



HAL
open science

Embâcles: concilier gestion des risques et qualité des milieux. Guide de diagnostic et de recommandations

Margaux Quiniou, Guillaume Piton

► To cite this version:

Margaux Quiniou, Guillaume Piton. Embâcles: concilier gestion des risques et qualité des milieux. Guide de diagnostic et de recommandations. [Rapport de recherche] ISL Ingénierie; INRAE. 2022, pp.135. hal-03621373

HAL Id: hal-03621373

<https://hal.science/hal-03621373>

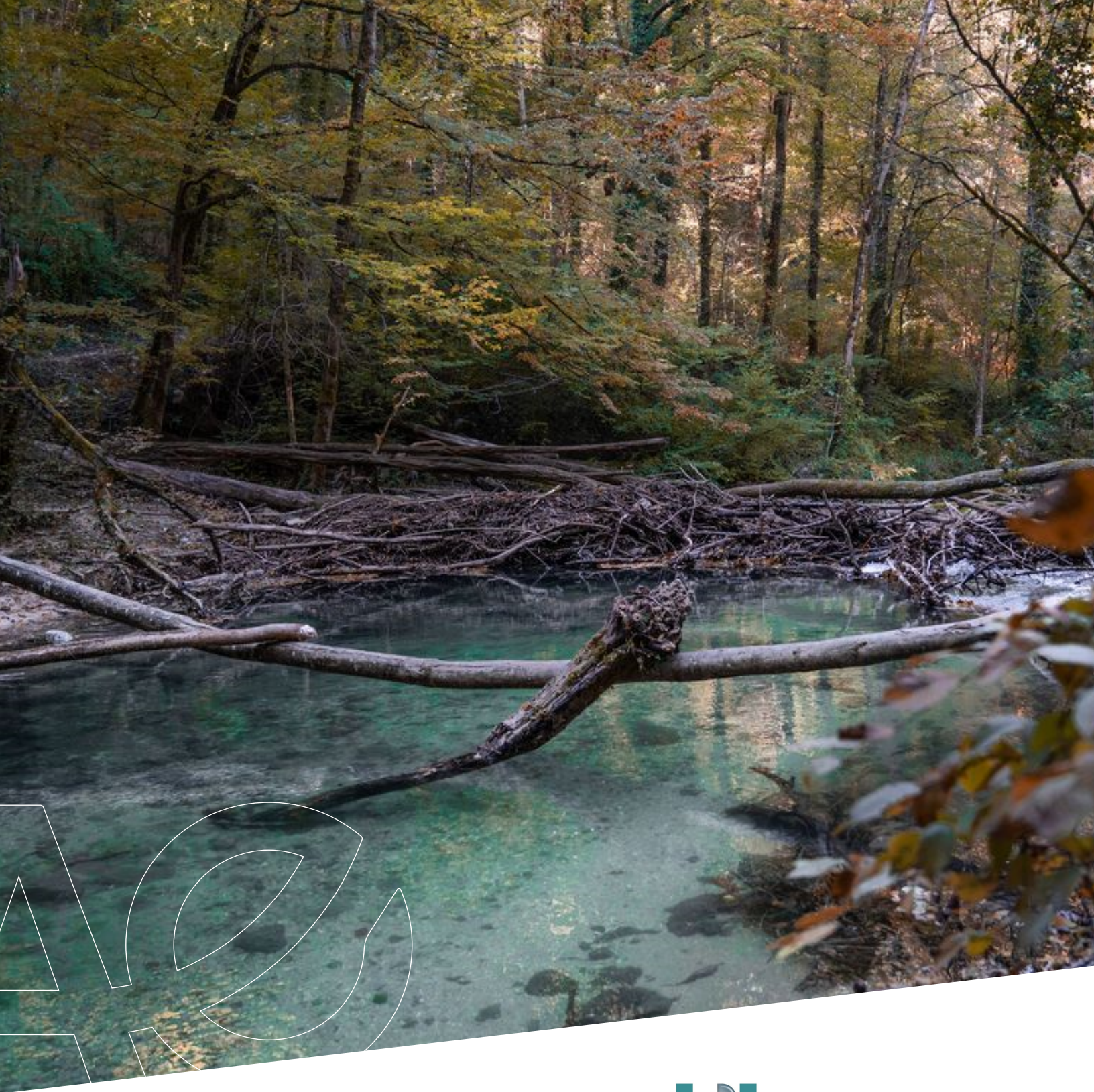
Submitted on 18 Sep 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License



Embâcles: concilier gestion des risques et qualité des milieux

Guide de diagnostic et de recommandations

Embâcles: concilier gestion des risques et qualité des milieux. Guide de diagnostic et de recommandations

Margaux QUINIOU¹ et Guillaume PITON²

¹ISL, 15 rue du Maréchal Harispe, 64500 Saint-Jean-de-Luz - FRANCE

²Univ. Grenoble Alpes, INRAE, UR ETNA, 2 rue de la Papeterie, 38 402 St-Martin-d'Hères - FRANCE

Septembre 2022 (Version 1.0)

Citation : Quiniou, M. et Piton, G. (Coord.). 2022. *Embâcles : concilier gestion des risques et qualité des milieux. Guide de diagnostic et de recommandations*. Rapport de synthèse. ISL, INRAE. Version 1 (Septembre 2022 - Version 1.0). 135 p. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03621373v1>

Financement : Ce travail, diffusé sous licence Creative Common (CC BY 4.0) est le fruit d'une collaboration :



Le travail mené par ISL a été financé par l'Agence de l'Eau Adour-Garonne dans le cadre de ses actions de développement sur la *Préservation des milieux aquatiques et de la biodiversité*.

Le travail réalisé par INRAE a été réalisé avec le soutien du Ministère de la Transition Écologique (Direction générale de la prévention des risques) dans le cadre des programmes MTE (DGPR/SRNH) – INRAE 2020 et 2021 (décisions de subvention n° 210897179 et 2103343215 (Action *TorRex*)).

Résumé

Durant les crues majeures, les cours d'eau transportent de l'eau, des sédiments mais aussi du bois. Ce phénomène est naturel et inévitable. La présence de bois flottants et d'embâcles en rivière a en réalité un effet positif sur la qualité environnementale des milieux aquatiques et terrestres. C'est aussi un facteur potentiel de risques. Il pose problème dès lors que des verrous hydrauliques (sections étroites, ponts, ouvrages hydrauliques) ne sont pas conçus pour être transparents au transport des flottants. Si ces derniers obstruent les ouvrages, ils déclenchent souvent des surcotes des niveaux d'inondation et/ou des affouillements des ouvrages. La gestion opérationnelle du problème des embâcles se résume encore souvent à un entretien de la ripisylve visant à supprimer toute présence de bois mort dans le lit des cours d'eau. La prise en compte du transport des flottants dans la conception des ouvrages est encore lacunaire. Les travaux scientifiques portant sur le sujet, parfois anciens, sont peu connus des praticiens. Pendant longtemps, ces travaux ont principalement porté sur l'aspect environnemental du bois flottant. La dernière décennie a vu la publication de nombreux travaux portant sur les risques. L'attente du côté opérationnel étant forte, il a semblé pertinent de mener une analyse de l'état des connaissances scientifiques et techniques et de transférer aux praticiens celles que nous avons jugé potentiellement utiles.

Le rapport a été organisé en chapitres traitant de façon plus ou moins approfondie les aspects principaux de la question du bois flottant en rivière :

- Le Chapitre 1 tente de répondre aux questions "*D'où vient le bois flottant pendant les crues ?*" et "*Quelle quantité de bois flottant pourrait être transportée par tel cours d'eau ?*". Il explique les processus sources et décrit les méthodes permettant de prédire la production de bois flottant (volume total et dimensions des pièces transportées) ;
- Le Chapitre 2 rappelle synthétiquement les effets bénéfiques de la présence de bois flottants sur les milieux naturels ;
- Le Chapitre 3 traite du transport et du dépôt du bois flottant. Il présente les méthodes utilisées pour étudier le phénomène de transfert et de dépôt des pièces de bois flottant. Il fournit aussi des éléments sur les interactions entre bois flottants et deux types d'infrastructures très touchées par les embâcles : les ponts et les seuils (évacuateur de crue de barrage, seuil en rivière, etc.).
- Le Chapitre 4 porte sur les mesures de protection contre les embâcles. Ces mesures sont de trois types : (i) certaines visent à favoriser les transferts du bois flottant vers l'aval ; (ii) certaines visent à piéger le bois flottant dans des ouvrages dédiés, et (iii) d'autres portent sur une gestion intégrée à l'échelle du bassin versant.

Ce guide compile des éléments tirés de travaux scientifiques et d'autres guides techniques auxquels il emprunte certains éléments, mais qu'il ne saurait remplacer. Les lecteurs ne trouvant pas l'ensemble des réponses aux questions qu'ils se posent sont invités à consulter ces guides, toujours très complets. On pense en particulier aux guides américains de DIEHL (1997) "*Potential drift accumulation at bridges*" et de BRADLEY et al. (2005) "*Debris control structures : Evaluation and countermeasures*", aux guides suisses de LANGE et BEZZOLA (2006) "*Schwemholz - Probleme und Lösungsansätze [Driftwood - Problems and solutions]*", du CSB (2017) "*Bois Flottant Aux Evacuateurs De Crues Des Barrages*", et de l'OFEV (2019) "*Bois flottant dans les cours d'eau*" qui apportent beaucoup d'éléments sur la production des flottants et les ouvrages, mais aussi aux documents portant plus sur le volet environnemental, aux guides australiens de BROOKS et al. (2006) "*Design guideline for the reintroduction of wood into Australian streams*" et de LOVETT et PRICE (2007) "*Principles for riparian lands management*", ou encore le guide autrichien de l'ÖWAV (2021) "*Holz in und an Fließgewässern – Wildholzmanagement*", ainsi qu'enfin l'excellent guide de WOHL et al. (2019) "*Managing for large wood and beaver dams in stream corridors*".

