996). Pour les conditions suisses avec des bassins versants $EG < 300$ km², les coefficients allant jusqu'à $C \approx 400$ dans l'équation (8) semblent réalistes comme indications initiales ou pour une crue extrême.

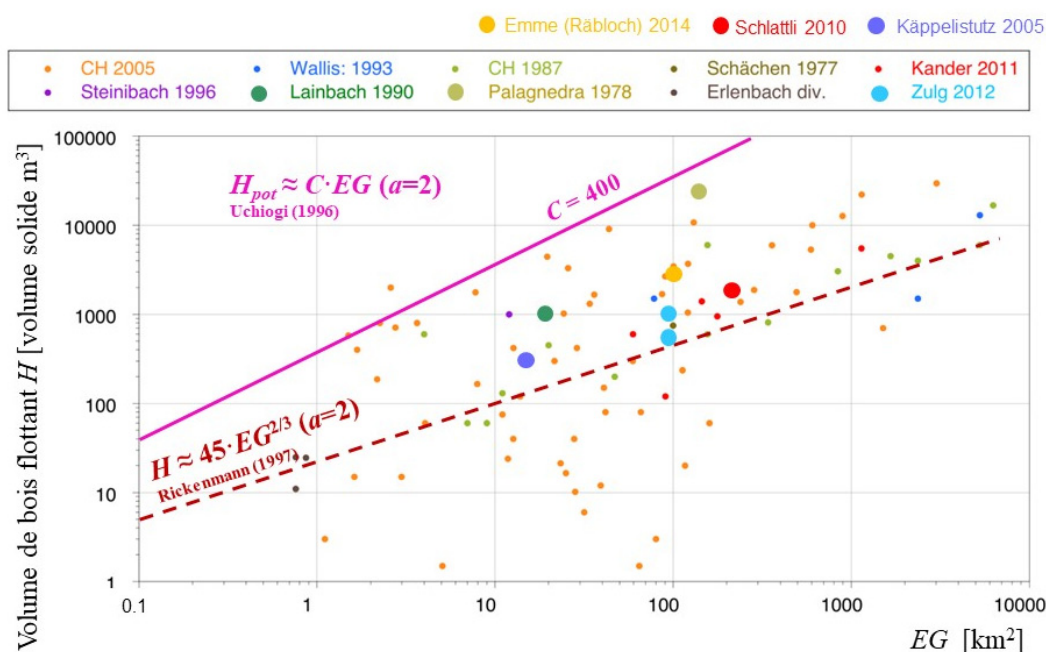


Figure 19: Volumes fixes de BF observés lors des crues passées et formules d'estimation selon Rickenmann (1997) et Uchiogi (1996) (facteur de masse $a = 2$).

5.2.3 Dimensions du bois flottant

Selon Zollinger (1983), le BF est exposé à des forces énormes pendant la mobilisation. Les troncs sont rapidement débranchés dans les ruisseaux de montagne après quelques mètres, pelés puis généralement cassés en morceaux de 1 à 5 m de long. La **figure 20a** montre la répartition des tailles de tronc déposées après une crue le long de différentes rivières italiennes (Lucia et al. 2015). Environ 50% des troncs enregistrés étaient plus longs que 5 m approximativement. Steeb et al. (2016) estiment que la taille des arbres transportés est réduite à environ 20% de leur longueur d'origine (**Figure 20b**). Les forces physiques (glissement, passage dans les gorges) ou le processus de mobilisation (glissements de terrain, coulées de débris) jouent un rôle plus important dans la réduction de la taille du tronc que la distance de transport. Il existe également une relation entre les longueurs de tronc et leurs diamètres. L'analyse de la crue de 2005 incluait des mesures systématiques de BF (Bezzola et Hegg, 2007). Environ 35% des troncs mesuraient 4 à 6 m de long. Près de 10% avaient plus de 8 m. La profondeur d'écoulement et la largeur de la rivière peuvent également limiter les longueurs transportables maximales de troncs. Cependant, les crues passées ont montré que le BF peut également présenter des dimensions assez importantes (**Figure 20a, Figure 21**). Ceci peut être le cas surtout lorsque des glissements de terrain se produisent dans un réservoir, où la longueur des troncs n'est pas très réduite. Dans de nombreux cas, de gros troncs ou racines suffisent à bloquer la section transversale de l'ouverture d'un déversoir de barrage et à créer des obstructions. Pour cette raison, des longueurs de tronc allant jusqu'à 25 m ont été prises en compte dans l'évaluation des dangers pour le réservoir de Trängslet suédois (Boes et al. 2013). Afin d'estimer le potentiel de danger ou la probabilité d'obstruction (section 5.3), il convient d'utiliser les dimensions de l'arbre situées près des rives ou des réservoirs.

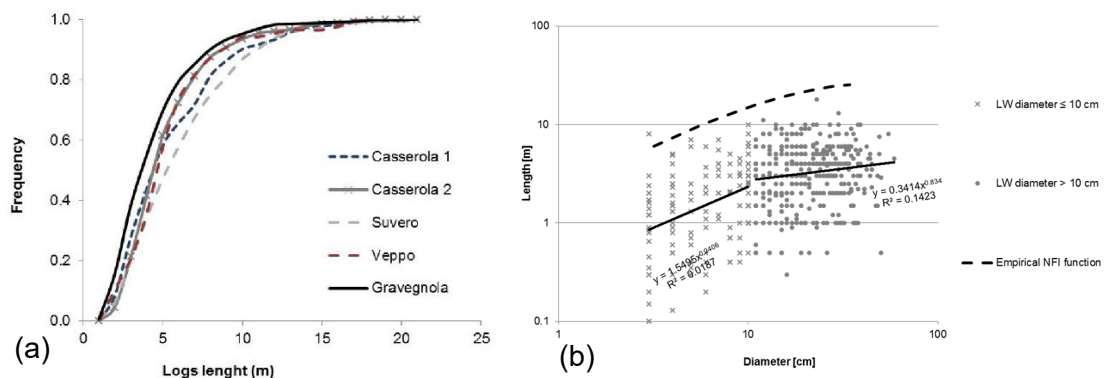


Figure 20: (a) Distribution de la fréquence des longueurs de troncs déposés dans différents canaux de rivières italiennes après une crue (Lucia et al. 2015); (b) Comparaison des longueurs de troncs et des diamètres d'arbres transportés lors de crues avec l'équation empirique NFI (relation entre la longueur du tronc et son diamètre à hauteur de la poitrine) (Steeb et al. 2016).



Figure 21: Bois flottant avec troncs pouvant atteindre 15 m et qui a été retiré du réservoir de Gebidem (Photo: VAW).

5.2.4 Flottabilité du bois flottant

Selon Zollinger (1983), le bois frais flotte généralement encore pendant plusieurs mois, ce qui signifie qu'un retrait du réservoir deux fois par an est suffisant. En ce qui concerne la flottabilité du bois, Zollinger (1983) fournit également les informations suivantes:

- L'épicéa ne coule presque jamais;
- Le bois de pin et de mélèze peut couler après un certain temps;
- Le sapin coule au bout de 2 à 4 semaines dans des conditions humides soit après plusieurs semaines s'il est initialement sec lorsqu'il est plongé dans de l'eau;



- Le hêtre flotte rarement, il est complètement submergé sous la surface au meilleur des cas.

Le bois mort qui pénètre dans une masse d'eau lors d'une crue ne flotte parfois plus et peut couler immédiatement. On peut trouver d'autres publications sur la densité de bois présente dans les rivières, par exemple dans Ruiz-Villanueva et al. (2016). Les racines fortement chargées de sédiments perdent parfois leur flottabilité. Le BF d'un tel type peut également mettre en danger les structures d'entrée ainsi que les pertuis de fond. Cependant, les processus d'obstruction de ces structures d'entrée ne font pas partie de la présente enquête.

5.3 Influence des réservoirs et des affluents sur l'apport en bois flottant aux évacuateurs de crues des barrages

L'emplacement et les caractéristiques du réservoir peuvent avoir une incidence sur les dangers potentiels liés au BF. En fonction de l'altitude, le potentiel de BF existant est faible (presque nul au-dessus de la limite des arbres) et élevé aux altitudes les plus basses. De plus, les dimensions du BF diminuent avec l'altitude. Les pentes boisées et abruptes des réservoirs augmentent l'apport potentiel de bois en raison du vent, des glissements de terrain ou de la chute d'arbres. Les glissements de terrain peuvent se produire sur des terrains en pente modérée à forte. Les risques de glissements de terrain augmentent considérablement pour les pentes $> 25^\circ$. Le vent, les vagues ainsi que la baisse rapide du niveau d'eau du réservoir peuvent en outre déstabiliser les berges et entraîner ainsi la mobilisation du BF dans le réservoir même. Les affluents des réservoirs ont une influence supplémentaire sur l'apport en BF. Dans les régions alpines, les ruisseaux sont souvent étroits et / ou présentent des gorges aux berges abruptes. Les arbres tombés dans le lit de la rivière peuvent rester dans l'eau pendant des années et empêcher le transport de bois supplémentaire en aval (**Figure 22**). En cas de crue, le bois accumulé pourrait se libérer et être emporté dans le réservoir (voir l'étude de cas Palagnedra).



Figure 22: Torrent de montagne, dans le parc provincial du lac de Joffre, Colombie britannique, Canada (Photo: Boes 2009).

Le BF qui se trouve dans un réservoir pourrait être transporté non seulement par les courants, mais également par le vent. La forme et l'orientation du réservoir ont donc un effet immédiat sur le déplacement du BF vers l'évacuateur du barrage sans qu'il n'y ait aucun courant réel dans le réservoir. Le BF peut également s'accumuler sur de longues périodes à l'arrière d'un réservoir ou à proximité des berges à cause du vent et ne peut être transporté vers le barrage qu'en cas de crue. De plus, la localisation de différents courants dans le réservoir peut influencer la structure globale des courants et donc le transport de BF autour du réservoir. L'évaluation des dangers doit également inclure les évacuateurs de fond des barrages où les niveaux d'eau des réservoirs sont abaissés pour des raisons opérationnelles, telles que le nettoyage par cycles de rinçage. L'abaissement des niveaux d'eau peut générer des débits relativement élevés, de sorte que le BF peut être transporté et entraîné dans des structures d'évacuation de fond.

5.4 Probabilité d'obstruction des EDC de barrages

Divers essais de modélisation physique sur les obstructions d'évacuateurs de crue des barrages dues au BF ont été réalisés dans le passé. Cependant, de nombreuses tentatives se sont concentrées sur une seule structure. Aucune affirmation généralement valable n'est donc possible. Une autre distinction doit être faite entre les structures d'entrée des évacuateurs de barrages, qui se situent généralement au niveau de fonctionnement normal, et les installations de décharge avec des structures d'entrée situées parfois bien en dessous du niveau de l'eau de stockage, c'est-à-dire avec un écoulement sous pression. Les sections suivantes traitent des conclusions



générales sur la mobilisation et le transport du BF. Le transport du BF par-dessus les structures de barrage et la probabilité d'obstruction sont ensuite pris en compte, une distinction étant faite entre les structures de déversoirs alimentées par un écoulement frontal, radial ou latéral. Enfin, les caractéristiques spéciales des déversoirs en touches de piano sont discutées. De plus, des conclusions analogues sont tirées pour les évacuateurs de crue de barrages avec des superstructures telles que des ponts de barrages et la probabilité d'obstruction de ponts traversant des plans d'eau.

La présente étude se limite aux obstructions dues au BF et à d'autres débris flottants. À la connaissance de l'auteur, il n'y a pas d'étude systématique sur les obstructions dues aux gros objets flottants tels que les balles d'ensilage, les voitures, etc.

5.4.1 Probabilité d'obstructions aux déversoirs

Le BF peut stagner aux EDC de barrages en raison des faibles niveaux de déversement. Les profondeurs d'écoulement requises au niveau des EDC pour assurer un passage sécurisé sont peu connues. Selon Zollinger (1983), les profondeurs d'écoulement minimales suivantes h sont nécessaires pour le transport de troncs d'une longueur relative allant jusqu'à douze fois leur diamètre, c'est-à-dire pour $L/d < 12$, aux sections de déversements: (i) $h_{\text{Déversoir}} = 1.0d$ pour troncs uniques; et (ii) $h_{\text{Déversoir}} = (2...4)d$ pour des piles ou des amas de BF relativement lâches. $h_{\text{Déversoir}}$ est la profondeur d'écoulement sur le déversoir à crête large, où la longueur de la crête est au moins trois fois la profondeur de déversement h_{ii} , où $h_{\text{crête de déversoir}} \geq 3h_{ii}$. Etant donné que le flux critique s'établit sur le déversoir à crête large avec $h_{\text{crête de déversoir}} = h_{cr} = 2/3H$, où H = hauteur d'énergie par rapport à la crête du déversoir, les profondeurs d'écoulement requises (en négligeant la petite vitesse d'écoulement) peuvent également être indiquées comme suit: (i) $h_{ii}/d = 1.5$ pour les troncs uniques; et (ii) $h_{ii}/d = 3...6$ pour des amas de BF relativement lâches.

Selon Johansson & Cederström (1995), un seul morceau de BF sur un EDC de barrage avec une grande profondeur d'écoulement et une seule ouverture de déversoir ouverte a le moins de chances d'être bloqué car le tronc peut s'aligner dans la direction de l'écoulement. Si plusieurs ouvertures de déversoir avoisinantes sont ouvertes ou si du BF arrive par amas, les risques d'obstruction augmentent. Fondamentalement, le risque d'obstruction augmente avec l'augmentation du rapport longueur des troncs / largeur du déversoir H_i/L_p (**figure 12**).

Hartlieb (2012) a étudié le risque d'obstruction des EDC de barrage avec des vannes à segment sur la base de simulations de modèles. Parmi diverses caractéristiques du BF (longueur, densité, nombre et longueur des branches), sa longueur par rapport à la largeur d'ouverture de déversoir a eu la plus grande influence sur la probabilité de d'obstruction. Les troncs individuels pouvaient presque toujours passer, car ils étaient alignés avec le sens du courant. Pour les amas de cinq troncs, la probabilité d'obstruction augmente. À mesure que le nombre et la longueur des branches augmentaient, la probabilité d'obstruction augmentait également. La densité, cependant, n'a eu aucun effet significatif sur la probabilité d'obstruction.

Pour un barrage à courant frontal avec déversement libre à évacuateur avec vannes, Hartlieb (2015) a présenté la formule suivante afin de déterminer la probabilité d'obstruction P :

$$P = (H_i/L_p - 0.96) \cdot 0.73 \quad (11)$$

où H_i = longueur du tronc et L_p = largeur de l'ouverture du déversoir.

5.4.2 Probabilité d'obstruction de déversoirs en touches de piano

Pour estimer la probabilité d'obstruction des déversoirs en touches de piano (**figure 7**), un développement ultérieur des évacuateurs en labyrinthe, Pfister et al. (2013a, b) ont réalisé des simulations sur modèle. Comme décrit par Pfister (2015), les déversoirs en touches de piano sont des évacuateurs présentant une longueur rectiligne démesurée par rapport à la largeur de dégagement du déversoir. En conséquence, ils présentent un rapport entre niveau et décharge relativement efficient (Leite Ribeiro et al. 2012). La géométrie complexe de la crête pourrait intuitivement être défavorable à l'accumulation de bois flottant, augmentant ainsi la probabilité de d'obstruction, du moins par rapport aux structures à déversement classiques. Les simulations du modèle ont cependant montré que cette hypothèse est fautive. Deux séries complètes de tests sur modèles ont conduit à ce résultat. Les aspects suivants ont été examinés dans le cadre de cette série de tests:

- Probabilité de blocage des troncs uniques pour déterminer le début de l'obstruction.
- Quantité d'eau de retenue dans le réservoir comme fonction d'un tapis de BF.

Si seuls les troncs individuels (sans branches ni racines) sont pris en compte en ce qui concerne la probabilité d'obstruction, et si l'on considère un réservoir avec des vitesses d'écoulement négligeables (pas de centrale hydroélectrique au fil de l'eau), les observations du modèle permettent les affirmations suivantes concernant les déversoirs en touches de piano:

- Si le diamètre d d'un tronc est supérieur à la profondeur de déversement h_{ii} ou si la hauteur d'énergie du flux d'approche H , pour $h_{ii}/d < 1$, un tronc restera généralement bloqué.
- Si le diamètre du tronc est égal à environ 2/3 de la profondeur de déversement et donc de la profondeur d'écoulement critique sur la crête du déversoir, c'est-à-dire pour $h_{ii}/d \approx 1.5$, la probabilité d'obstruction est d'environ 50%. Cette observation a été discutée par des experts avant l'étude, mais n'a jamais été publiée à la connaissance de l'auteur.
- Si le diamètre du tronc est inférieur à environ 1/3 de la profondeur de déversement, c'est-à-dire pour $h_{ii}/d > 3$, le tronc passe généralement au-dessus du barrage sans obstruer.