Ce rapport a bénéficié des relectures de contrôle de certaines parties ou dans son intégralité par (ordre alphabétique) : Céline BOSSCHAERT (BRL), Swann BENAKSAS (INRAE), Jacques BOUFFIER (DGPR-BRIL), Vincent CALLAND (BRL), Gwenaël CHEVALLET (BRL), Jonathan COUTAZ (Setec Hydratec), Jean-Loïc DOUARD (ISL), Angélique MASSON (Agence de l'Eau Adour - Garonne), Cédric PERRIN (ISL), Jérémy SAVATIER (ISL), Corentin THAREL (Setec Hydratec), Rabab YASSINE (Egis). Que l'ensemble de ces relecteurs soient vivement remerciés pour leur nombreuses suggestions et critiques constructives.

Table des matières

Notations	5
Introduction	7
1 Production du bois flottant	11
1.1 Sources du bois flottant	11
1.1.1 Processus sources	11
1.1.2 Bois flottant : bois mort ou arbres vivants?	13
1.1.3 Les données de l'IFN (Inventaire Forestier Français)	14
1.2 Quantification du bois flottant	15
1.2.1 Remarque préalable sur la précision des méthodes	15
1.2.2 Volume solide ou volume apparent? Porosité et coefficient de foisonnement	16
1.2.3 L'indispensable analyse des archives	17
1.2.4 Analyse préliminaire : Méthodes empiriques d'estimation du volume d'apport	17
1.2.5 Etude détaillée : Analyse cartographique des zones de production	22
1.3 Dimensions et densité des éléments de bois flottant	30
1.3.1 Corrélation entre diamètre et hauteur des arbres d'après les données IFN	30
1.3.2 Variabilité des longueurs et diamètres du bois flottant	31
1.3.3 Le taux de réduction : longueur des flottants/hauteur sur pied	31
1.3.4 Forme des flottants : avec ou sans branches et racines	33
1.3.5 Masse volumique des éléments de bois flottants	33
2 Effets environnementaux du bois flottant	35
2.1 Effets sur la morphodynamique	36
2.2 Effets sur l'écologie et la biologie	41
2.2.1 Effets sur la qualité des eaux	41
2.2.2 Effets sur les cycles des nutriments	42
2.2.3 Effets sur les communautés aquatiques	43
2.2.4 Effets sur les communautés terrestres	46
3 Transport et interaction bois flottant - ouvrages	49
3.1 Généralités sur le transport du bois flottant	49
3.1.1 Paramètres influençant le transport	49
3.1.2 Régimes de transport	51
3.1.3 Mobilité et trajectoire des flottants	52
3.2 Méthodes d'étude du transport du bois flottant	53
3.2.1 Observations sur le terrain	53
3.2.2 Modèles réduits	53
3.2.3 Modèles numériques du transport de bois flottant	54
3.3 Dépôts et blocages naturels	57
3.3.1 Conditions de dépôts naturels	57

3.3.2	Type d'accumulation : tapis de flottants ou accumulation multi-couches?	59
3.4	Interactions bois flottants et ponts	63
3.4.1	Types d'embâcles se formant sur les ponts	63
3.4.2	Probabilité de formation d'un embâcle au niveau d'un pont	64
3.4.3	Surcote de niveau en amont d'un pont (backwater effect)	70
3.4.4	Érosion, affouillement et contournements	71
3.4.5	Impacts et cas de charges associés aux flottants	72
3.5	Interactions bois flottant et barrages ou seuils	73
3.5.1	Typologie d'embâcle en fonction des types de seuils	75
3.5.2	Recommandations issues des guides CFBR (2013) et CSB (2017)	77
3.5.3	Surcotes liées aux embâcles sur les évacuateurs de crues	78
4	Mesures de protection contre les embâcles	81
4.1	Transfert du bois flottant en aval	82
4.2	Piégeage du bois flottant	84
4.2.1	Ouvrages en rivière	84
4.2.2	Ouvrages expérimentaux : piégeage diffus	111
4.2.3	Ouvrage en dérivation	112
4.3	Gestion à l'échelle du bassin versant	113
4.3.1	Entretien et restauration de la végétation rivulaire	113
4.3.2	Gestion intégrée du bois mort	113
4.3.3	Identification des tronçons maximisant les effets bénéfiques sur l'environnement	114
4.3.4	Analyse de Niveau 2 en utilisant des aides à la décision	117
	Remarques conclusives	125
	Bibliographie	126

Notations

α	Angle entre l'axe d'une grille ou de pieux et l'horizontal (Ouvrage vertical : $\alpha = 90^\circ$) [°]
ΔQ^*	Perte de débitance liée aux flottants [-]
\hat{k}	Coefficient de raideur au contact à l'impact flottant - structure rigide (N/m)
μ	Coefficient de seuil [-]
Φ	Porosité, indice des vides, d'une accumulation de flottant = $\frac{a}{a-1}$ [-]
Π	Force d'Archimède [N]
Π/F_D	Ratio entre Force d'Archimède (flottabilité) et force de traînée [-]
ψ	Indice des vides d'un ouvrage perméable, = $\frac{B_0}{B_0+B_s}$ pour le cas des râteliers et grilles [-]
ρ	Masse volume du fluide [kg/m ³]
ρ_{BF}	Masse volume du bois flottant [kg/m ³]
a	Coefficient de foisonnement ou Facteur de compacité = $\frac{1}{1-\Phi}$ [-]
B	Largeur du chenal [m]
B_0	Longueur de passe ou largeur d'ouverture d'un orifice ou seuil [m]
B_s	Largeur des barres d'une grille ou des pieux d'un râtelier [m]
B_{0b}	Largeur débitante d'un râtelier ou d'un seuil [m]
C	Coefficient de masse ajoutée pour le calcul des impacts de flottants (-)
C_D	Coefficient de traînée [-]
D ou D_{BF}	Diamètre des troncs [m]
d_m	diamètre moyen des sédiments [m]
E	Superficie du bassin versant [km ²]
F	Volume de transport sédimentaire [m ³]
F_D	Force de traînée [N]
f_T	Facteurs de réduction entre volume potentiel et volume de transfert réel [-]
$F_{i,max}$	Force d'impact maximale d'un flottant sur une structure rigide (m)
Fr	Nombre de Froude estimé avec la hauteur d'eau h : $Fr \approx \frac{Q}{\sqrt{g \cdot B^2 \cdot h^3}}$ [-]
Fr_0	Nombre de Froude estimé avec la hauteur d'eau naturelle h_0 : $Fr_0 \approx \frac{Q}{\sqrt{g \cdot B^2 \cdot h_0^3}}$ [-]
g	Accélération de la gravité [9.81 m/s ²]
H	Charge hydraulique $H = h + \frac{u^2}{2g}$ [m]
h	Hauteur d'eau [m]

h_0	Hauteur d'eau naturelle (sans influence d'un barrage ou des flottants) [m]
H_b	Hauteur de passe d'évacuateur de crue [m]
h_c	Hauteur d'écoulement critique [m]
h_{tot}	Hauteur totale des arbres [m]
L	Longueur du chenal principal [km]
L_w	Longueur boisée du chenal principal [km]
L_{BF}	Longueur des éléments de bois flottant [m]
m_{BF}	Masse du flottant (kg)
m_f	Masse du fluide déplacé par le flottant (kg)
N	Nombre de seuils ou de pertuis [-]
$P_{blockage}$	Probabilité de formation d'un embâcle [-]
P_{vol}	Volume de pluie totale de l'évènement [m ³]
Q	Débit liquide [m ³ /s]
Q_{max}	Débit de pointe de la crue [m ³ /s]
u	Vitesse relative de l'écoulement à proximité du bois flottant [m/s]
u_{BF}	Vitesse de déplacement du flottant (m/s)
V_l	Volume apparent d'une accumulation de bois flottant [m ³]
V_w	Volume de l'hydrogramme de crue [m ³]
V_{BF}	Volume solide de bois flottant [m ³]
W	Superficie boisée du bassin versant [km ²]

Introduction

Les cours d'eau présentent naturellement une diversité extraordinaire de faciès et de géomorphologie. Quand il faut expliquer à des étudiants, ou au grand public, ce qui pilote la morphologie d'un cours d'eau, il est souvent mentionné en premier lieu qu'il s'agit d'une sorte d'équilibre entre les apports sédimentaires (quantité et granulométrie), l'hydrologie et la pente (concept de la balance de Lane). Il est ainsi généralement considéré que les cours d'eau convergent naturellement vers une morphologie permettant le transfert des flux sédimentaires issus du bassin versant amont. Un acteur primordial qui influence la géomorphologie des cours d'eau au premier plan reste absent de cette présentation synthétique : la végétation, en particulier les plantes vasculaires (ou ligneuses, comprenant notamment les plantes à fleurs y compris les feuillus, les conifères et les fougères).

L'effet de premier plan de la végétation sur la géomorphologie des cours d'eau a notamment été démontré par GIBLING et DAVIES (2012). Ces derniers ont analysé les faciès des rivières du passé dans des dépôts de roches sédimentaires très anciens (centaines de millions d'années). Ils montrent qu'avant l'émergence des plantes vasculaires, il y a 500 millions d'années, *toutes les rivières présentaient des morphologies en tresses*. Il est difficile de s'imaginer à quoi devait ressembler à cette époque nos rivières désormais souvent bordées de ripisylves denses. Les paysages de l'Islande sont dépourvus de forêts et peuvent peut-être en donner une idée : les faciès de tressage y sont en effet prédominants. A des latitudes similaires à ces dernières, les rivières s'écoulant en Europe ou en Amérique sont généralement bordées de boisements et présentent en effet des morphologies singulièrement plus variées (Fig. 2).

La végétation influence ainsi la morphologie des cours d'eau par sa capacité à limiter les érosions :

- La végétation a une influence à large échelle qui limite les érosions à la source : la diminution de la torrencialité des nombreux bassins versants reboisés spontanément suite à la déprise rurale ou artificiellement par la politique de Restauration des Terrains de Montagne (RTM), lancée en 1860 et qui en est une preuve indiscutable (LIEBAULT et al., 2013). Les apports sédimentaires des bassins versants sont ainsi très largement réduits par la présence du couvert végétal, en particulier par la présence du couvert forestier dans les zones raides au potentiel de production sédimentaire intense (PETEUIL et LIÉBAULT, 2011 ; MOREL et al., 2022). La production de biomasse et d'argile par décomposition de la matière organique enrichit par ailleurs les sols localement à la source, mais aussi en aval dans les secteurs où les argiles transportés en suspension se déposent et contribuent à former des vallées alluviales fertiles (GIBLING et DAVIES, 2012).
- La végétation a par ailleurs une influence localisée le long des corridors fluviaux en stabilisant les berges. On trouve encore des faciès de lits en tresse en France métropolitaine seulement dans des bassins versants où les apports sédimentaires restent très significatifs et génèrent une forte dynamique géomorphologique. Le transfert de ces flux solides dans les chenaux agit comme un perturbateur de leur morphologie et dynamise les processus d'érosion et de dépôt. Les morphologies en tresses ne perdurent que parce qu'elles sont plus mobiles et puissantes dans leur potentiel d'érosion que ne l'est la végétation dans son potentiel de colonisation des milieux et de fixation des sols. Cet équilibre est d'ailleurs lui aussi dynamique et les rivières en tresses vivent au rythme de cycles de contraction de leur bande active (pendant les périodes hydrologiquement calmes), entrecoupées d'expansion des bandes actives à l'occasion des crues morphogènes (AERMC, 2019). Les faciès de lits divaguant et de lit à méandres ont émergé où la végétation est légèrement ou significativement plus puissante que les flux d'eau et de sédiments dans son pouvoir de colonisation et de lutte contre l'érosion. Les rivières y maintiennent un lit mineur plus restreint.

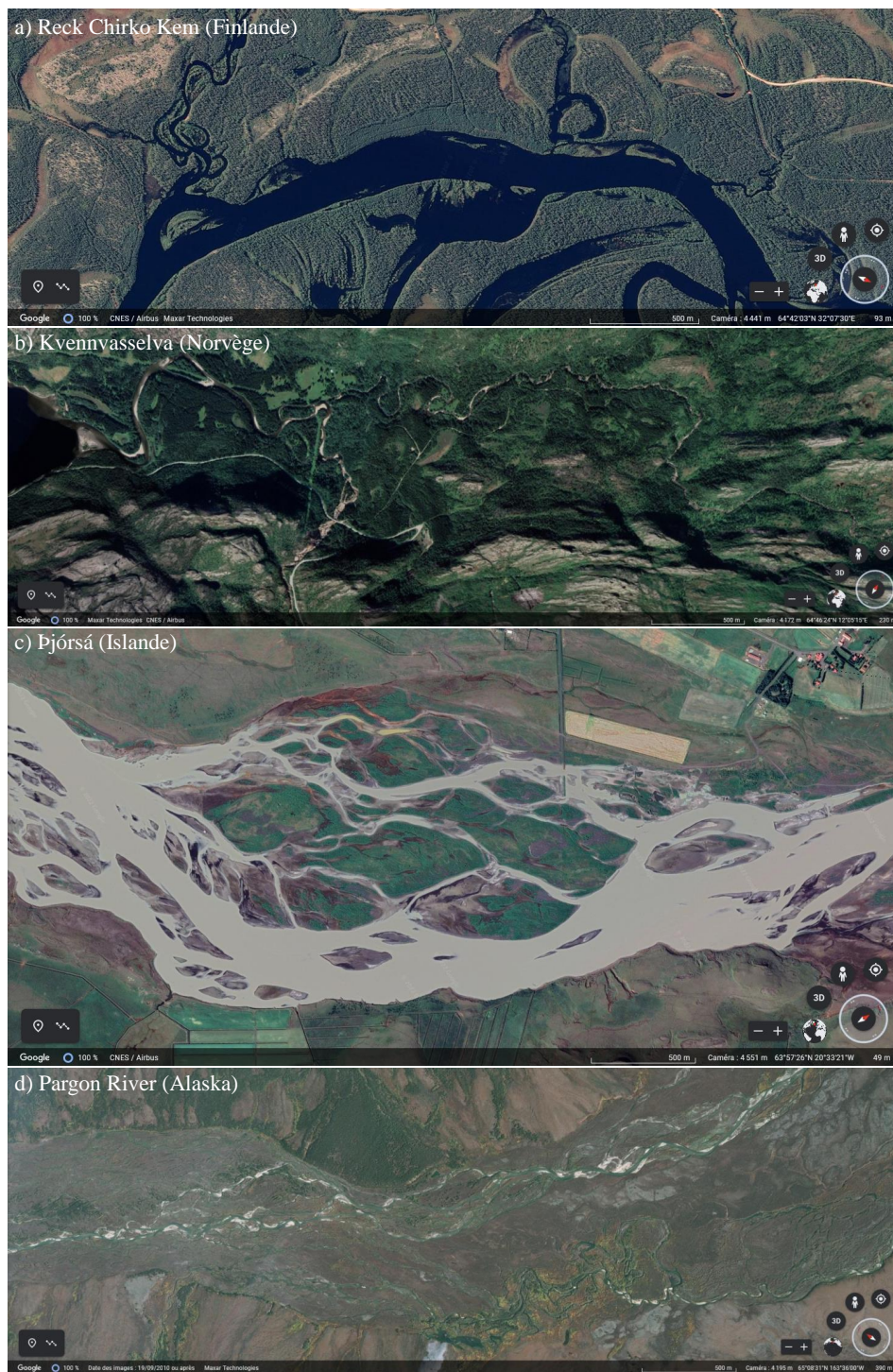


FIGURE 2: Sélection arbitraire d'exemples d'un effet de la présence de boisements sur la géomorphologie de rivières soumises à des climats froids ($63^{\circ}5$ et 65° de degré Nord). Vues aériennes tirées de Google Earth. a) Reck Chirko Kem (Finlande), rivière anastomosée (chenaux multiples séparés d'îles boisées); b) Kvennvasselva (Norvège), rivière à méandres bordée d'une ripisylve dense; c) Þjórsá (Islande), rivière en tresse très faiblement contrainte par l'absence de boisements de berges sur l'ensemble de l'île et d) Pargon River (Alaska), rivière divaguante dans une vallée alluviale boisée présentant de nombreuses annexes hydrauliques et paléo-chenaux.

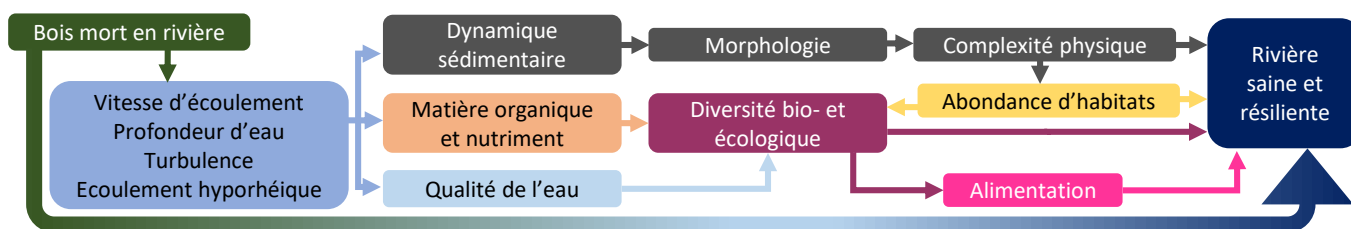


FIGURE 3: Influences bio-physiques du bois mort sur les cours d'eau (traduit de RUIZ-VILLANUEVA, 2020)

La beauté des paysages de rivières, et donc leur morphologie, est ainsi influencée au premier plan par la présence et l'état des ripisylves. Les rivières sont intimement couplées à leur corridor boisé par des processus hydrogéologiques, hydrauliques, morphogènes, de colonisation et, de temps en temps, du bois tombé dans la rivière.

La présence de bois mort ou flottant dans un cours d'eau interpelle, perturbe et est très généralement perçue comme anormale par le grand public, ainsi que par de nombreux acteurs de la gestion des cours d'eau (LE LAY et al., 2008; LE LAY et al., 2013; RUIZ-VILLANUEVA et al., 2018; ARSÉNIO et al., 2020). Le public français a été déshabitué de la présence de bois mort dans les rivières comme dans les forêts. Le bois a longtemps été un matériau utile à nos sociétés rurales pour le chauffage, l'industrie et la construction. Le bois mort était ainsi ramassé et extrait des rivières et des forêts (COMITI, 2012). La France a d'ailleurs subi un déboisement chronique jusqu'à un inversement finalement assez récent associé à la déprise rurale et, dans certains secteurs, aux opérations de reboisement de la politique RTM (MARSH, 1864; FESQUET, 1997). Le bois mort était ainsi virtuellement absent des corridors fluviaux jusqu'à une époque récente. La présence de bois flottant et d'embâcle est par ailleurs relevée fréquemment par les riverains et par les médias lors des crues, et ceci de façon plus régulière depuis que les sociétés rurales et paysannes ont muté pour devenir les sociétés actuelles (LAY et RIVIÈRE-HONEGGER, 2009). Dans notre imaginaire commun, le bois flottant ou mort est ainsi souvent jugé inesthétique et les paysages où il est présent sont dépréciés, quel que soit leur intérêt écologique intrinsèque (LE LAY et al., 2008; ARSÉNIO et al., 2020).