Les longueurs des troncs ne sont pas pertinentes, car la largeur de dégagement du déversoir en touches de piano est généralement beaucoup plus grande que les troncs les plus longs. Les racines peuvent obstruer les passages plus facilement que les troncs, même pour des profondeurs de déversement plus petites. Cependant, les données des simulations de modèles sont dispersées, les configurations et les formes de racines possibles étant imprévisibles. Cependant, les profondeurs de déversement relatives observées décrites ci-dessus pour les troncs peuvent être approximativement divisées par deux pour les racines. Les aspects concernant les déversements sont abordés au chapitre 5.4.2.

5.4.3 Probabilité d'obstruction des ponts de déversoirs

Godtland & Tesaker (1994) ont étudié entre autres l'influence des structures de ponts de déversoir aux barrages avec des évacuateurs de crue libres. Les dangers



d'obstruction étaient plus élevés pour les barrages ayant une structure de pont en comparaison avec ceux qui n'en possède pas. De plus, le BF pourrait rester bloqué sur ces structures et exercer des forces supplémentaires. En raison de l'absence de documentation sur le risque général d'obstruction des barrages avec ponts de déversoir, une comparaison avec la recherche correspondante sur les ponts fluviaux est présentée ci-dessous.

Diverses formules sont disponibles dans la littérature sur l'obstruction de ponts de rivière ou des piliers de pont (Melville et Dongol, 1992, Bezzola et al., 2002, Schmocker et Hager, 2011). Ces formules peuvent être utilisées pour estimer approximativement la probabilité d'obstruction des évacuateurs de crue des barrages. Cependant, la plupart des essais sur les ponts ont été effectués à des nombres de Froude et à des débits élevés, ce qui peut vraiment être le cas lors de crues torrentielles et fluviales. Les gros débris tels que les troncs sont donc généralement alignés dans le sens du courant, ce qui réduit généralement le risque d'obstruction. Les vitesses d'écoulement dans le cas des courants entrants vers les évacuateurs de crue des barrages sont généralement beaucoup plus faibles et n'appuient pas l'effet d'alignement, ce qui augmente la probabilité d'obstruction. Cette dernière a tendance à être plus importante lorsque les vitesses d'écoulement et les nombres de Froude sont faibles, car les troncs peuvent déjà être piégés par les ponts et les structures de barrages du fait des branches qui entrent en contact avec le pont, la crête du déversoir, les piliers, les culées ou les vannes. Les formules ci-dessous ne donnent donc que des indications et doivent être utilisées avec précaution en ce qui concerne les EDC de barrages.

Les équations de Lange & Bezzola (2006) ont été déterminées de manière empirique à l'aide de 1'200 tests de modélisation. Les sections transversales de ponts et dimensions de BF différentes ont été examinées et évaluées statistiquement. La probabilité d'obstruction que représentent les troncs uniques P_L selon Lange & Bezzola (2006) dépend principalement de la relation entre la longueur du tronc L et la largeur de la section transversale du pont B et est définie comme suit:

$$P_L = 0 \quad \text{pour} \quad \frac{L}{B} < 0.5 \quad (12a)$$

$$P_L = 0.133 \frac{L}{B} - 0.066 \quad \text{pour} \quad \frac{L}{B} \geq 0.5 \quad (12b)$$

La probabilité d'obstruction pour les souches individuelles P_R dépend du rapport entre la dimension moyenne de la plaque radiculaire D_R^* et la hauteur de dégagement H de la section transversale du pont, c'est-à-dire la hauteur libre entre le lit de la rivière et le dessous du pont, et peut être décrite comme suit:

$$P_R = 0 \quad \text{pour} \quad \frac{D_R^*}{H} < 0.6 \quad (13a)$$

$$P_R = 1 \quad \text{pour} \quad \frac{D_R^*}{H} \geq 1.0 \quad (13b)$$

$$P_R = 2 \frac{D_R^*}{H} - 1.2 \quad \text{pour} \quad 0.6 \leq \frac{D_R^*}{H} < 1.0 \quad (13c)$$

où $D_R^* = (D_{RM}^2 \cdot D_{Rm} \cdot L_R)^{1/3}$ et D_{RM} = diamètre maximum de la plaque radiculaire [m],
 D_{Rm} = diamètre minimum de la plaque radiculaire [m] et L_R = longueur du tronc [m].

Selon Schmocker & Hager (2011), quatre types de ponts sont identifiés pour calculer la probabilité d'obstruction: (a) ponts à batardeaux, (b) ponts en treillis, (c) pont avec garde-corps et (d) ponts à déflecteurs. La plus grande probabilité de blocage pour chaque P_{LM} de troncs et de P_{RM} de souches peut être exprimée comme suit, en fonction du nombre de Froude Fr et de la profondeur d'écoulement h :

$$P_{LM} = 0 \quad \text{pour} \quad \frac{h}{H} \leq 0.9 \quad (14a)$$

$$P_{LM} = 0.25z + (4 - z)(Fr - 0.8)^2 \quad \text{pour} \quad \frac{h}{H} = 1 \quad (14b)$$

$$P_{LM} = 1 - y(Fr - 0.3)^2 \quad \text{pour} \quad \frac{h}{H} = 1.07 \quad (14c)$$

$$P_{RM} = 1.17 - 0.55Fr \quad \text{pour batardeaux, treillis et garde-corps} \quad (14d)$$

$$P_{RM} = 0.91 - 0.69Fr \quad \text{ponts à déflecteur} \quad (14e)$$

où h = profondeur d'écoulement, H = hauteur de dégagement du pont et constantes $z = 2$ and $y = 1$ pour ponts à batardeaux, ponts en treillis et ponts avec garde-corps et $z = 0$ et $y = 2.5$ pour les ponts à déflecteurs.

5.5 Augmentation du niveau d'eau de rétention dû aux obstructions

Une obstruction peut avoir une très faible perméabilité en raison de l'empilement de branches, de feuilles ou de matières organiques. Il faut initialement supposer, pour toute évaluation des dangers, que l'évacuateur du barrage obstrué par du bois flottant est imperméable. La rétention des eaux de retour dans le réservoir due à une obstruction partielle ou totale des évacuateurs de crue de barrages peut être estimée. Les hypothèses relatives aux obstructions partielles peuvent être extraites des recommandations italiennes (Ruggieri 2015, chapitre 3.2.4). En raison de l'obstruction, la pression de l'eau et du bois sur l'évacuateur du barrage augmente. Ces facteurs de charge doivent être pris en compte pour les conceptions structurelles (chapitre 5.5).

5.5.1 Écoulement d'approche frontal

Les informations générales sur l'eau de rétention résultant des obstructions des évacuateurs de crue des barrages sont rarement disponibles dans la littérature. Yang et al. (2009) ont effectué des simulations par modèle pour l'évacuateur de crue du barrage de Laxede en Suède. En raison de l'obstruction de l'évacuateur de crue à trois ouvertures du barrage, le niveau d'eau du réservoir a augmenté de 16 à 27% par rapport aux conditions sans obstructions. Dans des expériences similaires, Hartlieb (2015) a observé une augmentation de 20 à 30% de l'eau de retenue due à une obstruction. Schmocker (2017) a étudié le processus d'accumulation dans un évacuateur de crue de barrage à deux ouvertures et a observé une montée du remous d'environ 30%. Schalko et al. (2017b) ont étudié la dépendance de l'élévation du niveau de l'eau de retenue sur le nombre de Froude de l'écoulement entrant, les diamètres des troncs ainsi que le facteur de charge de l'accumulation, appliqués aux obstructions de ponts. Les résultats peuvent être utilisés à titre indicatif, mais ont une meilleure validité pour des vitesses d'entrée élevées $v > 1.0$ m/s.

5.5.2 Déversoirs en touches de piano

L'étude de Pfister et al (2013a, b) sur les déversoirs en touches de piano a montré que l'excès d'eau de retenue dans le réservoir (**Figure 23**) est plutôt faible. Les aspects suivants peuvent en être les raisons (Pfister et al., 2015):

- Les déversoirs en touches de piano se déploient horizontalement. Le premier point de contact du BF avec le déversoir, qui est généralement aussi le point d'obstruction, se situe sur la longueur prédominante de la crête du déversoir en

amont. La pression hydraulique dans cette zone est encore faible et un tapis éventuel de BF n'est pratiquement jamais comprimé ou poussé vers l'avant, mais reste plutôt lâche en une seule couche.

- Une grande partie de l'eau arrivante monte brusquement devant le déversoir en touches de piano et atteint la structure d'entrée. L'eau peut donc s'écouler sous l'obstruction et n'est que légèrement influencée par celle-ci.
- Les déversoirs en touches de piano construits à ce jour n'ont généralement pas de piliers et ont souvent une largeur supérieure aux troncs charriés.

L'expérience pratique a démontré que le modèle d'obstruction est similaire à celui observé dans des modèles réduits hydrauliques (Pfister et al., 2015).

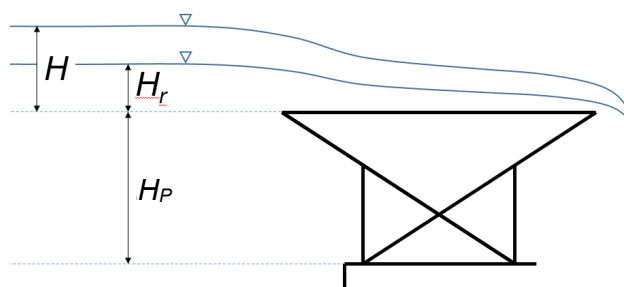


Figure 23: Déversement d'un déversoir en touches de piano pour un débit donné, avec H_r pour la profondeur de déversement sans BF, H pour un déversement avec présence de BF, et H_p pour la hauteur du déversoir en touches de piano.

Le déversement relatif H / H_r dans le réservoir provoqué par un déversoir en touches de piano obstrué dépend du volume spécifique de BF entrant V / W (avec V comme volume de bois fixe et W comme largeur totale du déversoir) et de la profondeur de déversement H (distance verticale entre le niveau d'eau et la crête du déversoir avec BF). La distance verticale entre le niveau d'eau et la crête du déversoir sans BF est appelée profondeur de déversement de référence H_r (pour le même débit que H , Leite Ribeiro et al., 2012). Ce qui suit s'applique:

$$\frac{H}{H_r} \cong 1 + \tanh\left(0.007 \cdot \frac{V}{H_r^2 W}\right) \quad (15)$$

Cette remontée d'eau est générée par plusieurs piles entrantes de BF, qui contiennent une distribution représentative de différentes longueurs de troncs et de racines. On peut généralement constater que la pile initiale génère déjà une obstruction. La probabilité de blocage P est approximativement:

$$P = \tanh\left(0.15 \cdot \frac{V}{H_r^2 W}\right) \quad (16)$$

L'équation (16) permet d'estimer la probabilité pour qu'un tas de BF conduise à une obstruction. Si tel est le cas, son influence et celle de tous les amas de BF ultérieurs à la surface du réservoir peuvent être estimées à l'aide de l'équation (15). Les limites d'application des deux équations sont décrites dans Pfister et al. (2013a).

Les déversoirs en touches de piano semblent moins sensibles au BF, car la pression exercée sur la structure est faible et le tapis de BF reste lâche. Cependant, les troncs flottants peuvent rester coincés sous les surplombs, comme l'ont montré les premières expériences (BAW 2016).

5.6 Forces d'impacts sur les EDC

Le BF peut compromettre la sécurité opérationnelle des évacuateurs de crues des barrages de plusieurs manières: (1) dommages dus aux chocs de débris et la pression due à des obstructions lors de niveaux d'eau élevés; (2) blocage de vannes à guillotine, vannes à écoulement par en-dessous ou d'autres dispositifs mobiles, y compris leurs mécanismes (par exemple, ceux de régulation automatique); ou (3) réduction du débit dû aux obstructions et à la remontée du remous dans le réservoir.

Les EDC de barrages et tous les équipements associés doivent résister aux impacts du BF. En fonction de la forme du réservoir et de l'emplacement des EDC de barrages, les vitesses peuvent augmenter fortement, en particulier près des sections de déversement et d'évacuation (par exemple, le barrage de Schlattli, voir annexe 2). Les cas de charges d'impacts de troncs doivent donc être vérifiés lors des évacuations de crues, bien que ceci ne soit généralement pas déterminant (par exemple, Kálin et al. 2005).

Cependant, des troncs individuels peuvent déjà compromettre la sécurité opérationnelle des clapets et des vannes. Un tronc coincé suffit déjà à bloquer les mécanismes de fonctionnement ou à affecter les systèmes de régulation automatique. En raison de la pression de l'écoulement entrant, il est impossible d'éliminer manuellement les débris coincés lors d'une crue. Lorsqu'il y a de grandes quantités de BF, il est préférable d'éviter l'utilisation de dispositifs de régulation mobiles.

Si l'EDC d'un barrage est partiellement ou totalement obstrué, la capacité d'écoulement diminue, ce qui entraîne une remontée du niveau d'eau de retenue du réservoir (section 5.4). Cela peut entraîner une charge supplémentaire sur les structures du barrage.

Des forces de charge supplémentaires ont lieu lors de l'obstruction des EDC de barrages. Godtland et Tesaker (1994) recommandent la formule empirique suivante pour la force supplémentaire F (pression dynamique, courants sous le matériau obstruant, et l'influence du vent sur ce dernier) sur une structure de barrage à la suite d'une obstruction:

$$F = C_w b_k (30 \cdot T + L_k) \rho_w \frac{v_s^2}{2} \quad (17)$$

où: C_w coefficient de résistance

C_w	0.06 pour $v_s < v_{su}$; $C_w = 0.08$ pour $v_{su} < v_s < 1.1 \cdot v_{su}$; $C_w = 0.1$ pour $v_s > 1.1 \cdot v_{su}$
v_s	Vitesse du débit à la surface de l'eau [m/s]
v_{su}	Vitesse du débit sous le matériau obstruant [m/s]
b_k	Largeur du corps obstruant [m]
T	Hauteur du corps obstruant [m]
L_k	Longueur du corps obstruant [m]
ρ_w	Densité de l'eau [kg/m ³]

En raison des vitesses d'écoulement élevées, non seulement la compacité du corps faisant obstacle et le niveau d'eau en amont augmentent, mais les charges de pression supplémentaires augmentent également. Pour une vitesse d'écoulement d'environ $v = 0,4$ m / s, les forces augmentent au fur et à mesure que le matériau obstruant commence à être submergé dans l'eau.

6 Mesures

6.1 Mesures structurelles pour le passage du bois flottant

6.1.1 Ajustement des dimensions des évacuateurs de crues

Une façon de minimiser les obstructions dues à la longueur du BF est de garantir des dimensions suffisamment larges au niveau des structures d'entrée des EDC de barrages. Les directives pour les dimensions de largeur et de hauteur selon le chapitre 3 peuvent être utilisées comme spécifications de conception. Un EDC de barrage non régulé (par exemple à déversement libre) présente un risque moins élevé d'obstruction qu'un EDC de barrage régulé dans des conditions identiques. Bien que des troncs puissent être déposés sur la crête du déversoir à faible profondeur d'écoulement (voir chapitre 5.3.2), ils sont généralement éliminés lors d'une augmentation de débit. Les piliers intermédiaires, les clapets, les vannes verticales, les ponts de déversoir, etc. augmentent généralement le risque d'obstruction. Cependant, le type de structure de régulation a également une influence sur le risque d'obstruction. Les écoulements sous vanne (par exemple vannes à levage / abaissement verticaux) doivent être évités dans des conditions critiques, alors que les structures de régulation à déversement telles que les déversoirs à clapets, tambours et à secteurs ont tendance à être moins sensibles aux obstructions. De telles structures à régulation peuvent même être avantageuses car les déversements peuvent être dirigés et concentrés au centre des structures d'entrée des EDC de barrages. Ces structures peuvent permettre le déblocage de troncs uniques coincés en raison des puissantes forces hydrodynamiques (Hartung & Knauss, 1976). Les clapets sont avantageux pour produire des profondeurs d'écoulement localement plus grandes ce qui a pour effet de réduire le risque de blocage dû au bois (Boes et al. 2013, **Figure 24**).