Aux yeux des naturalistes ayant voyagé et étudié des forêts primaires et des rivières sauvages, les forêts d'Europe et de France en particulier sont un "grand jardin", très différentes des zones de "wilderness" existant ailleurs (MARSH, 1864; HALL, 2005). Ce qui frappe à la simple vision de photos de milieux sauvages ou primaires, c'est notamment l'immense quantité de bois mort présente dans les sous-bois et dans le lit des rivières. C'est l'intérêt écologique du bois flottant qui a d'abord attiré l'attention des scientifiques, surtout en Amérique du Nord. Les travaux se sont ensuite attachés à vérifier ces résultats dans d'autres contextes et sous d'autres climats, ainsi que vis à vis de l'ensemble des processus naturels biophysiques qui ont lieu dans les cours d'eau et leurs corridors boisés et des communautés écologiques qui les peuplent (Fig. 3). **Les résultats scientifiques sont très matures et le diagnostic fait consensus : le bois mort et le bois flottant sont des composants très bénéfiques au bon état des cours d'eau. Les retirer est donc une altération majeure.** Les modes de gestion des cours d'eau évoluent vers des approches plus intégrées et conscientes du mode de fonctionnement de ces systèmes naturels. La gestion du bois mort doit ainsi être revue dans de nombreux bassins versants. Sa perception doit changer pour passer d'un "corps étranger" et dangereux à celle d'un agent naturel, très disponible et bénéfique à la restauration environnementale.

Il ne fait pas de doute que le bois flottant peut poser de réels problèmes et aggraver les aléas quand il obstrue des ouvrages et détourne les écoulements vers des zones à enjeux. Ceci impose des mesures. Les travaux scientifiques montrent par contre que les modes de gestions actuels (retrait systématique du bois mort et des arbres instables) n'ont que peu d'efficacité dans la lutte contre ces aggravations. Ceci pour la simple raison que lors des crues majeures, c'est une majorité d'arbres sains et stables qui sont mobilisés par l'activité géomorphologique des cours d'eau. La présence de bois flottant lors de crues majeures est donc inévitable : **Il faut apprendre à vivre avec.**

Ce guide vise à fournir un aperçu de l'état des connaissances sur la question des sources, du transport et du dépôt du bois flottant. Il tente de fournir autant d'éléments que possible sur la compréhension et la connaissance disponible vis-à-vis des interactions entre bois flottant et ouvrages (ponts et barrages). Nous espérons qu'il aidera à concevoir des ouvrages plus transparents et résilients, à mener des analyses plus fines de ces processus naturels et inéluctables, et à expliquer plus précisément les changements de pratiques aux élus et riverains dont les inquiétudes et les demandes d'explications sont légitimes.

Chapitre 1

Production du bois flottant

Margaux QUINIOU¹, Guillaume PITON²

¹ ISL Ingénierie, 15 rue du Maréchal Harispe, 64500 Saint-Jean-de-Luz - FRANCE.

² Univ. Grenoble Alpes, INRAE, UR ETNA, 2 rue de la Papéterie, 38402 St-Martin-d'Hères - FRANCE.

1.1 Sources du bois flottant

1.1.1 Processus sources

Les sources de bois flottant sont diverses et variées (Figure 1.1), et parfois compliquées à identifier. Les bois flottants peuvent être issus de bois mort accumulé dans le lit de la rivière ou dans son lit majeur, d'arbres sur pied arrachés des berges par la crue, ou encore de bois issu d'activités anthropiques (grumes stockées en lit majeur, dépôt de bois, scierie). Chaque bassin versant est spécifique mais les travaux scientifiques de ré-analyses d'évènements extrêmes passés montrent trois processus clés (PITON et RECKING, 2016; COMITI et al., 2016; OFEV, 2019) :

- Les glissements de terrains, plus particulièrement dans les bassins versants de montagne ;
- Les apports des versants par des processus intermédiaires (laves torrentielles, avalanches) ;
- Les érosion des berges, en particulier sur les anciennes terrasses alluviales recolonisées par la végétation.

La production de bois flottant est fortement dépendante de la zone. Ainsi, dans les bassins versants montagneux, la production de bois flottant provient essentiellement des glissements de terrain (COMITI et al., 2016), alors que dans les rivières de plaines, plus larges, elle découle plutôt de l'érosion des berges (COMITI et al., 2012). Le recrutement de bois flottants lors d'une inondation dépend aussi des inondations passées, et dépend donc de l'historique hydrologique, et plus particulièrement du temps écoulé depuis le dernier événement majeur.

Le recrutement de bois flottant fait référence aux processus hydro-morphodynamiques et gravitationnels qui délivrent activement du bois dans les rivières et torrents (GASSER et al., 2019). Ce recrutement implique des processus complexes à différentes échelles spatiales et temporelles. Il est régulé par de nombreux facteurs, comme la géologie et les dimensions d'un bassin versant, la géométrie du chenal, ou le volume de précipitations. Un phénomène sera donc considéré pertinent s'il permet de délivrer du bois dans un chenal ou un bassin ayant la capacité de transporter le bois en aval.

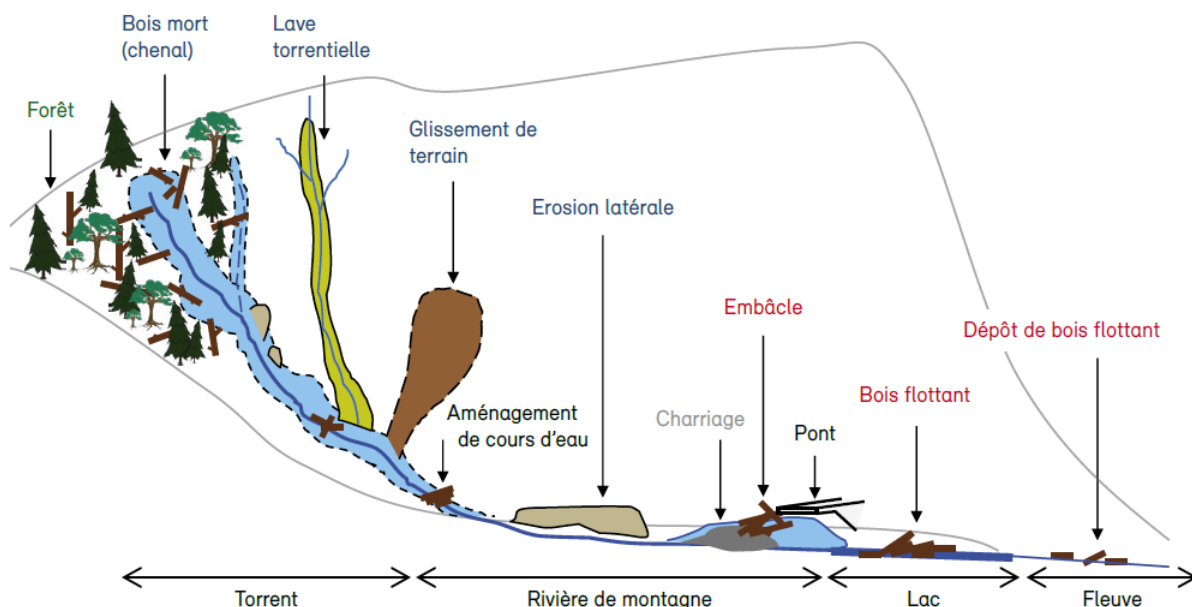


FIGURE 1.1: Représentation schématique des processus d'apport et de dépôt de bois flottant (tiré de OFEN, 2019)

GASSER et al. (2019) et RUIZ-VILLANUEVA et al. (2019) enrichissent la liste des sources potentielles :

- Érosion des berges : combinaison des matériaux emportés par l'écoulement de la rivière et de l'effondrement des parties des berges en contact direct avec l'écoulement. L'érosion hydraulique des berges correspond au processus de recrutement et de transport des sédiments et du bois des berges par les forces hydrodynamiques de l'écoulement. Ces dernières varient avec la rugosité du terrain, la vitesse d'écoulement et l'orientation du flux. Lorsque les contraintes de cisaillement atteignent une valeur critique, des éléments se détachent, l'affouillement des systèmes racinaires est suivi du déracinement des arbres et de leur chute éventuelle dans la rivière. Cette valeur critique de contrainte de cisaillement est définie par l'érodibilité, qui dépend des propriétés du sol et de la rivière ;
- Érosion géotechnique des berges : chute d'une partie des berges sous l'effet de la gravité impliquant des processus géomécaniques plutôt que hydrauliques ;
- Arbres tombant à cause des fortes pentes du bassin versant : si le bassin versant présente des pentes importantes, des pierres, de la végétation ou des arbres peuvent être arrachés sous l'action de la gravité. Ce phénomène a lieu lorsque ces forces excèdent les forces de résistance et est généralement déclenché par d'importantes précipitations, fontes de neige/glace, sol avec couches possédant différentes propriétés géotechniques, glaces saisonnières, tremblements de terre... Les propriétés géotechniques du sol, et la morphologie de la zone constituent les principaux facteurs contribuant à l'apparition de ce phénomène ;
- Impact du vent : quelques arbres peuvent fournir du bois flottant suite à un épisode météorologique extrême comme une tempête, même si ce phénomène ne produit que peu de bois directement disponible pour la rivière en pratique. De même que précédemment, cela dépend beaucoup de la zone. Les arbres dans des zones subissant de fortes précipitations sont plus susceptibles de présenter des dommages dus au vent, de même que dans des vallées encaissées, dont la configuration augmente l'effet Venturi (LE LAY et al., 2013) ;
- Laves torrentielles : les laves torrentielles, écoulements monophasiques de blocs, de sédiments, de boue et de débris ligneux, sont observées dans des chenaux de pente supérieure à 6% (LIEBAULT et al., 2013). Les laves torrentielles de forte magnitude recrutent souvent de nombreux arbres le long des torrents. Le transport de blocs de grandes dimensions a souvent tendance à broyer les branches et troncs de taille intermédiaire mais quelques éléments de grande taille, ou des éléments recrutés pendant la phase terminale de transport, peuvent être ensuite transférés dans les rivières torrentielles en aval ;

- Les avalanches peuvent déraciner et recruter une quantité importante de bois, mais constituent des événements relativement rares. En pratique, touchant souvent des chenaux de faible largeur, les arbres déracinés par des avalanches sont généralement évacués du chenal ou décomposés avant de pouvoir être transportés par la rivière, ce qui diminue l'importance de cet événement concernant un potentiel apport de bois flottant ;
- Les processus biologiques : mortalité des arbres due à leur âge, aux insectes, aux maladies, à l'activité des castors (LE LAY et al., 2013), ou encore au changement climatique. Les sécheresses à répétition fragilisant les arbres, des techniciens de rivière ont rapporté n'avoir jamais été autant sollicités que cette année pour intervenir sur des arbres morts ou tombés dans les cours d'eau ;
- LANGE et BEZZOLA (2006) citent des exemples de problèmes d'embâcles associés principalement à des troncs préalablement coupés par des bûcherons et stockés à proximité de cours d'eau. Dépourvus de branches et de racines freinant leur transport, ces éléments sont potentiellement très mobiles.

A ce bois flottant peuvent se mélanger de nombreux autres débris, à la fois végétaux tels que de la Canne de Provence (*Arundo Donax*), mais aussi des morceaux de plastique, ou des déchets en tout genre. Cela forme donc une importante quantité de débris flottants dans les rivières, qui présente des conséquences diverses et variées.

D'après l'étude réalisée par RICKLI et al. (2018) après les inondations extrêmes d'août 2005 en Suisse, 70 % des bois flottants trouvés dans le chenal après une crue ne provenaient pas directement des berges adjacentes, mais avaient été transportés depuis l'amont où ils avaient été fournis au chenal par divers procédés : glissements de terrain, érosion des berges, vieux barrages de correction torrentielle détruits, et vent ou chute de neige. Une étude des sources du bois flottant retrouvé dans les cours d'eau sableux du bassin de la Yazoo (North Mississippi, USA) présente les ordres de grandeur suivants : 37 % des bois flottants proviennent de l'érosion des berges, 36 % de la déstabilisation des berges, 12 % de l'impact du vent, 7 % résultant de paleodébris, 5 % du bois amené par la rivière, et 4 % de l'activité des castors (WALLERSTEIN et THORNE, 2004; LAGASSE et al., 2010). Ces résultats ne sont pas à considérer comme généraux, puisqu'ils ne s'appliquent qu'à des sites et événements particuliers, mais ils présentent l'intérêt de donner des ordres de grandeurs sur des cas bien documentés. Ils permettent aussi de mettre en évidence le fait que **les bois flottants sont essentiellement constitués de bois frais, et non de bois mort.**

1.1.2 Bois flottant : bois mort ou arbres vivants ?

Contrairement à une croyance commune très répandue, *la majorité du bois flottant retrouvé dans les accumulations et embâcles après les crues majeures est du bois frais* (COMITI et al., 2016). Les chiffres varient évidemment entre les sites et les événements mais la tendance est indéniable. STEEB et al. (2017) indiquent par exemple que seulement $\approx 12\%$ des embâcles étaient issus de bois mort lors des crues de 2005 en Suisse.

Ces résultats ont été confirmés dans une étude récente menée sur le bassin versant de la Brague à Antibes (Alpes-Maritimes). Les cours d'eau étaient entretenus depuis plus de 20 ans. Ces plans de gestions et l'interview des gestionnaires permettent de raisonnablement faire l'hypothèse que la quantité de bois mort initialement présente dans les chenaux était négligeable. Lors des crues d'Octobre 2015, deux tronçons de 5-6 km de long ont pourtant produit un total de l'ordre de 8600 m³ d'embâcles par érosion de berges. Environ 3000 arbres manquants ont été digitalisés sur les photos aériennes prises avant la crue (Brague : 1330 arbres arrachés sur 4.7 km soit ≈ 280 arbres/km ; Bouillide : 448 arbres arrachés sur 1.5 km soit ≈ 300 arbres/km ; Valmasque : 1235 arbres arrachés sur 4.8 km soit ≈ 260 arbres/km).

Les opérations d'entretien de la végétation visent en règle générale à billonner et éventuellement à retirer le bois mort dans et à proximité du lit mineur. COMITI et al. (2016) rappellent que la production significative de bois flottant est en général associée à des crues relativement intenses (période de retour dépassant 50-100 ans). Lors de ces épisodes, les déstabilisations de versants et les érosions de berges sont nombreuses. C'est l'ensemble des boisements des zones concernées qui peuvent alors contribuer à la production de bois flottant. Ces volumes sont en règle général un à plusieurs ordres de grandeur supérieur aux volumes de bois morts naturellement présents dans le lit des cours d'eau Européens (COMITI, 2012). Des données forestières ont donc été mobilisées dans le cadre de la préparation de ce guide afin d'apporter des éléments quantitatifs aux volumes sur pied des peuplements forestiers à même de constituer des sources de bois flottant.

1.1.3 Les données de l'IFN (Inventaire Forestier Français)

De très nombreuses données sur les arbres et les peuplements forestiers de France métropolitaine sont disponibles dans l'Inventaire Forestier Français (IFN). Un portail SIG est disponible en ligne et les données brutes peuvent être téléchargées librement. Les données sont disponibles sous licence ouverte Open Licence Etalab Version 2.0 et peuvent être utilisées sous réserve d'en mentionner la source¹.

Les relevés de l'IFN sont menés à l'échelle de placettes, points sélectionnés aléatoirement. La localisation de ces placettes est confidentielle et les coordonnées fournies dans la base de données sont précisées à ± 400 m. De nombreux paramètres sont relevés à l'échelle de la placette (pédologie, exposition, végétation). Les paramètres suivants intéressent en particulier notre analyse : position topographique (versant, vallon, combe, etc.), appartenance à une sylvo-écorégion d'alluvions récentes² (correspondant aux fonds des vallées alluviales de largeur supérieure à 200 m) et hydrographie à proximité (cours d'eau et zone humide à une distance < 50 m de la placette, champs relevés seulement depuis 2013). En complément, des données sont disponibles à l'échelle individuelle pour les arbres sur pied vivants (hauteur, circonférence, espèce, nombre d'individus similaires par hectare) et les arbres morts sur pied (circonférence, volume, espèce, nombre d'éléments similaires par hectare).

Les données de l'IFN sur la période 2005-2018 ont été analysées à l'occasion de la rédaction de ce rapport. Des analyses ont été réalisées à l'échelle de la placette (que l'on considère représentative du peuplement local) afin de proposer des ordres de grandeurs des densités de bois sur pied (mort et vivant, exprimées en m^3/ha), de nombre d'arbres par hectare, ou encore de quantité de bois mort sur pied. D'autres analyses ont été menées à l'échelle des arbres pour disposer de lois empiriques entre taille des arbres et diamètres des troncs. Les statistiques de plus de 72 000 placettes situées sur l'ensemble du territoire métropolitain ont ainsi été analysées, dont 2 680 placettes que nous avons considéré comme correspondant à des forêts alluviales car comprenant au moins une unité hydrographique³ à moins de 50 m. Seulement 25% des 2 680 placettes sont situées à proximité d'unités hydrographiques de taille moyenne ou grande (classes 2, 3, 5 et 6) et sont probablement plus représentatives de ripisylves. Ce chiffre correspond à 3.5% de l'ensemble des placettes relevées sur la période, les ripisylves étant peu représentées dans l'IFN et ainsi assez mal connues. Afin de constituer un échantillon de taille suffisante, certaines analyses ont été menées sur l'ensemble du jeu de données et d'autres seulement sur les 2 680 placettes proches d'une unité hydrographique (comprenant 25% proches de lacs, d'étangs ou de rivières et 75% plutôt proches de ruisseaux ou de mares).

En synthèse, les échelles spatiales et temporelles du recrutement de bois dans le chenal et du transport en aval dépendent de nombreuses variables, comme la stabilité des versants, la géomorphologie du corridor fluvial, l'occurrence de crues majeures et les caractéristiques et la quantité de bois initialement présente dans la rivière et sur les berges (STEEB et al., 2017; RUIZ-VILLANUEVA et al., 2019).

La variabilité locale ou régionale de ces variables et l'implication de nombreux processus en cascade rend le phénomène de production de bois flottant assez aléatoire. Il est donc difficile de déterminer l'origine exacte des bois flottants retrouvés dans les rivières, et encore plus de le prédire. Il apparaît en revanche clairement que le bois flottant est constitué majoritairement de bois vert ('fresh wood'), et non de bois mort initialement présent dans la rivière.

L'étude de la production de bois flottant nécessite donc de caractériser les volumes présents dans le chenal mais aussi, et surtout, les peuplements forestiers des berges et des autres zones de production (glissements de terrains, affluents torrentiels).

1. Mention obligatoire de la source : "IGN – Inventaire forestier national français, Données brutes, Campagnes annuelles 2005 et suivantes, <https://inventaire-forestier.ign.fr/spip.php?rubrique159>, site consulté le 16/09/2020"

2. Visualisable ici : <https://www.geoportail.gouv.fr/donnees/sylvoecoregions-dalluvions-recentes>

3. Champs relevés depuis 2013 seulement, il est classé selon 6 catégories : 1 Source, mare, mardelle (zone mouilleuse ou petite étendue d'eau ≤ 20 acres); 2 Etang, lac (surface d'eau > 20 acres); 3 Marais, tourbière, marécage (zone humide permanente de surface > 20 acres); 4 Ruisseau, ru (linéaire de largeur < 1 m, parfois temporairement à sec); 5 Rivière (linéaire de largeur ≥ 1 m et < 10 m); 6 Fleuve (linéaire de largeur ≥ 10 m) auxquelles nous avons ajouté deux autres classes : 0 Pas d'hydrographie (placettes 2013-2018 pour lesquelles l'absence d'hydrographie a été relevée) et 99 Hydrographie inconnue (placettes 2005-2012 pour lesquelles l'information n'était pas relevée).