Figure 24: Structure d'entrée d'un évacuateur de crue dans un canal collecteur à clapets. À gauche: vue de dessus d'un modèle d'évacuateur de crue au barrage de Trängslet en Suède avec vanne à clapets pour une ouverture située en aval du déversoir (Lucas et al. 2015); à droite: déversoir à plusieurs ouvertures avec clapets et perturbateur d'écoulement au barrage de Punt dal Gall (Photo: Boes, 2009).

Une adaptation des dimensions du dégagement des ouvertures du déversoir peut être réalisée comme suit :

- Enlèvement des piliers de séparation pour augmenter la largeur de dégagement des ouvertures de déversoir (par exemple au réservoir de Gstins, voir annexe 2);
- Retirer ou déplacer le pont de déversoir pour augmenter la hauteur de dégagement (réservoir de Palagnedra, voir **Figure 10**);
- Enlèvement des structures de régulation mobiles et remplacement par une crête de déversoir à déversement fixe mais plus longue (voir **Figure 25**).



Figure 25: Structure d'entrée de l'évacuateur de crue en forme de déversoir en labyrinthe avec une grande crête à déversement et largeur de dégagement à Sternenweiher (canton de Zurich, Suisse) (Photo: Boes, 2015).

Les simulations de modèles hydrauliques sont intéressantes, en particulier dans le cas de nouveaux projets où il existe un risque d'obstruction des EDC de barrages.

6.1.2 Conception des structures d'entrée des EDC et structures de transit

Dans le cas de survenance de BF très probable ou fréquente, plusieurs recommandations de la littérature (Hartung & Knauss 1976, USBR 1987, Gotland & Tesaker 1994, Wallerstein et al. 1996) devraient être prises en compte pour la conception des déversoirs, les structures de transit des EDC, des piliers et du déversoir, qui sont résumées ci-après:

- En général, les EDC d'un barrage doivent être aussi lisses que possible, arrondis et construits sans autres installations. Les composants structurels sujets aux obstructions doivent être recouverts de protections.
- Les arbres de transmission, les cylindres, les circuits hydrauliques, etc. des structures de régulation doivent être situés hors de la zone d'impact de BF;
- Les systèmes d'autorégulation doivent être évités;
- Aux ouvertures de déversoir avec vannes, l'écoulement doit être concentré au centre. Dans le cas de déversoirs avec plusieurs ouvertures, il est idéal d'obtenir une dynamique d'écoulement asymétrique le plus longtemps possible, c'est-à-dire que deux ouvertures adjacentes ne devraient pas être ouvertes en même temps, ce qui provoquerait un effet d'écoulement qui bloquerait les débris;
- En cas d'augmentation du niveau de remous suite à une obstruction, la superstructure du déversoir devrait également pouvoir résister aux impacts de BF (chapitre 5.5.);



- En règle générale, les râteliers de rétention ne devraient pas être placés directement au sommet du déversoir, car cela faciliterait les obstructions et réduira ainsi la capacité de décharge, même pour de petites quantités de BF;
- Les piliers augmentent toujours le risque d'obstruction en raison des faibles vitesses d'écoulement qui facilitent le blocage du bois au niveau des piliers individuels. En raison de telles obstructions, toute une ouverture de déversoir peut se retrouver obstruée;
- Les essais sur modèles pour les piles de pont indiquent que les têtes de piliers arrondies sont généralement moins vulnérables aux obstructions de BF que les piliers rectangulaires ou les piliers des bords angulaires;
- Les culées, les conduits des installations, les garde-corps ou les constructions en treillis favorisent les obstructions;
- Les ponts et les passerelles pour piétons devraient avoir un dégagement minimal de 1,5 à 2 m par rapport au niveau d'eau d'une crue potentielle selon l'OFEN (2008). De plus, les passerelles devraient être construites de manière à pouvoir être rapidement enlevées ou emportées en cas d'urgence;
- Selon Rickenmann (1997), les déversoirs avec des systèmes nouveaux ou modifiés doivent être dimensionnés avec des largeurs de dégagement de déversoir d'au moins 10 m, ou mieux 15 m. En outre, les nouvelles structures devraient être construites de manière à ne pas constituer un obstacle pour le BF en cas de déversement, c'est-à-dire sans superstructures;
- Pour les sections transversales circulaires des EDC, le diamètre minimal doit être de 5 m. Il faut veiller à ce que le revêtement soit lisse, sans contractions, sans obstacles et sans courbes prononcées (Hartung & Knauss, 1976). Pour les sections transversales de tunnel non circulaires avec une surface A_{St} , un diamètre minimal équivalent modélisé $d_{eq,min} = (4 \cdot A_{St}/\pi)^{0.5}$ peut être utilisé;
- Les déversoirs en touches de piano présentent plusieurs avantages en ce qui concerne le BF. L'excès du niveau d'eau de retenue provoqué par un petit débit d'évacuation est plutôt faible, et le BF a tendance à être transporté en aval au-dessus du barrage lors d'un déversement important.

Les simulations de modèles hydrauliques avec BF sont applicables en particulier dans le cas de nouveaux projets où le risque d'obstruction et le potentiel de dégâts sont élevés, de sorte que la conception d'un EDC de barrage puisse être vérifiée et optimisée si nécessaire.

Selon Hartung & Knauss (1976) et Hartlieb (2015), le BF peut également, soit être retenu au moyen d'un ou plusieurs piliers, soit être aligné longitudinalement et ainsi être évacué par le déversoir du barrage. La **Figure 26** montre un tel pilier de redressement devant un tunnel de contournement sur la Rovana (canton du Tessin, Suisse). Les piliers doivent être construits à une distance suffisante de l'évacuateur de crue du barrage. Étant donné que la forme du pilier a peu d'effet sur l'efficacité de l'alignement du bois, un pilier cylindrique circulaire est recommandé pour des raisons de coût et de méthode de construction (Waller et al. 1996).

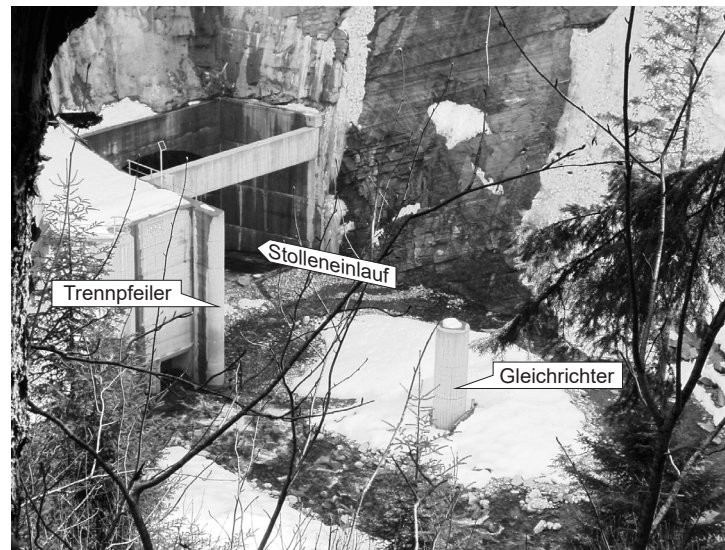


Figure 26: Redresseur devant le tunnel de contournement sur la rivière Rovana, Suisse (Lange & Bezzola 2006).

6.1.3 Conception des structures de dissipation d'énergie

La structure de dissipation d'énergie doit également être prise en compte pour le passage du BF. Le BF transporté à des vitesses d'écoulement élevées endommagerait les parties saillantes à l'intérieur des bassins d'amortissement, telles que diverses obstructions et rangées de blocs. Hartung & Knauss (1976) recommandent des bassins d'amortissement spatiaux (tridimensionnels) avec une base ascendante dans la direction de l'écoulement (**Figure 27**). Les blocs de dissipation à l'extrémité du canal d'entrée menant au bassin d'amortissement ne posent généralement pas de problèmes concernant le BF, car ils affleurent le lit à leur extrémité en amont, de sorte que tout débris est transporté par-dessus. Cependant, le BF présente des risques d'abrasion et de détérioration, en particulier sur les marches et les appuis d'extrémité.

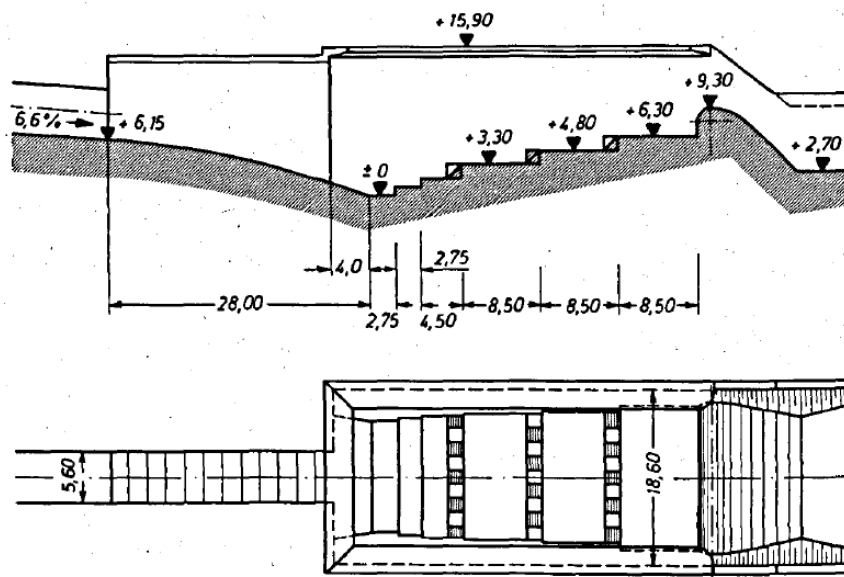


Figure 27: Exemple d'un bassin d'amortissement spatial (Hartung & Knauss 1976)



6.2 Mesures de Rétention

6.2.1 Protection des EDC de barrages avec râteliers de rétention

En règle générale, les râteliers grossiers ne devraient être installés devant l'évacuateur de crue du barrage que si d'autres adaptations, tels que la forme / conception des EDC du barrage sont impossibles à modifier et / ou si le passage de débris n'est pas autorisé. Les râteliers peuvent empêcher le blocage des éléments mobiles et ainsi garantir la sécurité opérationnelle des vannes, des clapets, etc. En outre, l'obstruction complète de l'EDC du barrage est empêchée. Cependant, en cas de crue, la grille elle-même peut être bloquée et provoquer une remontée des remous dans le réservoir. Afin de contrôler l'augmentation du niveau d'eau de retenue, les râteliers doivent avoir une surface suffisamment large et être placées assez en amont de l'EDC du barrage. Ainsi, même lorsque la grille est complètement bloquée, de l'eau peut tout de même s'écouler sur les côtés ou sous la grille en direction de l'EDC du barrage. La vitesse moyenne d'écoulement par rapport à la section transversale de la grille doit être inférieure à 1,0 m/s. Plusieurs exemples sont illustrés par les **Figures 28 à 31**.

Hartlieb (2015) a effectué des tests sur modèles hydrauliques avec une grille oblique montante en face d'un EDC de barrage. La grille était inclinée (15° à 30°) et la distance entre les barres correspondait à la moitié de la largeur de l'ouverture du déversoir. En conséquence, l'eau retenue a pu être réduite de moitié par rapport à un déversoir obstrué. La raison pour ceci sont les vitesses d'écoulement plus faibles qui agissent sur la grille en amont, de sorte que le bois s'accumule plutôt sous la forme d'un tapis lâche d'une seule couche.

Au lieu d'une grille placée directement devant l'entrée de l'évacuateur de crue (**Figure 31a**), Hartlieb et Overhoff (2006) ont installé dix piliers verticaux de grille dans le modèle hydraulique du barrage de Grün-Tensee (Bavière, Allemagne). Ceux-ci sont disposés en demi-cercle et assez loin de l'entrée (**Figure 31b**). La distance de dégagement entre les piliers est d'environ 1,6 m (environ la largeur de la partie la plus étroite de l'EDC du barrage). Par rapport à la grille existante, les vitesses d'écoulement arrivant ainsi que les pertes au niveau de la grille sont beaucoup plus faibles. Cela évite que le BF ne soit tiré en bas et qu'il obstrue complètement la section transversale de la grille. À la surface de l'eau, il se forme un tapis de BF qui continue de s'agrandir. Si des troncs individuels franchissaient la structure de rétention et atteignaient l'EDC du barrage, ils seraient déjà alignés dans la direction de l'écoulement et pourraient être transportés en aval. Après une crue, le BF restant doit être enlevé.

L'espacement de dégagement des barres de la grille à BF ne doit pas être trop petit. Les petits morceaux de bois et les matériaux plus fins qui ne sont pas critiques pour l'EDC du barrage ne devraient pas être retenus. Cependant, les gros troncs dépassant les dimensions du plus petit dégagement du déversoir du barrage devraient être bloqués au niveau des râteliers. Selon Lange & Bezzola (2006), on peut partir du principe que le bois d'une longueur $L \geq 1.5 \cdot s$ peut être retenu par une grille avec un espacement de dégagement entre les barres de s .



Figure 28: Grand râtelier à BF au barrage de Paalbach en Autriche (Photo: Ministère fédéral de l'Agriculture, des Forêts, de l'Environnement et de la Gestion des l'Eaux, Autriche).

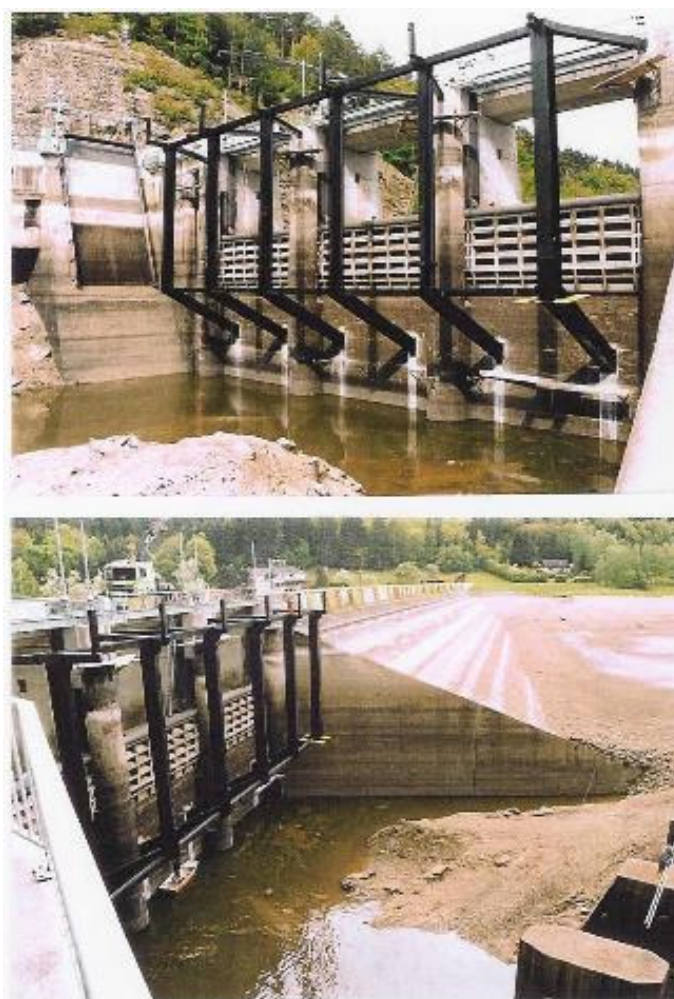


Figure 29: Grand râtelier à BF au réservoir de Thurnberg à RiverKamp en Autriche (Photo: Ministère Fédéral de l'Agriculture, des Forêts, de l'Environnement et de la Gestion des Eaux, Autriche).



Figure 30: Grand râtelier à BF situé en amont du barrage de Rotlech en Autriche (Photo: Ministère Fédéral de l'Agriculture, des Forêts, de l'Environnement et de la Gestion des Eaux en Autriche).



Figure 31: a) Ancien évacuateur de crue avec grand râtelier à BF à Grüntensee et b) nouveaux piliers de râtelier en amont (Photo: Hartlieb 2015).

Au lieu d'utiliser des râteliers, le BF peut être retenu au moyen de cloisons de partition, ou de murs d'écumage. L'installation d'une paroi d'écumage en amont s'est avérée être une mesure appropriée pour empêcher l'entrée de bois dans l'entrée de l'évacuateur en tulipe à la Kelchbach à Naters, Suisse (**Figure 32**).



Figure 32: Entrée de l'évacuateur en tulipe avec paroi d'écumage à la Kelchbach à Naters, diamètre d'environ 14 m. A gauche: Expérience sur modèle; A droite: Prototypé (Photos: Lange & Bezzola 2005).