1.2 Quantification du bois flottant

1.2.1 Remarque préalable sur la précision des méthodes

De manière générale, les travaux scientifiques portant sur la question s'accordent à dire que la production de bois flottant dans les bassins versants a une forte composante aléatoire. L'étude approfondie des inondations d'Août 2005 en Suisse et d'Octobre 2011 dans le Nord de l'Italie ont par exemple permis de mettre en évidence que dans les régions montagneuses, les proportions relatives de bois flottants recrutés depuis le fond de la vallée (par processus fluviaux) et des bassins versants à fortes pentes (par processus gravitaires tels que les glissements de terrains) sont assez variables et peu prédictibles (COMITI et al., 2016). De très nombreux processus aléatoires jouent un rôle dans la production et le transfert du bois flottant (occurrence de glissements de terrain, degré de connectivité entre le glissement et le lit de la rivière, localisation des érosions de berges, taux de transfert des flottants recrutés, etc.). Il est donc illusoire de chercher à prédire de façon précise les volumes de flottants produits et transférés jusqu'aux zones à enjeux.

Des méthodes existent toutefois permettant d'identifier les ordres de grandeurs du potentiel de production d'un bassin versant. Trois grands types de méthodes existent (Figure 1.2) : (i) l'analyse des données historiques, (ii) les méthodes empiriques simples et (iii) les analyses cartographiques du potentiel de production. La complexité des méthodes utilisées doit être adaptée au stade d'étude. A un stade d'étude préliminaire (étude hydraulique, faisabilité), l'utilisation des méthodes empiriques sera en général suffisante. Si les problèmes associés aux embâcles sont préalablement identifiés comme prépondérants, il peut toutefois être justifié de mettre en oeuvre immédiatement des analyses détaillées des archives et des interviews des agents en charge de la gestion des ouvrages en crue ainsi que des analyses cartographiques plus ou moins détaillées en fonction des données disponibles.

Quel que soit le panel de méthodes utilisées, le chargé d'étude disposera systématiquement de plusieurs estimations de la production de flottants. Une approche par scénarios semble alors être appropriée, à minima en considérant un scénario de production faible et un scénario de production forte.

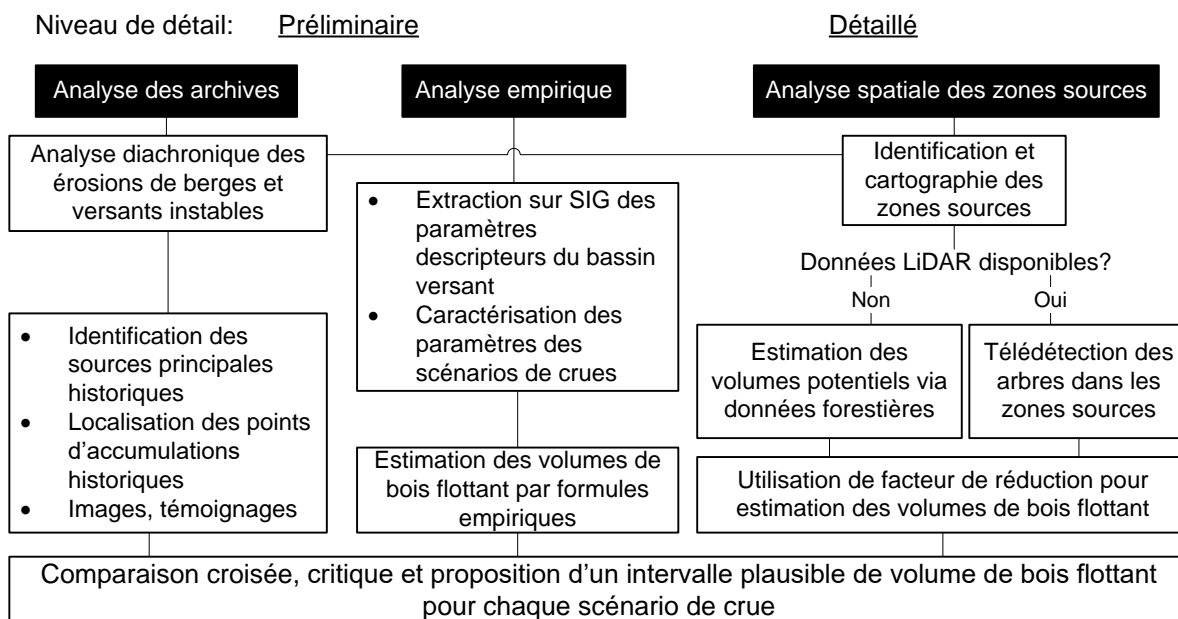


FIGURE 1.2: Méthodes principales d'estimation du potentiel de production en bois flottant d'un bassin versant donné soumis à un scénario de crue

1.2.2 Volume solide ou volume apparent ? Porosité et coefficient de foisonnement

Les embâcles obstruant ponts et ouvrages hydrauliques et les accumulations de bois observées dans le lit des rivières sont en réalité très poreux. Le volume solide V_{BF} est inférieur au volume *apparent* de l'accumulation V_I . Le ratio $a = V_I/V_{BF}$ est appelé "coefficient de foisonnement" ou "facteur de compacité" dans le Guide OFEV (2019). Il varie dans la gamme 2 à 5 (LANGE et BEZZOLA, 2006), ce qui correspond à une porosité $\Phi = \frac{a-1}{a}$ variant entre 50% et 80%.

LIVERS et al. (2020) ont mené une étude détaillée d'accumulations naturelles dans des rivières d'Amérique du Nord. Plusieurs techniques impliquant des analyses d'images aériennes et / ou des visites de terrain ont été testées et leurs précisions ont été qualifiées. Ils ont développé la Figure 1.3 pour aider à estimer l'ordre de grandeur de la porosité d'une accumulation selon deux critères : son caractère plus ou moins ordonné et le caractère plus ou moins trié des éléments qui la constituent.

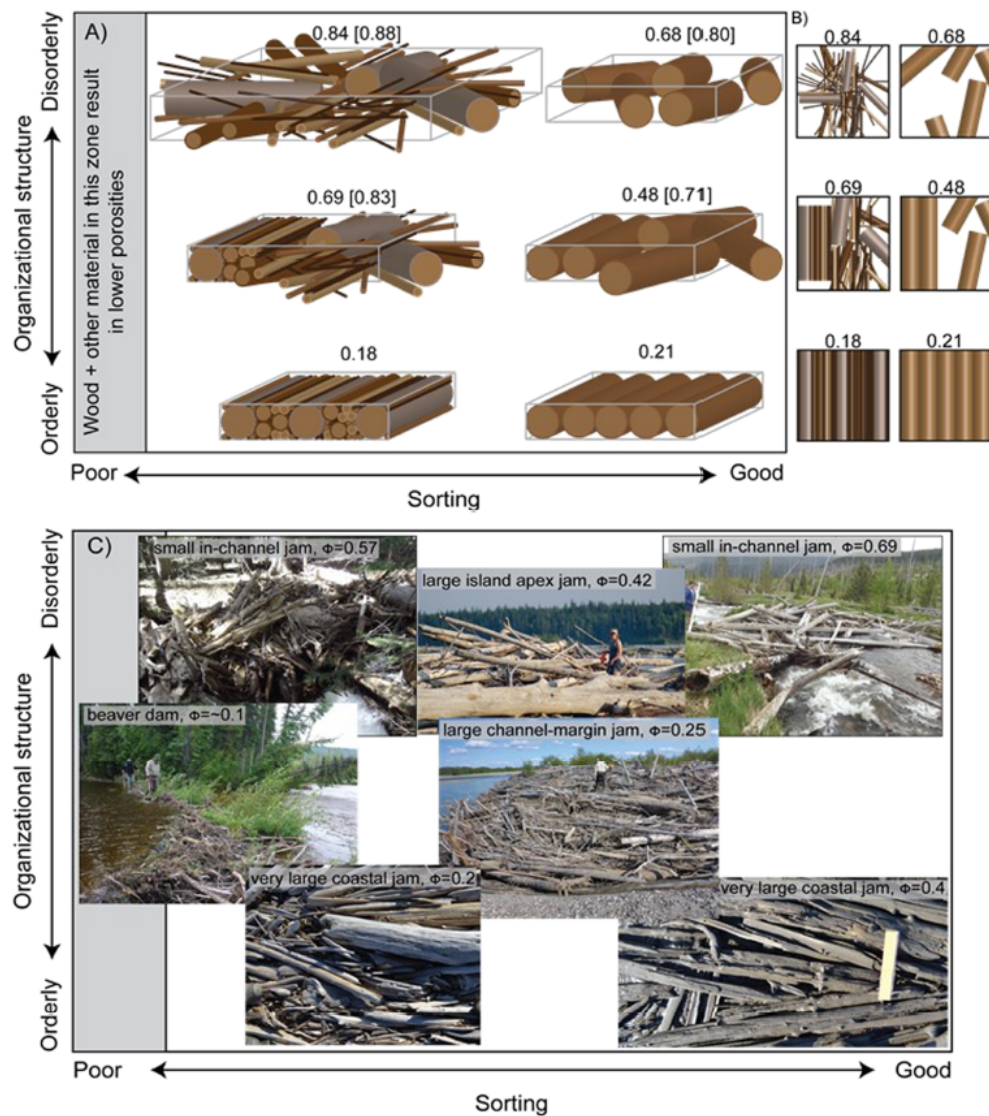


FIGURE 1.3: Figure conceptuelle tirée de LIVERS et al. (2020) illustrant la variabilité de la porosité Φ en fonction du caractère trié ("sorting" en anglais) et organisé ("organizational structure") d'accumulations observées en Amérique du Nord. Les chiffres fournis au dessus des accumulations correspondent à la porosité Φ .