Cependant, il est important de veiller à ce que les parois d'écumage aient une profondeur suffisante d'au moins 1 m sous la surface de l'eau. Pour des niveaux d'eau de rétention fluctuants, ceci ne peut être atteint qu'avec des déflecteurs flottants. Néanmoins, en fonction du temps de séjour du BF dans l'eau, il existe un risque que des débris flottants soient transportés sous de tels déflecteurs.

6.2.2 Rétention au moyen de barrières flottantes (Tuff Booms)

Selon Hartung & Knauss (1976), les barrières flottantes (**Figure 33**) peuvent être utilisées pour retenir le BF lors des crues. Les exemples suivants sont donnés par (Perham 1987, 1988):

- Longs troncs et tubes d'acier flottants connectés entre eux, d'un diamètre minimal de 0,25 m. Les diamètres typiques sont de 0,6 m à 1,0 m. Les troncs s'usent rapidement dans la zone où ils sont attachés ensemble et ne conviennent que comme mesure temporaire;
- Passerelles en acier légères et praticables sur des éléments flottants. Celles-ci servent également de plate-forme de travail pour l'élimination du BF après une crue. Ces passerelles ont toutefois tendance à être soulevées sur les tapis de BF en cas de survenance de grandes quantités de bois.

Les barrières flottantes peuvent être équipées d'un filet submergé constitué de chaînes pour réduire le passage du bois en général et du bois vert flottant en particulier. Des barrières flottantes peuvent être utilisées pour retenir le BF ou le dévier dans une certaine direction. Déflécter le BF sert à le guider vers une zone de passage spécifique, ou à le maintenir à l'écart des zones critiques.



Figure 33: Barrières à BF sur le lac de Brienz lors des crues de 2005 (Photo: Office Fédéral de l'Environnement, Suisse).

Bradley et al. (2005) donnent un aperçu des mesures de rétention de BF et mentionnent également les barrières flottantes. À leur avis, ces dernières ne peuvent être utilisées que de manière très limitée. Elles conviennent comme mesure pour du BF de dimensions et de volumes faibles et moyens. Perham (1987) décrit des expériences pratiques avec des barrières flottantes en détail.

Les aspects suivants doivent être pris en compte lors de l'utilisation de barrières flottantes:

1. Stabilité de la chaîne et son attachement au rivage;
2. Usure des éléments flottants et changement temporel de leur flottabilité (saturation du bois);
3. Capacité de rétention du BF;
4. Fluctuations du niveau d'eau dans le réservoir.

On ne peut répondre que de manière limitée à l'aspect 3 par des simulations de modèle physique. Habituellement, seules les forces d'écoulement sont appliquées dans un modèle, tandis que l'influence du vent et des vagues est généralement négligée. Néanmoins, les simulations de modèles montrent quelle disposition produit une capacité de rétention élevée. Les simulations sur modèle de Perham (1987) fournissent des informations sur la forme requise de la barrière flottante, sa capacité de rétention et la vitesse d'écoulement autorisée.

Avec de très longues barrières flottantes dans le réservoir, le BF risque de couler sous la barrière flottante, surtout si le bois a été dans l'eau depuis longtemps et présente une densité plus élevée. En cas de courants forts, le bois peut également être transporté sous la structure de rétention. Les forces correspondantes du BF sur les éléments de retenue doivent également être prises en compte. Dans le cas de barrages qui ne sont pas sujets aux crues en hiver, les barrières flottantes devraient être enlevées pendant la saison froide, car elles pourraient être endommagées ou détruites par de la glace dérivante. Pour le calcul de la longueur de la barrière, il convient de considérer une éventuelle vidange du réservoir afin que la chaîne ne reste pas en suspension dans l'air.

Les forces agissant sur une barrière flottante obstruée sont considérables. Celles-ci sont induites par les vagues, la pression du débit d'eau et le vent. La barrière et ses fixations (culées, ancres, bouées, etc.) doivent être dimensionnées en conséquence. En plus des aspects statiques, la flexibilité de la barrière doit également être prise en compte car les niveaux d'eau peuvent parfois fluctuer considérablement.

Une rupture de la barrière flottante entraînerait l'apparition soudaine d'un volume important et compact de BF. L'expérience a montré que ceci était l'un des scénarios les plus critiques pour l'obstruction de la structure d'entrée d'un évacuateur de crue de barrage. De plus, une barrière flottante rompue constituée de longs cylindres attachés pourrait elle-même causer une obstruction initiale et ainsi aggraver la situation.

Sur certains barrages de la rivière Kamp en Autriche, on utilise ce que l'on appelle des râteliers flottants (flotteurs avec des câbles de tension suspendus à environ 1 m sous la surface de l'eau) (**Figure 34**). Cependant, des problèmes ont également été rencontrés lorsque des câbles de tension mal conçus ont lâché lors de crues (Czerny, 2015). Cela a provoqué une accumulation soudaine de BF à l'EDC du barrage.



Figure 34: Râtelier flottant (Photo: H. Czerny, Ministère Fédéral de l'Agriculture, des Forêts, de l'Environnement et de la Gestion des Eaux, Autriche).

Les expériences avec la mise en œuvre de barrières à BF sur les lacs de Thoune, de Brienz et de Bienna en Suisse montrent que:

- En raison des courants forts, les barrières à BF ne devraient pas être placées directement devant les déversoirs, mais plutôt plus en amont dans le lac;
- Les bouées d'attachement doivent souvent être placées dans les zones peu profondes de grands lacs, où les courants sont encore très forts. Le BF peut ainsi passer plus facilement sous la barrière flottante;
- Les barrières flottantes ne sont fixées que pendant la journée et par vent faible (max. 3 - 4 Beaufort ou 3,5 à 8 m/s), car les opérations seraient trop dangereuses et les bouées pourraient être soulevées ou poussées vers le bas par le BF à cause des vagues;
- Etant donné que le vent tourne souvent après de fortes précipitations, le BF est éliminé le plus rapidement possible des barrières de rétention. Sinon, il pourrait être emporté par le vent dans la structure de rétention et être dispersé sur tout le lac.

En résumé, il est possible d'affirmer qu'à des vitesses d'écoulement faibles, les barrières flottantes peuvent être utilisées comme outil de rétention et de guidage du BF. Cependant, en cas de crue avec de fortes quantités de BF, la robustesse des barrières flottantes ne peut pas être garantie, comme le montrent plusieurs cas de rupture (**Figure 35**); voir également l'étude de cas du réservoir de Montsalvens (annexe 2). De telles ruptures doivent être évitées à tout prix lors de crues extrêmes, car cela

pourrait augmenter considérablement le risque d'obstruction de l'EDC du barrage, nuisant ainsi à la sécurité du barrage.



Figure 35: a) Barrière à BF rompue au barrage de Montsalvens (canton de Fribourg, Suisse) lors des crues de 2015 (annexe 2, photo: Groupe E); b) Centrale hydroélectrique de Tulu Ter, Malaisie: barrière flottante avec de gros volumes de BF à l'entrée du tunnel de contournement (photo: Worthington).

6.3 Mesures opérationnelles

Pour éviter les obstructions dans les systèmes de déversoirs à plusieurs ouvertures, une ouverture complète de quelques ouvertures de déversoir est préférable à une ouverture partielle de plusieurs ou de toutes les ouvertures. Aux ouvertures de déversoir avec des vannes, l'écoulement devrait être concentré au centre des ouvertures des déversoirs afin de réduire la probabilité d'obstruction aux piliers. Une option possible serait d'essayer de créer un écoulement asymétrique pour plusieurs ouvertures de déversoir, c'est-à-dire que seules les ouvertures de déversoir qui ne sont pas adjacentes sont ouvertes (**Figure 36**) aussi longtemps que le débit de crue le permet. Les troncs s'aligneraient ainsi plus facilement dans le sens de l'écoulement et la probabilité qu'ils restent bloqués au niveau des piliers séparant deux ouvertures de décharge en serait réduite.

Cependant, hormis Hartlieb (2015), il n'y a généralement pas d'enquêtes systématiques sur le contrôle des EDC de déversoirs, et l'efficacité des mesures n'est donc pas prouvée de manière concluante. Dans les cas extrêmes, la plupart des ouvertures de déversoir seraient généralement nécessaires et une opération asymétrique du système n'est donc plus possible.



Figure 36: Obstruction d'ouvertures ouvertes d'un déversoir avec système à trois ouvertures (Hartlieb 2015)



7 Conclusions et recommandations

Les recommandations de cette étude sont résumées comme suit:

Diagramme d'évaluation des dangers

Lors de l'examen d'un EDC de barrage existant et / ou de la construction d'un nouveau, il est recommandé d'utiliser le diagramme d'évaluation des dangers (**Figure 37**). Ainsi, une évaluation approximative des dangers liés à l'EDC du barrage et au barrage lui-même peut être effectuée. La procédure est la suivante:

1. Recueillir / déterminer les informations de base sur l'EDC du barrage (type, dimension, etc.) ainsi que déterminer l'impact (charges dues aux crues, volume de BF, hydraulique du déversoir du barrage);
2. Examen des recommandations concernant les dimensions minimales de l'EDC du barrage et estimation de la probabilité d'obstruction;
3. Évaluation des conséquences de l'obstruction;
4. Décision s'il existe un risque pour le barrage en raison du BF ou non;
5. Développement de mesures de réduction des risques pour le barrage

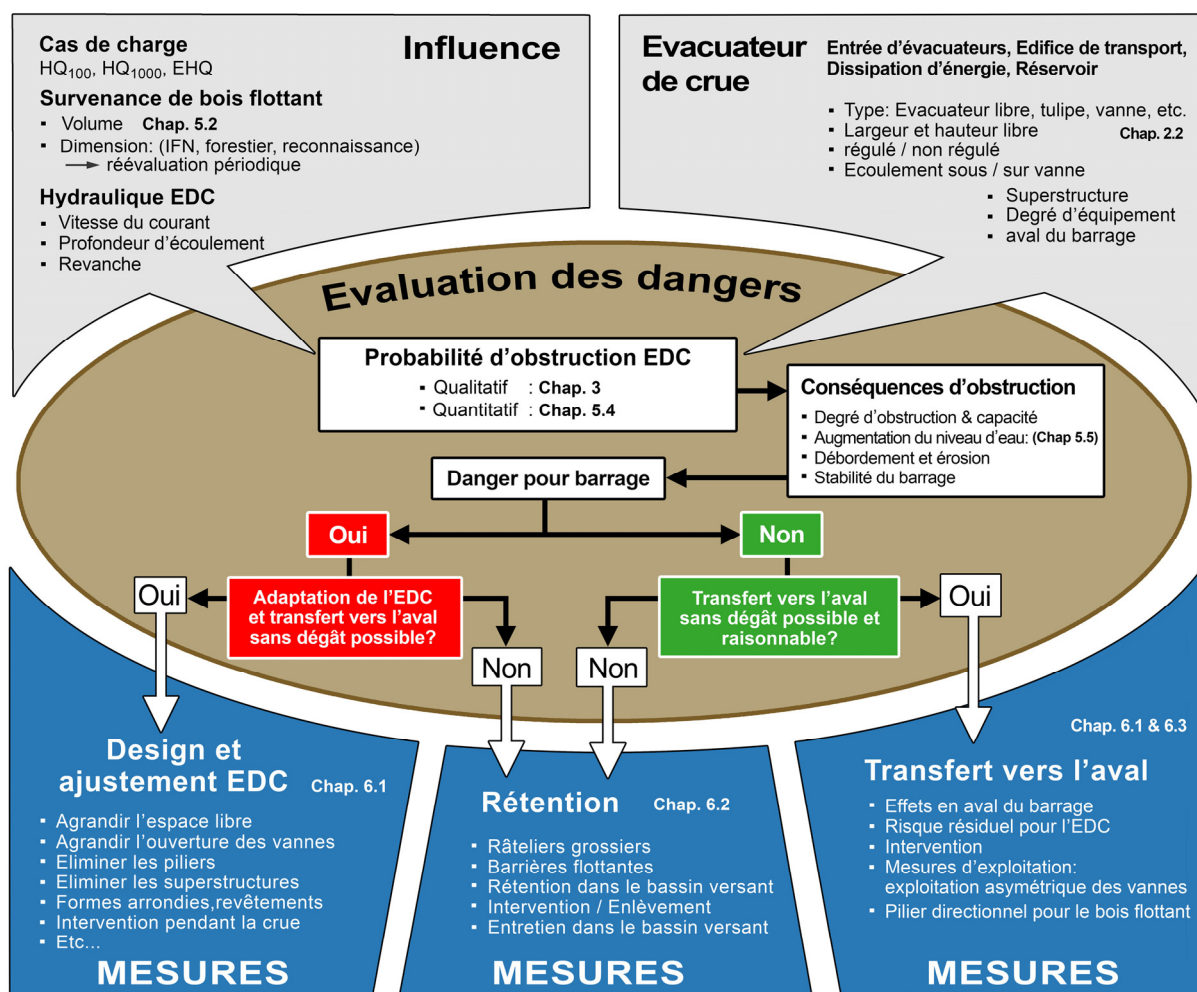


Figure 37: Diagramme d'évaluation des dangers liés aux débris flottants aux EDC de barrages.

Impact sur les évacuateurs de crue

- Les évacuateurs de crue du barrage doivent garantir une capacité de débit en cas de crue extrême (crue de sécurité) et ne doivent pas augmenter la probabilité de rupture du barrage. La rupture complète du barrage n'est pas acceptable. Cependant, dans le cas de la crue de sécurité, l'EDC du barrage peut être endommagé pour autant qu'il n'entraîne pas de déversements importants d'eau. Des hypothèses de cas de charge avec des quantités extrêmes de BF doivent donc être calculées. Pour le potentiel de BF en dessous des normes suisses, l'équation 8 (chapitre 5.1.1) de Uchiogi et al. (1996) avec un coefficient de $C = 400$ peut être utilisée comme première valeur de référence. Cependant, une analyse détaillée du bassin versant est impérative pour obtenir des données fiables sur la quantité de BF. En plus du BF, il faut s'attendre à la survenance de corps flottants importants tels que des bateaux, des balles d'ensilage, des conteneurs, etc. avec des zones peuplées et l'existence d'infrastructures dans le bassin versant.
- Pour calculer la probabilité d'obstruction, les équations d'estimation du domaine d'atténuation des crues donnent des indications initiales. Les dimensions des troncs doivent être choisies de manière prudente. Dans les cas extrêmes, cela correspond à la hauteur maximale des arbres disponible dans la zone des berges du réservoir ou dans le bassin versant le plus proche.
- Pour estimer l'augmentation du niveau d'eau de retenue dans le réservoir à la suite d'une obstruction dans un cas extrême, il est supposé qu'un râtelier est complètement obstrué. L'estimation des forces qui agissent sur le râtelier ainsi que sur l'EDC du barrage doit être faite sur cette base.
- Des incertitudes quant à la quantité de BF et aux processus d'obstruction persistent même avec des études approfondies. En cas de doute, des essais sur des modèles hydrauliques sont indispensables.

Conception / Adaptation des évacuateurs de crue de barrages

- Les structures de déversement larges et fixes sans superstructures présentent le risque le moins élevé d'obstruction et sont préférables aux déversoirs régulés dotés de vannes étroites et de ponts à déversoir.
- Les composants lisses et arrondis sont moins propices aux obstructions dues au BF. Le revêtement de protection des composants du système susceptibles de présenter des risques d'obstruction augmente l'efficacité du passage des débris flottants.
- Si possible, des mesures devraient être envisagées pour que le barrage reste totalement ou partiellement résistant aux surcharges, même si l'EDC du barrage est obstrué. Un EDC de barrage d'urgence séparé peut être inclus et ne peut être utilisé que lorsque des niveaux d'eau plus élevés sont atteints.
- Les dimensions géométriques de l'évacuateur de crue du barrage doivent de préférence être déterminées conformément au chapitre 3.1.

Rétention

- Lors du choix des types de structures de rétention, il faut tenir compte des conditions locales (quantité de BF, conception des EDC de barrage, vitesses d'écoulement, etc.). L'enlèvement et le transport des débris flottants (en



particulier, les coûts et l'accessibilité), l'élimination, ainsi que le nettoyage des râteliers doivent être inclus dans les considérations de planification.

- Aucun râtelier ne doit être placé immédiatement devant ou sur le déversoir. Les râteliers doivent être placés à une distance suffisante de la crête de l'évacuateur de crue du barrage et avoir à la fois une profondeur d'immersion des barres suffisante et une hauteur supérieure au niveau le plus élevé possible du réservoir. La vitesse moyenne d'écoulement de la section transversale du râtelier doit être inférieure à 1,0 m/s. Pour les structures de râteliers, un espacement adéquat des barres doit être choisi. L'espacement de dégagement des barres doit être $s \leq L/1.5$ afin de pouvoir retenir le BF de longueur L .
- Les barrières flottantes ne sont pas recommandées pour les EDC de barrage qui doivent fonctionner en toute sécurité dans des situations extrêmes.
- Si un écoulement partiel est dirigé loin de l'EDC du barrage (par exemple un déversement partiel lors de crues dirigé vers un autre EDC du barrage), le rejet des débris flottants au moyen de murs d'écumage peut être intéressant pour les réservoirs présentant de faibles variations du niveau d'eau (environ ± 0.3 m). Ceux-ci doivent dépasser d'au moins 1.0 m en-dessous du niveau de l'eau pour empêcher que le bois soit transporté sous le mur.
- Le volume de rétention doit être dimensionné en fonction de la quantité estimée de BF.
- L'accumulation de BF dans un réservoir lors de crues ne peut pas être exclue, même avec des mesures prises dans le bassin versant.

Passage des débris flottants

- Si les conditions en aval du barrage et la conception de l'EDC du barrage le permettent, il est souhaitable de permettre le passage de débris flottants.
- La gestion des risques résiduels tels que les cas de surcharge devrait être incluse dans les considérations de sécurité.

8 Références

- Allen, J.B., Smith, D.L. (2012). Characterizing the Impact of Geometric Simplification on Large Woody Debris Using CFD. *International Journal of Hydraulic Engineering* 2012, 1(2): 1-14
- Bänziger, R. (1990). Schwemmholz im Unwettersommer 1987. *Schweizer Ingenieur und Architekt*, 108(47): 1354–1358.
- Bertoldi, W., Ruiz-Villanueva, V. (2015). Physical and numerical modelling of wood and vegetation. *Gravel Bed Rivers* 8, Kyoto and Takayama, Japan.
- BAW (2016). Persönliche Kommunikation. Bundesanstalt für Wasserbau BAW, Karlsruhe, Deutschland.
- Bezzola, G.R., Gantenbein, S., Hollenstein, R., Minor, H.-E. (2002). Verklausung von Brückenquerschnitten. Intl. Symp. Moderne Methoden und Konzepte im Wasserbau, VAW *Mitteilung* 175 (H.-E. Minor, ed.), ETH Zürich, Zürich: 87-97.
- Bezzola, G.R., Hegg, C. (eds.) (2007). Ereignisanalyse Hochwasser 2005 Teil 1: Prozesse, Schäden und erste Einordnung. BAFU, WSL, *Umwelt-Wissen* 0825, WSL, Birmensdorf.
- Bezzola, G.R., Hegg, C. (eds.) (2008). Ereignisanalyse Hochwasser 2005 Teil 2: Analyse von Prozessen, Massnahmen und Gefahregrundlagen. BAFU, WSL, *Umwelt-Wissen* 0825, WSL, Birmensdorf.
- BFE (2017). Richtlinie über die Sicherheit der Stauanlagen - Teil C2: Hochwassersicherheit und Stauseeabsenkung. Bundesamt für Energie BFE, Bern.
- Boes R.M., Lutz N., Lais A. & Lucas J. (2013). Hydraulic modelling of floating debris conveyance for a spillway upgrade at a large rockfill dam. *Proc. 9th ICOLD European Club Symposium*, Venice, Italy: Paper A8.
- Bornschein, A., Aigner, D., Pohl, R. (2002). Der Bruch des Hochwasserrückhaltebeckens Glashütte. WWT-awt, HUSS-Medien GmbH, Verlag für Bauwesen Berlin, Ausgabe 7.
- Bocchiola, D., Catalano, F., Menduni, G, Passoni, G. (2002). An analytical–numerical approach to the hydraulics of floating debris in river channels. *Journal of Hydrology* 269: 65–78.
- Bradley, J.B., Richards, D.L., Bahner, C.D. (2005). Debris Control Structures, Evaluation and Countermeasures. Publication No. FHWA-IF-04-016, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration FHWA, Salem, Oregon.
- Braudrick C.A., Grant G.E. (2000). When do logs move in rivers? *Water Resour. Res.* 36(2): 571–583.
- Bruschin, J., Bauer, S., Delley, P., Trucco, G. (1981). The overtopping of the Palagnedra Dam. *Water Power & Dam Constructions* 34: 13-19.
- BWG (2002). *Sicherheit der Stauanlagen*. Bundesamt für Energie BFE.
- Covi, S. (2009). Schwemmholzrisiken reduzieren. *TEC21*, (31/32): 22–25.
- Czerny, H. (2015). Persönliche Kommunikation. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien, Österreich.
- Flussbau AG (2009). Schwemmholzstudie Sihl. *Bericht* Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft des Kanton Zürichs, 87 S.
- Godtland, K., Tesaker, E. (1994). Clogging of spillways by trash. *Proc. 18th ICOLD Kongress*, Durban: 543–557.
- Hartlieb, A., Kanuss, J., Strobel, T. (1996). Sylvensteinspeicher – alte Entlastungsanlage. *Versuchsbericht* Nr. 320 der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU München (unveröffentlicht).



- Hartlieb, A., Overhoff, G. (2006). Die geplante Ertüchtigung der Hochwasserentlastungsanlage an der Talsperre Grüntensee im Allgäu. *Wasserbausymposium: Stauhaltungen und Speicher - Von der Tradition zur Moderne*, Graz. Bd. 2. Technische Universität Graz. Verlag der Technischen Universität Graz: 67–79.
- Hartlieb, A. (2012). Modellversuche zur Verklausung von Hochwasserentlastungsanlagen mit Schwemmholz. *Wasserwirtschaft*, 102(6): 15–19.
- Hartlieb, A. (2015). Schwemmholz in Fließgewässern - Gefahren und Lösungsmöglichkeiten. *Berichte des Lehrstuhls und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität München*, Heft 133 (Monographie).
- Hartung, F., Knauss, J. (1976). Considerations for Spillways Exposed to Dangerous Clogging Conditions. *Proc. 12th ICOLD Congress, Mexico*: 741-749.
- Ishikawa, Y. 1989. Studies on Diasters Caused by Debris Flows Carrying Floating Logs Down Mountain Streams, *PhD dissertation*, Kyoto University, 121 pp.
- Johansson, N., Cederström, M. (1995). Floating debris and spillways. *Proc. of the International Conference on Hydropower. AMER SOC Civil Engineers*: 2106–2115.
- Kälin, R., Ballini, D., Meier, J. (2005). Abspülen von GescFRSmmselfleppichen: Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit von Stahlwasserbauten. *Wasser, Energie, Luft* 97(1/2): 11-13.
- Lancaster, S.T, Hayes, S.K. (2001). Modeling Sediment and Wood Storage and Dynamics in Small Mountainous Watersheds. *Water Sci. and Application* 4: 85-102.
- Lange, D., Bezzola, G. R. (2006). Schwemmholz - Probleme und Lösungsansätze. *VAW-Mitteilung* 188 (H.-E. Minor, ed.), Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW), ETH Zürich.
- Leite Ribeiro, M., Pfister, M., Schleiss, A.J., Boillat, J.-L. (2012). Hydraulic design of A-type Piano Key Weirs. *Journal of Hydraulic Research* 50(4): 400-408, DOI: 10.1080/00221686.2012.695041.
- Lucas, J., Lutz, N., Lais, A., Hager, W.H. & Boes, R.M. (2015). Side-channel flow. *Jl. of Hydr. Engineering* 141(9): 11 pages, [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001029](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001029).
- Lucía, A., Comiti, F., Borga, M., Cavalli, M. Marchi, L. (2015). Dynamics of large wood during a flash flood in two mountain catchments. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 3(2): 1643–1680. doi:10.5194/nhessd-3-1643-2015.
- Mazzorana B., Hübl J., Zischg A., Largiader A. (2010). Modelling woody material transport and deposition in alpine rivers. *Nat. Hazards* 56: 425–449.
- Melville, B.W., Dongol, D.M. (1992). Bridge pier scour with debris accumulation. *Journal Hydraul. Engng.* 118(9), 1306-1310.
- Meyer, J. (2013). Entwicklung eines GIS- basierten Verfahrens zur Abschätzung des Schwemmholzpotenzials in Wildbacheinzugsgebieten. *Magisterarb.* Ludwig-Maximilians-Universität München. Paper Wasserbausymposium, Band 2.
- Perham, R. E. (1986). Floating Debris Control Systems for Hydroelectric Plant Intakes. *The REMR Bulletin*, 3(2).
- Perham, R.E. (1987). Floating debris control; A literature review. *Final report* REMR-HY-2. US Army Corps of Engineers, Washington, DC.
- Perham, R.E. (1988). Elements of floating-debris control systems. *Final report* REMR-HY-3. US Army Cold Regions Research and Engineering, Hanover, NH, USA.
- Pfister, M., Capobianco, D., Tullis, B., Schleiss, A.J. (2013a). Debris blocking sensitivity of Piano Key weirs under reservoir type approach flow. *Journal of Hydraulic Engineering* 139(11): 1134-1141, DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000780.

- Pfister, M., Schleiss, A.J., Tullis, B. (2013b). Effect of driftwood on hydraulic head of Piano Key weirs. *Intl. Workshop Labyrinth and Piano Key Weirs II (PKW 2013)*: 255-264, CRC Press, Boca Raton. DOI: 10.1201/b15985-35.
- Pfister, M. (2015). Das Klaviertastenwehr (PKW) als effizientes Einlaufbauwerk zur Erhöhung der Abflusskapazität bestehender Hochwasserentlastungsanlagen. *KW Korrespondenz Wasserwirtschaft* 8(11): 673-679, DOI: 10.3243/kwe2015.11.001.
- Pfister, M., Tullis, B., Schleiss, A.J. (2015). Closure to Debris blocking sensitivity of Piano Key weirs under reservoir type approach flow. *Journal of Hydraulic Engineering* 141(10), 07015013. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001035.
- Rickenmann, D. (1997). Schwemmholz und Hochwasser. *Wasser, Energie, Luft* 89(5/6): 115-119.
- Rimböck, A. (2001). Luftbildbasierte Abschätzung des Schwemmholzpotentials (LASP) in Wildbächen *Bericht* Nr. 91, Lehrstuhl f. Wasserbau, TU München, Deutschland: 202-213.
- Rimböck, A., Strobl, T. (2001). Schwemmholzpotential und Schwemmholzrückhalt am Beispiel Partnach/Ferchenbach (Oberbayern). *Wildbach- und Lawinenverbau* 145(65): 15-27.
- Rimböck, A. (2003). Schwemmholzrückhalt in Wildbächen. *Doktorarbeit, Bericht* Nr. 94, Lehrstuhl f. Wasserbau, TU München, Deutschland.
- Roesler, F., Bettzieche, V. (2000). Verlegung der Entlastungsanlagen von Talsperren bei Hochwasser. *Wasserwirtschaft* 90(5): 1-6.
- Ruggeri, G. (2014). Persönliche Kommunikation.
- Ruiz-Villanueva V., Bladé-Castellet E., Sánchez-Juny M., Martí B., (2014). Two dimensional numerical modelling of wood transport. *J. Hydroinform.* 16: 1077–1096.
- Ruiz-Villanueva V., Piégay, H., Gartner, V., Perret, F., Stoffel, M. (2016). Wood density and moisture sorption and its influence on large wood mobility in rivers. *Catena* 140: 182-194.
- Schalko, I., Schmocker, L., Weitbrecht, V., Boes, R. (2017a). Schwemmholz: Gefahrenbeurteilung und Massnahmenplanung am Fallbeispiel RengBFach, Kanton Luzern. *Wasser, Energie, Luft* 109(4): 271-278.
- Schalko, I., Schmocker, L., Weitbrecht, V., Boes, R. (2017b). Verklausungswahrscheinlichkeit und Aufstau – Aktuelle Forschung zum Thema Schwemmholz an der VAW. *Proc. Fachtagung „Naturgefahren – von der Sturzflut zur Schwemmholzverklausung“*, TU München: 75-84.
- Schmocker, L. Hager, W.H. (2011). Probability of drift blockage at bridge decks. *Journal Hydraul. Engng.* 137(4): 480-492.
- Schmocker, L. (2017). Floating debris retention racks at dam spillways. Proceedings of the 37th IAHR World Congress, Kuala Lumpur, Malaysia, 2116 - 2123.
- Steeb, N., Rickenmann, D., Rickli, C., Badoux A. & Waldner, P. (2016). Size reduction of large wood in steep mountain streams. *River Flow* 2016, 2320-2325.
- Uchiogi, T., Shima, J., Tajima, H., Ishikawa, Y. (1996). Design methods for wood-debris entrapment. *Intl. Symp. Interpraevent* 5: 279-288.
- U.S. Bureau of Reclamation. (1987). Design of Small Dams, 3rd Edition, 860 pp.
- VAW (2008). Ereignisanalyse Hochwasser 2005: Teilprojekt Schwemmholz. *Bericht* 4240, VAW, ETH Zürich, Zürich.
- VAW (2016). Schwemmholzgutachten RengBFach (LU). *Bericht* 4334, VAW, ETH Zürich, Zürich (unveröffentlicht).
- Wallerstein, N.P., Thorne, C.R., Abt, S.R. (1996). Debris control at hydraulic structures - management of woody debris in natural channels and at hydraulic structures. *Report* U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, USA.



Yang, J., Johansson, N., Cederström, M. (2009). Handling reservoir floating debris for safe spillway discharge of extreme floods - Laboratory investigations. *Proc. 25th ICOLD Congress, Q.91-R.4, Brasilia.*

Zollinger, F. (1983). Die Vorgänge in einem Geschiebeablagerungsplatz. *Doktorarbeit* Nr. 7419, ETH Zürich,

<https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/138150>.



Annexe 1: Questionnaire du Sondage

Questionnaire

1. Données Générales

Nom du Barrage (si nécessaire du Reservoir):

Nom de la Rivière:

Exploitant:

Personne de Contact:

2. Hydrologie et ressources en eau

Veuillez indiquer si les valeurs sont mesurées (M), calculées (R) ou estimée (S).

Bas débit NQ [M³/s]:

Moyen Débit MQ [M³/s]:

Débit de crue HQ₁ [M³/s]:

Débit de crue HQ₁₀₀ [M³/s]:

Crue Nominale HQ₁₀₀₀ [M³/s]:

Crue de sécurité de référence SHQ [M³/s]:

Bassin versant du barrage [km²]:

Niveau d'approvisionnement plein [AMSL]:

Niveau Opérationnel Minimum [AMSL]:

Volume du réservoir avec stockage plein (Niveau de l'eau à pleine capacité) [m³]:

3. Information sur le type d'EDC du barrage

Type de structure d'entrée (p.ex., entrée en tulipe, déversoir frontal/latéral,...):

Régulé/non-régulé (si régulé, comment?):

Nombre n de sections de l'évacuateur (p.ex. $n = 3$ ouvertures de déversoir, $n = 1$ entrée en tulipe, ...):

Autres structures d'écoulement (sans canal d'amenée, p.ex. structure d'évacuation de fond, structure d'évacuation intermédiaire, ...):

Capacité de l'EDC du barrage à plein stockage [m³/s] (sans structures d'évacuation de fond, structure d'évacuation intermédiaire):

Niveau d'eau calculé pour la crue nominale de n EDC (excluant les structures d'évacuation de fond, et intermédiaires) [m]:

Niveau d'eau calculé pour la crue de sécurité de référence [m]:



Dimensions de l'EDC du barrage, L x H ou D [m]:

Profondeur de l'écoulement à la structure d'entrée de l'EDC pour le débit de crue [m]:

Inclinaison de l'EDC du barrage par rapport à la surface de l'eau [-]:

Fréquence moyenne de l'opération de l'EDC du barrage?

Capacité de la structure d'évacuation de fond à plein stockage [m³/s]:

Dimensions de la structure d'évacuation de fond L x H ou D [m]:

Fréquence moyenne de l'opération de la structure d'évacuation de fond?

Capacité de tout autre système d'EDC (p.ex. structure d'évacuation intermédiaire) [m³/s]:

4. Bois flottant / Débris flottants

Y a-t-il survenance de BF à cette installation? Oui Non

Si oui, le BF est-il enlevé? Oui Non

Si oui, type, lieu et fréquence d'enlèvement?

Le BF est-il passé à travers/par dessus l'EDC du barrage? Oui Non

Si oui, quelles mesures opérationnelles sont mises en œuvre (si applicable)?

Existe-t-il des informations sur la quantité et les dimensions du BF enlevé? Oui Non

Si oui, veuillez svp inclure les données séparément (quantité, date)

Existe-t-il des informations sur les dimensions du BF?? Oui Non

5. Damages

Y a-t-il déjà eu des problèmes dûs au bois flottant? Oui Non

Si oui, description des problèmes ou des dommages?