Lors des relevés de terrain ou quand il est fait référence à des accumulations de bois flottant, il est donc crucial de préciser si le volume donné correspond au volume solide ou au volume apparent. Les volumes ré-estimés par tonnage des camions évacués fournissent par exemple directement une estimation du volume solide (avec une hypothèse de densité du bois). Les estimations basées sur des cubatures simples du volume de dépôt sont associées au volume apparent. Les techniques de reconstruction du volume 3D par photogrammétrie se démocratisant, SPREITZER et al. (2020) ont montré que le volume apparent d'accumulations de flottants produites sur modèles physiques avec des flottants assez homogènes étaient de l'ordre de 2.5 fois le volume solide réel, soit une porosité de 60 %.

Des contraintes hydrodynamiques fortes génèrent des accumulations denses. Au contraire, les accumulations formées dans des conditions de faibles vitesses, où les forces de traînée sont très inférieures à la flottabilité, sont plus lâches et poreuses (PITON et al., 2020). SCHMOCKER et HAGER (2013) et SCHALKO et al. (2019a) ont par exemple montré que le coefficient de foisonnement décroît linéairement avec le nombre de Froude.

1.2.3 L'indispensable analyse des archives

Chaque site étant unique, les données historiques doivent systématiquement être mobilisées pour identifier le passif et guider l'analyse et la mobilisation de méthodes complémentaires plus ou moins sophistiquées (D'AGOSTINO, 2013). Les sources sont nombreuses et dispersées (archives privées, municipales ou départementales, coupures de presse, témoignages, images disponibles sur les réseaux sociaux, rapports techniques). Il faut reconnaître que les représentations et perceptions influencent la façon dont sont rapportés les faits (LAY et RIVIÈRE-HONEGGER, 2009).

Le retrait du bois flottant s'accumulant au droit des ponts et des ouvrages hydrauliques est souvent la première opération menée suite à une crue majeure. Elle est parfois même lancée pendant la crue en mobilisant des engins de terrassement qui retirent les pièces maîtresses au fur et à mesure de leur blocage sur les ponts. Ce type de gestion est parfois anticipé et inscrit dans les documents de gestion de crises de type Plan Communal de Sauvegarde (par exemple en Suisse, GERTSCH, 2019). Les volumes extraits sont ensuite souvent rapidement évacués ou broyés. Cette réactivité dans la gestion des embâcles génère un déficit de connaissances dans les volumes et dimensions des embâcles. Dans la plupart des cas, on dispose au mieux de quelques photos de ponts obstrués. Ces dernières sont toutefois des preuves utiles de la possibilité d'un scénario d'embâchement des ouvrages. Quand les volumes évacués sont importants, les bordereaux relevant le tonnage des camions peuvent permettre une estimation des volumes impliqués.

En complément de ces informations historiques sur les flux observés en certains points, il est utile d'analyser la dynamique des zones sources. L'analyse diachronique (entre deux dates) des bandes actives des cours d'eau fait partie des étapes standards des études géomorphologiques des cours d'eau (AE-RMC, 2016). Il est toujours intéressant de sélectionner des dates des images analysées encadrant des périodes "sèches" sans crues majeures ainsi que pré- et post-crues majeures (LIEBAULT et al., 2013, pp. 20, 56, 67). Il est ainsi possible de mettre en évidence les surfaces érodées épisodiquement par les crues (boisées ou non). Ce type de données permet d'alimenter les analyses cartographiques de potentiel de production présentées plus loin.

1.2.4 Analyse préliminaire : Méthodes empiriques d'estimation du volume d'apport

Choix des formules

Dès les années 1990, certains auteurs ont étudié les corrélations entre les paramètres descripteurs des bassins versants (superficie, relief, longueur), des crues (débit de pointe, volume écoulé) et les volumes de bois flottants mesurés en un point donné (ISHIKAWA, 1994; RICKENMANN, 1997). Les bases de données se sont enrichies au fur et à mesure que des observations étaient compilées. L'ensemble du Chapitre 1 du guide OFEV (2019) constitue la présentation la plus complète à ce jour de ce type d'approche appliquée au contexte Européen. Nous ne reprenons ici que les grandes lignes et invitons les chargés d'études à se référer à ce guide pour de plus amples détails.

Formules empiriques du guide de l’OFEV (2019)

Des formules ont été établies sur les corrélations entre le volume de bois flottant V_{BF} et E la superficie du bassin versant (km^2), W la superficie boisée du bassin versant (km^2), L la longueur du chenal (km), L_w la longueur du chenal boisée (km), F le volume de transport sédimentaire (m^3), V_w le volume d’eau de la crue (m^3), Q_{max} le débit de pointe (m^3/s) et P_{vol} le volume total de précipitations (m^3) :

$$V_{BF} = 38 \cdot E^{0.54} \quad (1.1a)$$

$$= 77 \cdot W^{0.56} \quad (1.1b)$$

$$= 40 \cdot L^{0.48} \quad (1.1c)$$

$$= 49 \cdot L_w^{0.5} \quad (1.1d)$$

$$= 0.2 \cdot F^{0.65} \quad (1.1e)$$

$$= 0.3 \cdot V_w^{0.47} \quad (1.1f)$$

$$= 5.7 \cdot Q_{max}^{0.91} \quad (1.1g)$$

$$= 0.3 \cdot P_{vol}^{0.46} \quad (1.1h)$$

$$= 0.4 \cdot Q_{max}^{0.46} \cdot V_{wat}^{0.33} \quad (1.1i)$$

$$= 0.2 \cdot A^{0.23} \cdot F^{0.6} \quad (1.1j)$$

Ces équations, très empiriques, fournissent évidemment des ordres de grandeurs. Elles ont été calées principalement sur des rivières Suisses mais les tests réalisés en France laissent penser que les ordres de grandeurs sont cohérents avec les rares cas suffisamment documentés. Il est vraisemblable que la plupart des crues ne produisent pas autant de flottants que ne le prédisent les Eq. (1.1a–1.1j). Il y a un biais dans leur développement : on ignore l’échantillon probablement significatif de crues qui ne produisent que peu de flottants et, sont intégrées à l’échantillon, seules les crues ayant produit suffisamment de flottants pour qu’il soit décidé de quantifier les volumes. Ces équations sont toutefois basées sur un nombre suffisant d’observations pour qu’il ne puisse être considéré qu’une production massive de flottants soit un fait rarissime. On manque de données en France principalement parce que les volumes de bois flottant traités ou observés ne sont pas archivés.

La Figure 1.4 montre par exemple les données qui ont servi à l’ajustement de l’équation (1.1a). Il apparaît que les observations sont dispersées sur sensiblement deux ordres de grandeurs pour une surface de bassin versant donnée. Afin de prendre en compte cette variabilité et l’incertitude associée à la formule, quatre formules sont en réalité proposées par le guide OFEV (2019, p. 28). En complément des tendances moyennes telle que l’équation (1.1a), des formules sont proposées dans le Tableau 1.1 pour estimer des scénarios bas (ajustés sur les quantiles 10%), scénarios hauts (quantiles 90%) ainsi qu’un scénario extrême ajusté sur la courbe enveloppe. Ces quatre ajustements sont représentés par les quatre lignes grasses de la Figure 1.4.

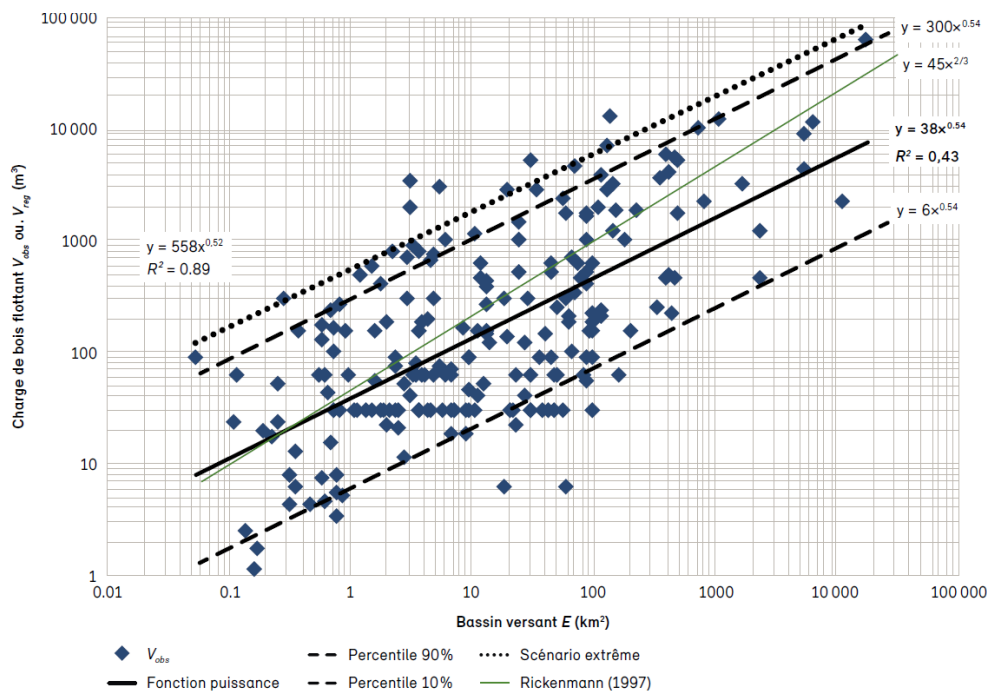


FIGURE 1.4: Exemple de régression empirique : Volume de bois flottant V_{BF} nommé aussi "charge de bois" observé (V_{obs}) ou estimé (V_{reg}) en fonction de la superficie du bassin versant (E) d'après OFEV (2019, p. 27). Noter que plusieurs ajustements statistiques sont fournis : la tendance moyenne (Eq. 1.1a) mais aussi les quantiles 10% et 90% ainsi que la courbe enveloppe. La courbe $45x^{2/3}$ est plus ancienne et tirée de RICKENMANN (1997)

TABLE 1.1: Formules empiriques de prédiction du volume de bois flottant V_{BF} selon différents paramètres (n = nombre de données dans l'échantillon; $[/3; *3]$: pourcentage de valeurs observées comprises dans l'intervalle 1/3 * Valeur prédite - 3*Valeur prédite; Qualité de l'ajustement, *** : meilleure qualité, basée sur plusieurs indicateurs statistiques); Source : OFEV (2019, p. 28).