Les dommages ont-ils été documentés (photos, sketches, etc.) Oui Non

6. Documents

Est-il possible d'obtenir des plans de l'EDC du barrage? Oui Non

Est-il possible d'obtenir la documentation des dommages? Oui Non

7. Autre / Remarques

Un râtelier à BF ou d'autres mesures sont-elles planifiées? Oui Non

Si oui, y a-t-il des plans / sketches? (veuillez les joindre)

Complété le (date):

Nom:

Signature

Annexe 2: Etudes de Cas

1) Käppelistutz

Käppelistutz			
Nom du Barrage	Käppelistutz		
Nom de la rivière	Secklis		
Exploitant	Kantonales Elektrizitätswerk Nidwalden		
Volume du Réservoir	60'000 m ³		
Surface du Lac à pleine capacité d'approvisionnement	10'050 m ²		
Hydrologie		Bassin Versant	
Crue HQ ₁₀₀	96 m ³ /s	Surface	24.2 km ²
Crue Nominale HQ ₁₀₀₀	118 m ³ /s	Couverture Végétale	28%
Niveau à pleine capacité d'approvisionnement	795.50 amsl	Niveau de la crête du Barrage	795.5 amsl

(EDC du Barrage) (Type, structure d'entrée, régulé/non régulé, nombre de structures d'évacuation, structures d'évacuation de fond etc.)

Type	Déversement Fixe, non régulé
Dimensions	3 ouvertures de déversoir, (LxH)= 8.25 m x 1.9 m, 9.5 m x 1.9 m, 8.25 m x 1.9 m
Capacité	130 m ³ /s

Le système de décharge de crue consiste en un déversement frontal et fixe à une altitude de 795,5 m (Figure 1). La hauteur de dégagement est limitée en raison du pont de déversoir. De plus, une évacuation de fond d'une capacité de 24 m³/s de dimensions (LxH) de 1,8 m sur 2 m est disponible, le niveau d'entrée est situé à 781,7 m au dessus du niveau de la mer.

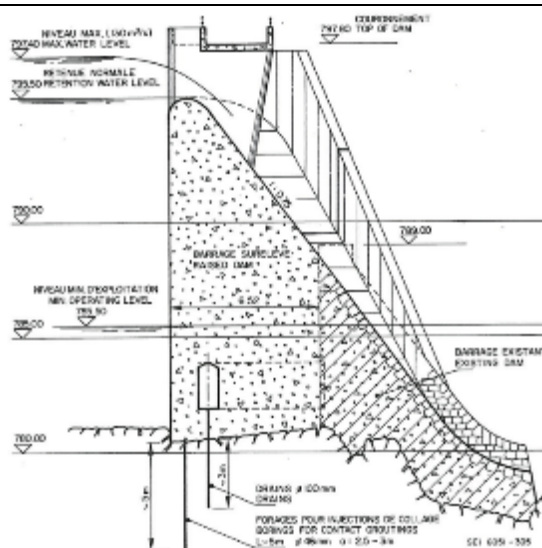


Figure 1: Coupe transversale du Barrage de Käppelistutz, Source: Stamm (1984)

Bois flottant (Le Bois flottant passe-t-il à travers l'évacuateur du barrage ou est-il enlevé? Mesures existantes contre le bois flottant?)

Le bois flottant survient à cette installation et ne sera enlevé que pendant ou après les crues extrêmes. En cas de crue, les sont déversés via l'évacuateur de crue du barrage. En cas de crue et de présence importante de bois, un suivi est effectué sur le site.

Crue d'Août 2005

Annualité	≈HQ ₃₀ , débit maximum de la rivière Seckli env. 30-40 m ³ /s
Survenance de bois flottant	300 m ³
Description de l'évènement	À la suite des glissements de terrain et de l'érosion des berges, de grandes quantités de sédiments et de bois flottant ont été entraînés. Le réservoir de Käppelistutz a agi comme un piège à débris et un total d'environ 60'000 m ³ de débris et 300 m ³ de bois flottant (volume fixe) ont été déposés (Fig. 2-4). Le bois flottant consistait principalement en bois frais avec des longueurs de tronc allant jusqu'à 10 m et des racines avec des diamètres allant jusqu'à 3 m. De plus, beaucoup de petits bois ont été entraînés depuis des piles de bois.
Problèmes à l'EDC du barrage	Une partie du bois a été déviée via le système d'évacuation de crue. Cependant, il y avait aussi des obstructions dans l'ouverture du déversoir (Fig. 3).
Evaluation	<p>Directives spécifiées CH:</p> <p>$L_p \geq 0.80 * H_t = 8 \text{ m} \rightarrow$ conforme</p> <p>$H_b \geq 0.20 * H_t = 2 \text{ m} \rightarrow$ non conforme</p> <p>Directives spécifiées FR:</p> <p>$L_p \geq 13 \text{ m} \rightarrow$ non conforme</p> <p>$H_b \geq 2.0 \text{ m} \rightarrow$ non conforme</p> <p>(L_p = largeur de dégagement de l'ouverture du déversoir = 8.25 m, H_b = hauteur de dégagement de l'ouverture du déversoir = 1.9 m, H_t = longueur de tronc = 10 m)</p> <p>Selon les directives, les dimensions de l'ouverture du déversoir sont trop petites et il fallait s'attendre à une obstruction. Cela a été confirmé par les crues de 2005. Les débits sortants étaient relativement faibles, avec un peu moins de</p>

	<p>HQ₃₀, l'eau pouvait néanmoins être drainée par l'EDC du barrage partiellement obstrué.</p>
<p>Mesures / Ex- périence</p>	<p>Le bois de Käppelistutz a été enlevé mécaniquement après la crue. La vidange du réservoir et l'élimination mécanique supplémentaire des sédiments ont été effectués conformément à la réglementation environnementale. Cela a permis de restaurer une partie du volume du réservoir.</p> <p>Afin de pouvoir agir de manière préventive en cas de danger, des services d'alarme tels que "Weather Alert" (Meteosuisse) et le Bulletin des risques naturels de l'OFEV (hydrodaten.admin.ch) sont maintenant utilisés activement. Dans les situations dangereuses (à des niveaux "élevé" et "très élevé"), cela permet de prendre des mesures préventives (par exemple, inspections d'installations, fourniture d'équipements, etc.) sur la base de checklists. Un certain niveau de préparation aux obstacles éventuels et la protection des centrales électriques contre les crues sont ainsi possibles.</p>
<p>Photos</p>	 <p>Figure 2: Obstruction de l'EDC du barrage par du bois flottant pendant la crue de 2005 (Source: EW Nidwalden)</p> 



Figure 3: Obstruction de l'EDC du barrage par du bois flottant pendant la crue de 2005 (Source: EW Nidwalden)



Figure 4: Dépôts de sédiments dans le réservoir de Käppelistutz après les crues de 2005 (Source: EW Nidwalden)

2) Schlattli

Schlattli

Nom du Barrage	Schlattli		
Nom de la rivière	Muota		
Exploitant	ebs Energie AG		
Volume du Réservoir	Env. 350'000 m ³		
Surface du Lac à pleine capacité d'approvisionnement	Env. 100'000 m ²		
Hydrologie	Bassin Versant		
Crue HQ ₁₀₀	280 m ³ /s	Surface	210 km ²
Crue Nominale HQ ₁₀₀₀	610 m ³ /s	Couverture Végétale	Env. 16 %
Niveau à pleine capacité d'approvisionnement	550.0 amsl	Niveau de la crête du Barrage	552.0 m asl

(EDC du Barrage) (Type, structure d'entrée, régulé/non régulé, nombre de structures d'évacuation, structures d'évacuation de fond etc.)

Type	1) Structure d'évacuation de fond, régulée (vanne principale et régulée) 2) Déversement, clapets régulée 3) Tunnel de contournement, régulé
Dimensions	1) Structure d'évacuation de fond, (LxH) = 7.0 m x 6.0 m 2) Déversement, (LxH) = 6.0 m x 3.0 m 3) Tunnel de contournement (LxH) = 4.0 m x 4.5 m
Capacité:	(1) 530 m ³ /s + (2) 12 m ³ /s + (3) 194 m ³ /s = 736 m ³ /s

Le déversoir de Schlattli est équipé d'un total de trois EDC. Une structure d'évacuation de fond à une altitude de 537.00 m et un déversement frontal similaire à une altitude de 549.00 m. La structure d'évacuation de bas niveau est fermée par une vanne principale et des vannes de régulation, et le déversement par un volet de 1.0 m de hauteur (Fig. 2).

Il y a un tunnel de contournement sur la rive orographique gauche (Fig. 1). De plus, le déversoir possède deux structures d'évacuation de fond d'une capacité totale d'env. 62 m³/s et avec dimensions de (lxh) 1.2 m x 1.9m et 0.8m x 1.9m, respectivement. L'entrée des structures d'évacuation de fond se situe à 534,00 m au dessus du niveau de la mer.

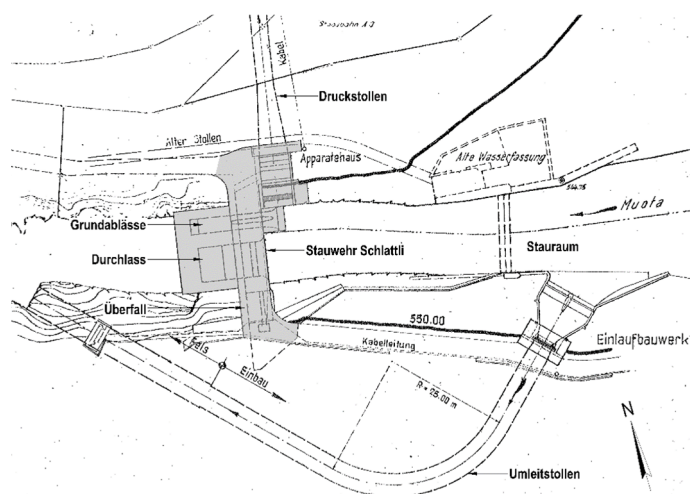


Figure 1: Vue d'ensemble du déversoir de Schlattli (Source: ebs Energie AG)

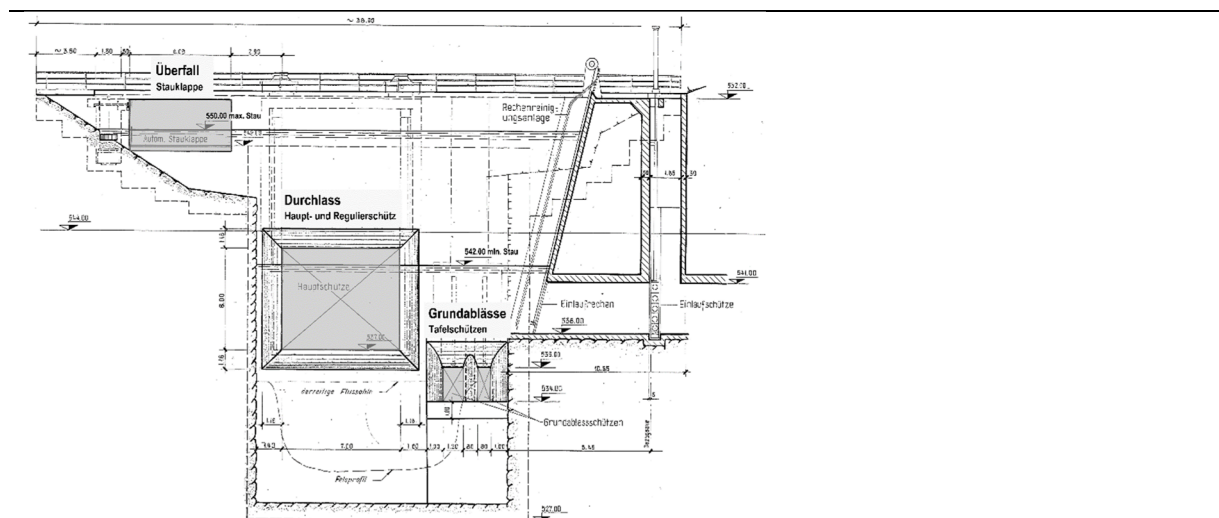


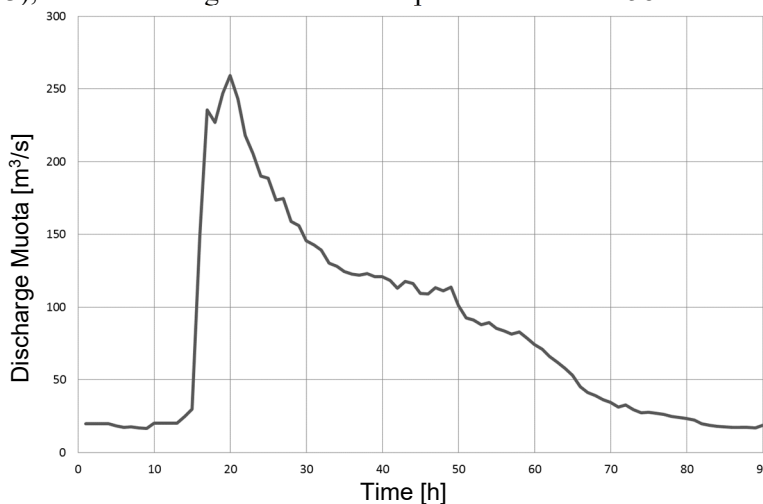
Figure 2: Vue en amont du déversoir de Schlattli (Source: ebs Energie AG)

Bois flottant (Le bois flottant passe-t-il à travers l'évacuateur du barrage ou est-il enlevé? Mesures existantes contre le bois flottant?)

Le bois flottant survient à cette installation et ne seront enlevés que pendant ou après les crues extrêmes. En cas de crue, le bois flottant est évacué via l'évacuateur de crue du barrage (structure d'évacuation de fond). En cas de crue et de présence importante de bois, un suivi est effectué sur le site.

Crue de Juillet 2010

Annualité	≈ HQ ₆₀ , débit maximum de la rivière Muota env. 258 m ³ /s
Survenance de bois flottant	Env. 1'800 m ³ (volume compact)
Description de l'évènement	<p>Le 12 juillet 2010, la Suisse a été frappée par de violents orages. Le canton de Schwyz, parmi d'autres régions, a été particulièrement touché, dans la région de la vallée du Muota où se sont développés de violents orages qui ont provoqué de gros dégâts. En très peu de temps, les routes étaient submergées par des ruisseaux en crue, avec de gros volumes de débris et de bois flottant.</p> <p>La survenue d'un orage sur une courte période dans le bassin versant du Muota a entraîné une augmentation très rapide du ruissellement (Figure 3), le muota atteignant un débit de pointe d'environ 258 m³/s.</p>



	<p>Figure 3: Hydrogramme de la crue de 2010 au déversoir de Schlattli (Source: ebs Energie AG)</p> <p>L'augmentation rapide du ruissellement a entraîné une mobilisation inhabituellement rapide de bois flottant. Cela a entraîné une obstruction de l'ouverture de la vanne de régulation du déversoir de Schlattli, rendant impossible toute ouverture ultérieure de la structure d'évacuation. En raison de son obstruction, le niveau d'eau dans le réservoir a augmenté relativement rapidement. En raison de problèmes techniques et de l'augmentation de la pression hydrostatique, la vanne du tunnel de contournement n'a pas pu être ouverte. Ainsi, l'eau s'écoulant dans le réservoir n'était détournée que par les structures d'évacuation de fond et le déversement. En conséquence, presque tout le bois flottant a été retenu dans le réservoir (Fig. 4).</p>
<p>Problèmes à l'EDC du barrage</p>	<p>Les vannes de régulation ont été obstruées (Fig. 5), ce qui a considérablement réduit la capacité à décharger les volumes de la crue.</p>
<p>Evaluation</p>	<p>Directives spécifiées CH:</p> <p>$L_p \geq 0.80 * H_t = 8 \text{ m} \rightarrow$ non conforme $H_b \geq 0.20 * H_t = 2 \text{ m} \rightarrow$ conforme</p> <p>Directives spécifiées FR:</p> <p>$L_p \geq 13 \text{ m} \rightarrow$ non conforme $H_b \geq 2.0 \text{ m} \rightarrow$ conforme</p> <p>(L_p = largeur de dégagement du déversoir = 6.0 m, H_b = hauteur de dégagement du déversoir = 3.0 m (clapets), H_t = longueur des troncs = 10 m)</p> <p>Selon les directives, les dimensions de l'ouverture étaient trop petites et il fallait s'attendre à des obstructions, ce qui a été confirmé par les crues de 2010. Même si le déversement et les structures d'évacuation de fond fonctionnaient toujours après l'obstruction de l'ouverture, le facteur décisif pour que le déversoir n'ait pas débordé a été la vague de crue qui s'est estompée au bout de deux heures environ.</p> <p>Habituellement, la vidange des réservoirs est effectuée lors de crues en ouvrant les vannes principales et de régulation, permettant ainsi le passage en aval de bois flottant ainsi que d'autres débris à travers la structure d'évacuation. Dans ce cas, le bois flottant en amont du déversoir est aligné parallèlement au courant et passe donc par la structure d'évacuation. La méthode de vidange n'a rencontré aucun problème en ce qui concerne les dimensions de la structure d'évacuation depuis la mise en service de l'installation en 1966, jusqu'à la crue de 2010.</p>
<p>Mesures / Expérience</p>	<p>Le bois flottant retenu dans le barrage de Schlattli a été enlevé mécaniquement après la crue (figure 6). Plusieurs vidanges ont été effectuées conformément à la réglementation environnementale. Les sédiments ont été évacués en aval et le volume du réservoir a été restauré.</p> <p>Pendant ce temps, ebs Energie AG a planifié l'ajustement structurel de l'EDC du barrage.</p>



Photos



Figure 4: Grand tapis de bois dans le réservoir de Schlattli après les crues de 2010
(Source: ebs Energie AG)



Figure 5: Obstruction de structure d'évacuation due au bois flottant après la crue de 2010 (Source: ebs Energie AG)



Figure 6: Enlèvement mécanique de bois flottant à la structure d'entrée après la crue de 2010 (Source: ebs Energie AG)



3) Palagnedra

Palagnedra

Nom du Barrage	Palagnedra		
Nom de la rivière	Melezza		
Exploitant	Ofima		
Volume du Réservoir	4'260'000 m ³		
Surface du Lac à pleine capacité d'approvisionnement	255'000 m ²		
Hydrologie		Bassin Versant	
Crue HQ ₁₀₀	1050 m ³ /s	Surface	140 km ² / 444 km ² avec tunnels de transfert d'eau
Crue Nominale HQ ₁₀₀₀	1800 m ³ /s	Couverture Végétale	unknown
Niveau à pleine capacité d'approvisionnement	486.70 amsl	Niveau de la crête du Barrage	487.50 amsl

(EDC du Barrage) (Type, structure d'entrée, régulé/non régulé, nombre de structures d'évacuation, structures d'évacuation de fond etc.)

Type	Déversement Fixe, non régulé
Dimensions	L = 80 m ouvertures du déversoir Ancien évacuateur du Barrage: 13 ouvertures, chacune avec 5.40 m de largeur de dégagement et piliers intermédiaires solides de 0.80 m avec capacité de décharge de 450 m ³ /s
Capacité	2'200 m ³ /s

Le déversoir consiste en un déversement frontal fixe d'une longueur de 80 m. Après les crues de 1978, l'évacuateur du barrage a été reconstruit. L'ancien évacuateur du barrage consistait en 13 ouvertures d'une largeur de dégagement de 5.40 m, chacune avec des piliers intermédiaires de 0,80 m, une hauteur de dégagement de 3 m et une capacité de vidange de 450 m³/s (Figure 1). L'eau est renvoyée dans la rivière Melezza par un tremplin à une altitude d'env. 455.00 msm pour une largeur de 23.80 m.

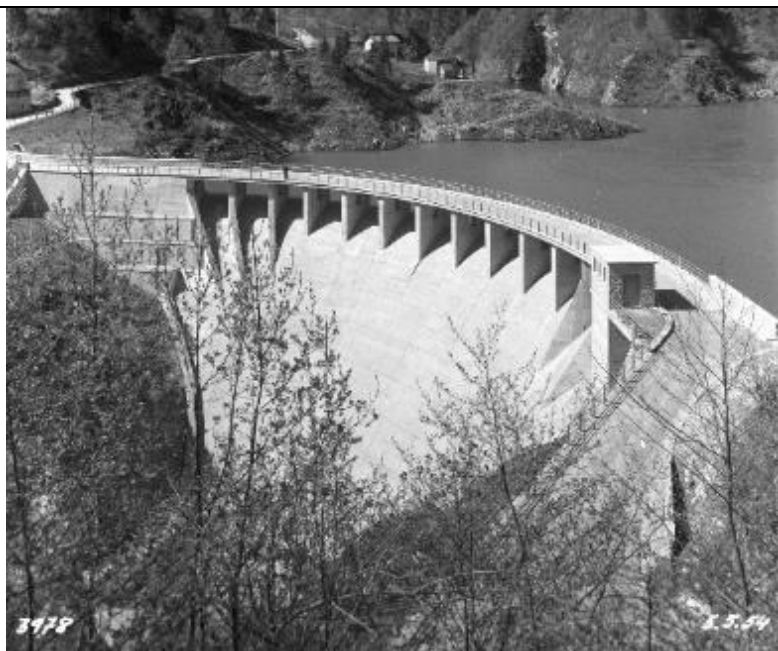


Figure 1: Ancien évacuateur de crue du Barrage de Palagnedra (Source: Ofima 1954)

Bois flottant (Le bois flottant passe-t-il à travers l'évacuateur du barrage ou est-il enlevé? Mesures existantes contre le bois flottant?)

Le bois flottant survient à cette installation et n'est pas enlevé mais déchargé par l'EDC du barrage.

Crue du 7.8.1978 (voir aussi Bruschin et al. 1981)

Annualité	≈HQ ₁₀₀ , débit maximum de la rivière Melezza env. 900 m ³ /s
Survenance de bois flottant	30'000 m ³
Description de l'évènement	<p>Vers le soir du 7 août 1978, de grandes parties du canton du Tessin et du Misoix, ainsi que des territoires italiens voisins, ont été frappés par un orage d'une force sans précédent. Dans la région de Palagnedra, la pluie a commencé à 7 heures le 7 août et a duré 23 heures. Le niveau de pluie a été mesuré à 314 mm à la centrale de Maggia. Depuis le début de l'exploitation de cette installation en 1964, cette valeur de précipitation n'a été dépassée qu'en 1965 avec 348 mm. Le débit du bassin versant de Melezza en Italie voisine, mesuré à la station près de Camedo, a donné les valeurs suivantes:</p> <ul style="list-style-type: none"> • le 6 Août 1978 env. 10 m³/s • augmentations du 7 Aout 1978 <ul style="list-style-type: none"> 150 m³/s à 13:30 240 m³/s à 15:30 500 m³/s à 18:00 900 m³/s à 19:00 <p>Le niveau du réservoir a atteint le pont routier sur le barrage à une altitude de 4900 m. Selon un témoin de l'époque, une énorme vague d'eau et de bois de 2 à 3 m a traversé le pont. Par la suite, la surface du lac était complètement recouverte de troncs d'arbres. La quantité de bois estimée est d'environ 30 000 m³. Le débit d'eau déterminé par la suite par des marques sur les rives du fleuve est estimé à 2000 m³/s. Les troncs se sont coincés dans les ouvertures étroites de 5.40 m du déversoir et ont créé une</p>



	<p>obstruction. D'autres troncs ont formé des obstacles sur le pont routier (figures 2 et 3). Comme on peut le constater d'après l'hélicoptère, les fortes pluies exceptionnelles, associées aux pentes raides de la vallée escarpée en amont de la Melezza et à ses innombrables affluents, ont balayé de vastes étendues de pâturages et de prairies ainsi que des zones couvertes de forêts. Les routes, les voies ferrées et les ponts ont été emportés et déversés dans le réservoir de Palagnedra. La quantité de débris entraînée a été estimée à env. 2 millions de m³. Le volume du réservoir d'origine d'env. 4.8 millions de m³ ont été remplis avec un total de 3.2 millions de m³ de débris solides (principalement du sable). Les dépôts au barrage ont atteint une altitude de 456.00 msm.</p> <p>Malheureusement, sur l'ordre de la police cantonale au moment du débit maximal d'eau et de débris, les ouvertures de vidange ont été fermées. Ainsi, l'accumulation de débris a atteint une altitude de 487.00 msm. La structure d'évacuation de fond était couverte jusqu'à 27.0 m et la structure d'évacuation intermédiaire jusqu'à 13.0 m, et partiellement obstruée par du bois. Cependant, les dommages les plus préoccupants pour la sécurité du barrage ont été causés par la crue du mur de 3 m d'épaisseur de la rive droite. Le mur a été submergé par un déversement d'env. 8.00 m et l'eau a creusé une brèche dans la roche meuble de 20.0 à 25.0 m de large, 33.0 m de hauteur, entraînant un volume d'env. 50 000 m³ (Fig. 3). Cependant, sur la route principale, aucun dommage affectant la sécurité n'a été recensé.</p>
<p>Problèmes à l'EDC du barrage</p>	<p>L'évacuateur du barrage était complètement obstrué par des longs bois. (Figure 2).</p>
<p>Evaluation</p>	<p>Ancien EDC du barrage:</p> <p>Directives spécifiées CH:</p> $L_p \geq 0.80 * H_t = 8 \text{ m} \rightarrow \text{non conforme}$ $H_b \geq 0.20 * H_t = 2 \text{ m} \rightarrow \text{conforme}$ <p>Directives spécifiées FR:</p> $L_p \geq 15 \text{ m} \rightarrow \text{non conforme}$ $H_b \geq 2.0 \text{ m} \rightarrow \text{conforme}$ <p>(L_p = largeur de dégagement de l'ouverture du déversoir = 5.4 m, H_b = hauteur de dégagement de l'ouverture du déversoir = 3 m, H_t = longueur des troncs = 10 m)</p> <p>Selon les directives, la largeur des anciennes ouvertures de du déversoir étaient clairement trop petites. Le nouveau déversoir du barrage remplit toutes les conditions avec le déversement libre.</p>
<p>Mesures / Expérience</p>	<p>Reconstruction de l'EDC</p> <p>Le projet de reconstruction du déversoir du barrage en novembre 1978 reposait sur l'hypothèse d'un niveau maximum du débit de crue de 2200 m³/s et d'un niveau résultant dans le réservoir d'env. 492.00 msm. Ce nouveau niveau maximum de stockage a nécessité une modification du niveau du pont routier (à 490.00 m d'altitude). Afin de maintenir le niveau de crue souhaité, le dégagement de l'ouverture de la structure d'évacuation devait être élargi et surtout, construit de manière à ne pas être obstrué par des troncs d'arbres. Ces deux conditions ont conduit à la démolition du pont routier existant et de ses piliers jusqu'à la hauteur de</p>

la crête de déversement. Le nouveau pont traverse la Melezza sur 25.0 m en aval de l'ancien pont. La route sur la tête de pont de droite est à 492.80 msm. Le nouveau pont en béton précontraint traverse la vallée sans piliers intermédiaires, d'une longueur de 60.0 m. Les fondations des piliers sont encastrées dans les rochers. Le pont est ainsi relié à la route existante et doté de parois latérales empêchant tout déversement latéral en cas de crue maximale.

Photos



Figure 2: Obstruction de l'EDC du barrage due à la présence de bois flottant après les crues de 1978 (Source: Ofima)



Figure 3: Obstruction de l'EDC du barrage en raison de la présence de bois flottant et érosion partielle du noyau après les crues de 1978 (Source: Ofima)



Figure 4: Dépôt de bois flottant dans le réservoir après les crues de 1978
(Source: Ofima)



Figure 5: Nouvel EDC du barrage sans piliers et avec nouveau pont
(Source: Ofima)



Figure 6: Nouvel EDC du barrage en fonction (Source: Ofima)



4) Montsalvens

Montsalvens

Nom du Barrage	Montsalvens		
Nom de la rivière	la Jogne		
Exploitant	Groupe E SA		
Volume du Réservoir	9.257 Mio m ³		
Surface du Lac à pleine capacité d'approvisionnement	693'000 m ²		
Hydrologie	Bassin Versant		
Crue HQ ₁₀₀	267 m ³ /s	Surface	173 km ²
Crue Nominale HQ ₁₀₀₀	346 m ³ /s	Couverture Végétale	31%
Niveau à pleine capacité d'approvisionnement	800.80 amsl	Niveau de la crête du Barrage	802.30 amsl

(EDC du Barrage) (Type, structure d'entrée, régulé/non régulé, nombre de structures d'évacuation, structures d'évacuation de fond etc.)

Type	1) Structures d'évacuation de fond à vannes 2) Tunnel de contournement, régulé 3) 4 hausses fusibles Hydroplus
Dimensions	1) Structure d'évacuation (LxH) = 1.098 x 1.8 m 2) Structure d'évacuation (LxH) = 5.05 x 4.42 m 3) Structure d'évacuation (LxH) = 10.3 x 5.85 m
Capacité	1) 56.5 m ³ /s 2) 134 m ³ /s 3) 309 m ³ /s

Le barrage de Montsalvens est équipé de trois systèmes d'évacuation de crue.

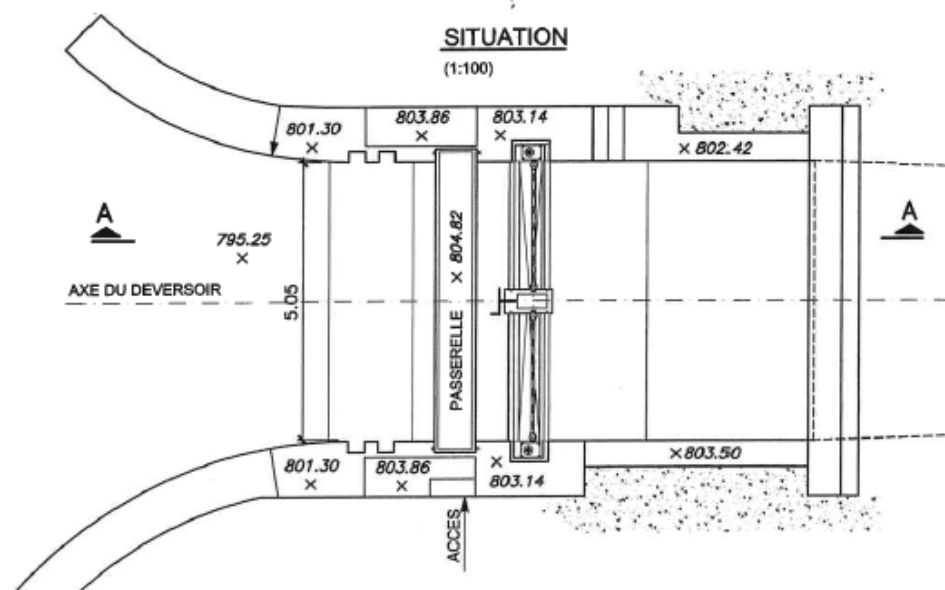


Figure 1: Vue d'ensemble du tunnel de contournement équipé de vannes coulissantes

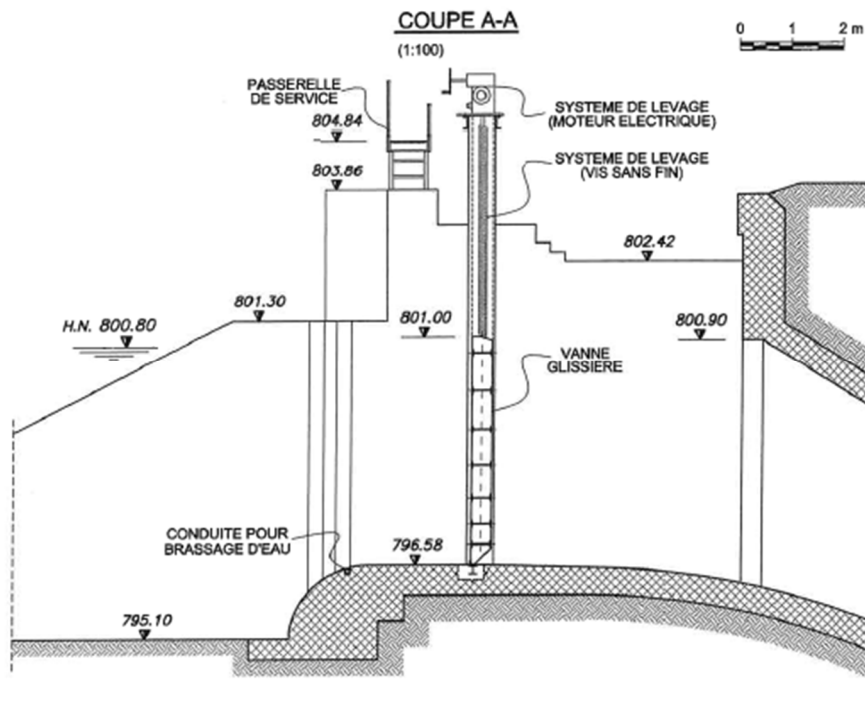


Figure 2: Coupe transversale d'un tunnel de contournement équipé de vannes coulissantes

Le tunnel de la structure d'évacuation de fond est équipé de deux vannes. Le tunnel de contournement est régulé par une vanne coulissante. Les 4 hausses fusibles basculent à diverses altitudes: 802.04, 802.13, 802.18 et 802.21 amsl.

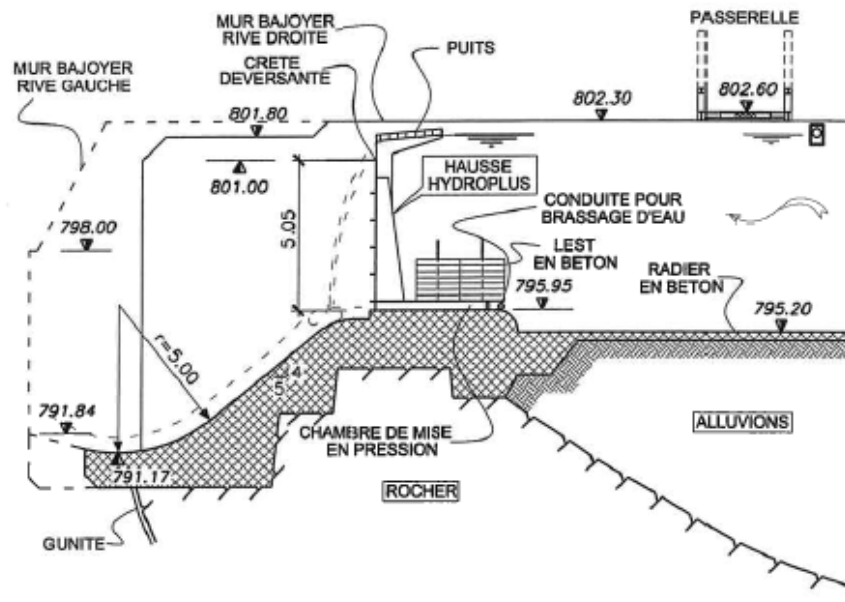


Figure 3: Coupe transversale du déversement équipé de hausses fusibles



Bois flottant (Le bois flottant passe-t-il à travers l'évacuateur du barrage ou est-il enlevé? Mesures existantes contre le bois flottant?)

Jusqu'en 2015, la vanne de déversement de la rive droite était protégée par une barrière flottante. En raison de l'orientation du barrage (ouest-est), il est très difficile de collecter et d'extraire le bois flottant à un seul endroit. Cela n'est possible qu'avec l'aide d'un bateau poussant et d'un camion-grue.

Crue de Mai 2015

Annualité	HQ = 137 m ³ /s (<HQ ₁₀)
Survenance de bois flottant	300 m ³
Description de l'évènement	La crue de mai 2015 s'est produite après une période de 7 ans sans grands débits (Q < 80 m ³ /s). La vanne de déversement a été ouverte. Le débit est passé d'un type de débit régulé à un débit libre, ce qui a entraîné une augmentation soudaine du débit de 20m ³ /s. Les ancres qui tenaient la bouée centrale se sont brisées. Une autre ancre s'est également cassée. Les éléments de la barrière flottante (TuffBoom) sont passés sous la vanne de surface. La chaîne a ensuite été coupée pour pouvoir fermer la vanne.
Problèmes à l'EDC du barrage	Une barrière flottante a été installée pour protéger le tunnel de contournement, et en particulier le passage de la vanne contre une obstruction et pour assurer sa fermeture. Avec la rupture de la barrière flottante, la situation en cas de crue n'est pas suffisamment garantie et une solution plus appropriée doit être trouvée.
Evaluation	<p>Directives spécifiées CH:</p> <p>$L_p > 0.80 * H_t = 20\text{m} \rightarrow$ non conforme $H_b > 0.20 * H_t = 5\text{ m} \rightarrow$ conforme</p> <p>Directives spécifiées FR:</p> <p>$L_p \geq 13.2\text{ m} \rightarrow$ non conforme $H_b \geq 2.0\text{ m} \rightarrow$ conforme</p> <p>(L_p = largeur de dégagement de l'ouverture du déversoir = 5.05 m, H_b = hauteur de dégagement de l'ouverture du déversoir = 5 m, H_t = longueur des troncs = 25 m)</p> <p>Selon les directives, les dimensions des ouvertures du déversoir sont trop petites et il fallait s'attendre à une obstruction. Cela a été confirmé par la crue de 2015.</p>
Mesures / Expérience	D'après les expériences faites, un HQ ₁₀ pourrait entraîner des complications pour le fonctionnement de la vanne de surface et des risques d'obstruction pour les tunnels de contournement. Une solution pour dévier ou retenir les longs troncs (25m) fait l'objet de recherches.

Photos



Figure 4: Situation avant la brèche de la barrière flottante de mai 2015



Figure 5: Volumes de bois flottant dans le réservoir de Montsalvens lors d'une crue



Figure 6: Situation actuelle en cas de crue; le grand risque d'obstruction reste inacceptable



5) Réservoir de Sylvenstein (Allemagne)

Le réservoir de Sylvenstein (barrage en enrochement, $H = 44$ m, volume du réservoir = 124 hm^3 , superficie du bassin versant = 1138 km^2 , altitude = 767 msm , bassin versant principalement boisé) a été construit dans les années 1950, principalement pour la protection contre les crues, et pour le réhaussement de bas niveaux d'eau. Entre 1994 et 2001, l'évacuateur du barrage existant a été adapté pour pouvoir gérer un plus grand volume de protection contre les crues et un deuxième évacuateur a été construit. Étant donné que le système d'évacuation de crue comprend des tunnels et que le potentiel de bois flottant dans le bassin versant est très élevé, il a fallu protéger les deux structures d'entrée de l'EDC du barrage contre le BF (Hartlieb 2014). À cette fin, des simulations sur modèle ont été effectuées (Hartlieb et al. 1996). Le déversoir du barrage existant a une section transversale de tunnel de $W = 5.1$ m et $H = 4.7$ m. La structure d'entrée a été protégée contre le BF au moyen de deux piliers de râteliers d'une largeur de dégagement de 4 m (**Figure 38a**). Les amas de bois et les troncs de grandes dimensions sont ainsi retenus de manière fiable. Les troncs individuels peuvent passer les râteliers et sont souvent alignés de manière uniforme par les piliers dans la direction du flux.

Le nouvel EDC du barrage a également été optimisé dans le modèle hydraulique de l'Université technique de Munich. Il comprend une structure entrée avec deux barrières à déversement de 12 m de large et un tunnel de 6.5 m de haut et de 5.0 m de large. En amont de l'entrée, il y a cinq piliers verticaux d'un diamètre de 1.0 m avec un espace de dégagement de 4.0 m entre les piliers (**Figure 38b**). Le râtelier est à son tour traversable pour des troncs individuels, grâce à quoi ils s'alignent avec le courant et peuvent passer en toute sécurité par la structure d'entrée. Les amas de bois dangereux sont retenus avec suffisamment de distance devant la barrière à déversement. En raison de la grande zone d'entrée et des faibles vitesses qui en résultent, une masse moins compacte d'obstruction est créée, de sorte que la capacité de décharge de l'évacuateur de crue du barrage n'est que légèrement réduite (Hartlieb 2014).

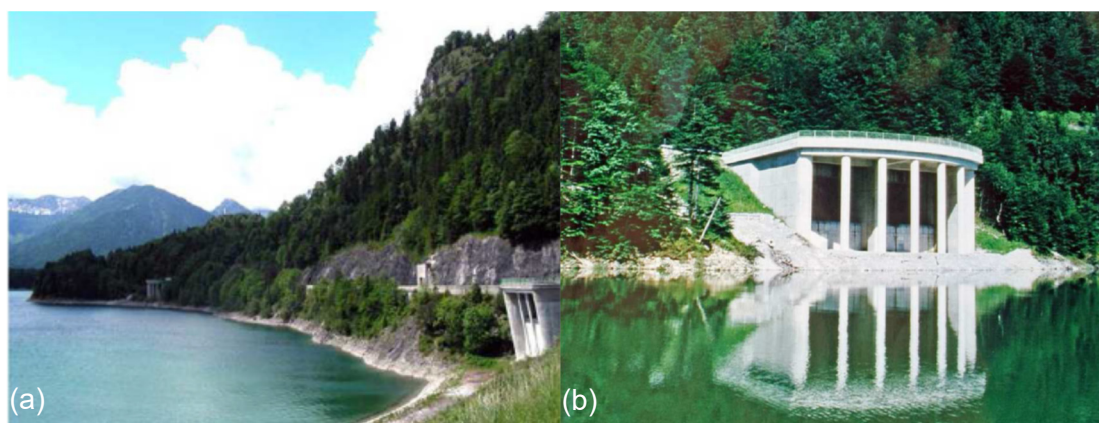


Figure 38: (a) Anciens et (b) nouveaux évacuateurs de crue du réservoir de Sylvenstein avec râtelier à bois en amont (Photos: Hartlieb 2014)

Lors de la crue d'août 2005, une très grande quantité de bois a été recensée dans le réservoir de Sylvenstein (**Figure 39a**). Cependant, les problèmes dus aux obstructions ne se sont pas produits. Plus récemment, des barrières à bois flottant ont été de plus en plus utilisées dans le courant en amont (**Figure 39b**).

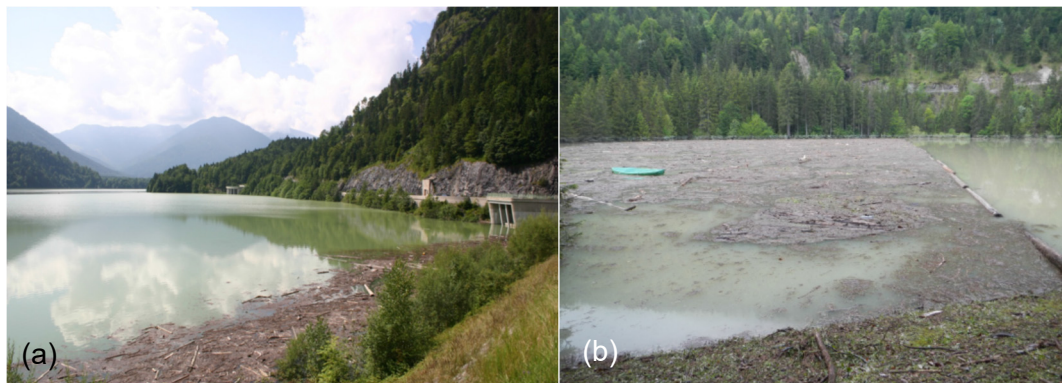


Figure 39: (a) Bois flottant pendant les crues d'août 2005 (photo: A. Hartlieb) et (b) Barrières à bois flottant pendant les crues de juin 2013 (photo: Office de l'Etat Bavarois pour l'Environnement)



6) Réservoirs sur la Rivière Kamp (Autriche)

Les trois barrages suivants sont situés le long de la rivière Kamp:

Ottenstein: Bassin versant = 889 km²

Barrage Voûte, $H = 69$ m

Volume du Réservoir = 73 hm³

EDC du Barrage: 2 clapets à déversement sur la crête du barrage, $B = 26$ m

BHQ = HQ₅₀₀₀ = 650 m³/s

Dobra: Bassin versant = 940 km²

Barrage poids-voûte

Volume du Réservoir = 20 hm³

Volume du Réservoir: déversement libre, $B = 65$ m

BHQ = HQ₅₀₀₀ = 680 m³/s

Thurnberg: Bassin versant = 1011 km²

Barrage en Remblai, $H = 15$ m

Volume du Réservoir = 0.8 hm³

EDC du Barrage: 3 ouvertures de déversoir avec vannes; $B = 8.6$ m, $H = 3.4$ m
incluant râteliers grossiers de retention de bois flottant

BHQ = HQ₅₀₀₀ = 720 m³/s

La crue d'août 2002 a entraîné des débits d'environ HQ₅₀₀ - HQ₁₀₀₀ (voire même plus dans certains cas) le long de la rivière Kamp. De plus, beaucoup de bois flottant a été entraîné. Les barrages d'Ottenstein et de Dobra n'ont eu aucun problème en raison des grandes dimensions de l'évacuateur de crue du barrage et de la conception à déversement libre (**Figure 40a**). Par contre, au barrage de Thurnberg, il y a eu une grande accumulation de bois flottant. Le râtelier grossier avait été installé 12 ans auparavant, devant les ouvertures de déversoir étroites de l'évacuateur, et a empêché leur obstruction (**Figure 40b**). Étant donné que la structure du déversoir a un barrage en remblai adjacent relativement long, une obstruction des ouvertures du déversoir aurait pu conduire à un débordement du barrage. Depuis, d'autres râteliers grossiers ont été installés sur deux autres barrages dotés d'ouvertures de déversoir étroites.

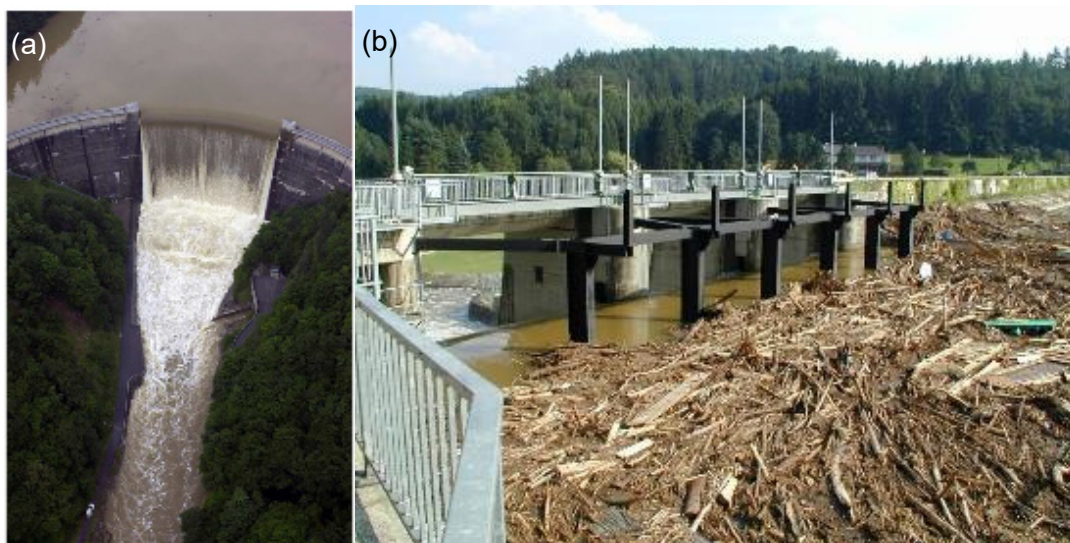


Figure 40: (a) Réservoir de Dobra avec déversement libre de l'évacuateur de crues et (b) bois flottant au râtelier de l'évacuateur de crue du réservoir de Thurnberg lors de la crue de 2002 (photos: Ministère Fédéral de l'Agriculture, des Forêts, de l'Environnement et de la Gestion des Eaux, Autriche).

7) Réservoir de Gstins (Autriche)

Le réservoir de Gstins est situé sur le fleuve Lutz dans le Voralberg, à une altitude d'environ 900 msm. Le bassin versant est de 184 km² et est principalement boisé. Le système d'évacuateur de crues se compose de deux ouvertures de déversoir, chacune avec des clapets d'une largeur de 10 m (**Figure 41a**). La crue d'août 2005 a créé un débit de 300 m³/s (<BHQ, >> HQ₁₀₀). En outre, env. 3'000 m³ de bois ont été transportés vers le réservoir. En conséquence, les deux ouvertures du déversoir ont été complètement obstruées (**Figure 41b**). Au cours de la crue, on a tenté de nettoyer l'ouverture gauche du déversoir au moyen de pinces à bois.

Afin d'éviter toute obstruction future au barrage, le déversoir est en cours de reconstruction. Le pilier entre les deux ouvertures du déversoir doit être enlevé, créant ainsi une ouverture de déversoir d'une largeur de 20 m. Les deux clapets resteront abaissées de manière permanente jusqu'à ce que la conception de l'EDC du barrage soit terminée.



Figure 41: Réservoir de Gstins: (a) EDC du barrage avec deux clapets (Photo: VAW) et (b) obstruction lors de la crue de 2005 (Photos: Vorarlberger Illwerke AG).