Paramètre	Scénario bas (quantile 10%)	Ajustement moyen	Scénario haut (quantile 90%)	Courbe enveloppe haute	n	[/3;*3]	Qualité
E [km^2]	$6 \cdot E^{0.54}$	$38 \cdot E^{0.54}$	$300 \cdot E^{0.54}$	$558 \cdot E^{0.52}$	209	50%	***
W [km^2]	$13 \cdot W^{0.56}$	$77 \cdot W^{0.56}$	$720 \cdot W^{0.56}$	$1\,460 \cdot W^{0.46}$	179	52%	**
L [km]	$5.5 \cdot L^{0.48}$	$40 \cdot L^{0.48}$	$400 \cdot L^{0.48}$	$860 \cdot L^{0.44}$	177	41%	*
L_w [km]	$7 \cdot L_w^{0.5}$	$49 \cdot L_w^{0.5}$	$500 \cdot L_w^{0.5}$	$925 \cdot L_w^{0.5}$	175	44%	*
P_{vol} [m^3]	$0.04 \cdot P_{vol}^{0.46}$	$0.3 \cdot P_{vol}^{0.46}$	$2.2 \cdot P_{vol}^{0.46}$	$8 \cdot P_{vol}^{0.41}$	164	51%	**
V_w [m^3]	$0.04 \cdot V_w^{0.47}$	$0.3 \cdot V_w^{0.47}$	$2.6 \cdot V_w^{0.47}$	$6.2 \cdot V_w^{0.45}$	167	50%	*
Q_{max} [m^3/s]	$0.65 \cdot Q_{max}^{0.91}$	$5.7 \cdot Q_{max}^{0.91}$	$30 \cdot Q_{max}^{0.91}$	$115 \cdot Q_{max}^{0.72}$	77	58%	***
F [m^3]	$0.04 \cdot F^{0.65}$	$0.2 \cdot F^{0.65}$	$1.4 \cdot F^{0.65}$	$1.4 \cdot F^{0.7}$	196	56%	***
$Q_{max} \cdot V_w$	$0.3 \cdot Q_{max}^{0.35} \cdot V_w^{0.25}$	$0.4 \cdot Q_{max}^{0.46} \cdot V_w^{0.33}$	$14 \cdot Q_{max}^{0.35} \cdot V_w^{0.25}$	$87 \cdot Q_{max}^{0.26} \cdot V_w^{0.19}$	166	51%	**
E, F	$0.06 \cdot E^{0.22} \cdot F^{0.56}$	$0.2 \cdot E^{0.23} \cdot F^{0.6}$	$1.8 \cdot E^{0.22} \cdot F^{0.56}$	$1.7 \cdot E^{0.23} \cdot F^{0.61}$	196	56%	***

Les exposants des formules basses, moyennes et hautes du Tableau 1.1 sont en général les mêmes. Pour une

valeur de paramètre (superficie de bassin versant, débit de pointe, etc.), l'estimation du volume de bois flottant est donc directement proportionnelle à la valeur du facteur situé en début de formule. Ces facteurs varient en général sur deux ordres de grandeurs entre la formule basse et la formule haute. Comme illustré dans la figure 1.4, cette variabilité correspond à la variabilité réellement observée sur le terrain. Comme souligné plusieurs fois dans ce rapport, le caractère aléatoire de la production de flottant par les cours d'eau impose d'accepter de travailler dans un contexte d'imprécision.

Utilisation des formules empiriques

Les formules compilées dans le Tableau 1.1 peuvent être utilisées comme simples outils d'estimation du volume de bois flottant et fournissent immédiatement des estimations moyennes, mais aussi hautes, basses et extrêmes. En fonction d'éventuelles caractéristiques aggravantes ou limitantes, le chargé d'étude pourra ainsi retenir *des ordres de grandeur* de fourniture en bois flottant à son site d'étude. Il est important de noter que les données qui ont servi à l'établissement de ces équations proviennent essentiellement de rivières et torrents suisses, donc de bassins versants de montagnes ou de piémonts. L'application de ces formules à des bassins versants aux caractéristiques très différentes ou de superficies beaucoup plus étendues peut ainsi être erronée (SCHMOCKER et WEITBRECHT, 2013; PITON et RECKING, 2016).

Les équations les plus faciles à utiliser sont celles basées sur les caractéristiques du bassin versant. Les paramètres peuvent être déterminés par simple analyse SIG⁴. Ces formules présentent toutefois l'inconvénient de ne pas incorporer de terme associé à la magnitude de l'évènement. Au contraire, les formules prenant en compte le débit de pointe, le volume d'eau, le volume de sédiments transportés ou le volume de pluie présentent l'avantage d'être dépendantes de cette magnitude. Ces paramètres descripteurs nécessitent toutefois d'être estimés au mieux, ce qui peut parfois être compliqué et introduit une source d'incertitude en plus.

Ces formules simplifiées fournissent des ordres de grandeurs et semblent s'appliquer à une gamme de bassins versants très larges (0.1-10 000 km² sur la figure 1.4). Le Guide OFEV (2019, p. 29) indique que les meilleures prédictions ont été obtenues pour des volumes de bois flottants d'environ 50 à 500 m³ (précision à un facteur $\times 0.5 - \times 2$ près). Dans les bassins versants où ont été observées des productions plus petites (<50 m³), les formules ont tendance à surévaluer la production. La tendance étant inversée pour les quantités observées les plus grandes (>500 m³), où les formules auraient plutôt tendance à sous-estimer les productions réelles.

La figure 1.5 montre une application des formules empiriques au cas de la Brague à Antibes (Alpes-Maritimes) pendant la crue d'octobre 2015. Les volumes ayant atteint les zones à enjeux sont estimés à $V_{BF} \approx 600 \text{ m}^3$. À l'exception de la formule impliquant le volume de transport solide (paramètre dont on ne dispose pas de valeur, même grossière), les ajustements moyens des autres formules fournissent des valeurs généralement légèrement inférieures mais finalement assez proches. Les valeurs sont très inférieures aux valeurs estimées par le scénario haut ou les courbes enveloppes. Selon cette approche empirique, la Brague à Antibes, lors de la crue d'octobre 2015, a donc eu une production notable de bois flottant, beaucoup plus importante qu'un scénario optimiste basé sur le scénario bas ($V_{BF} \approx 50 - 100 \text{ m}^3$), mais pas extrême ($V_{BF} \approx 2\,000 - 4\,000 \text{ m}^3$).

D'autres travaux scientifiques proposent des formules empiriques de production de flottants :

- COMITI et al. (2016) proposent comme formule enveloppe $V_{BF} \approx 1170 \cdot E^{0.4}$ dans la gamme $E \in [5 \text{ km}^2; 2000 \text{ km}^2]$;
- ICOLD (2019) propose des ajustements multi-paramétriques sous forme de sommes de lois puissances basées sur des données Californiennes. Les paramètres d'entrée sont la superficie du bassin versant, l'intensité horaire de pluie, la pente moyenne du bassin versant et un facteur prenant en compte l'histoire et le risque d'incendie;
- Le Guide de la SABO DIVISION (2000) propose des ajustements simples issus d'observations menées au Japon où le problème des flottants est un sujet important en lien avec les intensités de pluies associées aux typhons, le relief très escarpé et la géologie volcanique propice aux glissements de terrains. Il peut être une référence intéressante pour les études des cours d'eau des territoires d'Outre-Mer.

4. La base de donnée SIG SYRAH-CE (SYstème Relationnel d'Audit de l'Hydromorphologie des Cours d'Eau) fournit des estimations des linéaires boisées, des éléments sur les surfaces boisées localisées dans les corridors fluviaux ainsi que de nombreux éléments sur l'aménagement du lit mineur et majeur (digues, réseaux, seuils, etc.) qui sont utiles à l'analyse de la production du bois flottant. Elle est librement téléchargeable au lien suivant : <https://geo.data.gouv.fr/fr/datasets/ae65b462bf55e52fcbbdf1c342fcff12353d78c6>.

Application:

Paramètre	Valeur	Unité	Scénario bas (quantile 10%)	Ajustement moyen	Scénario haut (quantile 90%)	Courbe enveloppe
E - Superficie de bassin versant	68 km ²		59	371	2 929	5 007
W - Superficie boisée de bassin versant	31.7 km ²		90	533	4 988	7 159
Lw - Longueur boisée de chenal	17.5 km		29	205	2 092	3 870
L - Longueur de chenal	20.98 km		24	172	1 724	3 282
Pvol - Volume de pluie	8 000 000 m ³		60	449	3 295	5 412
Vw - Volume de crue	5 200 000 m ³		57	430	3 728	6 525
Qmax - Débit de pointe	240 m ³ /s		95	835	4 397	5 949
F - Volume de transport solide	1 000 m ³		4	18	125	176
Equation bivariée: Qmax & Vw			98	448	4 552	6 830
Equation bivariée: E & F			7	33	218	303

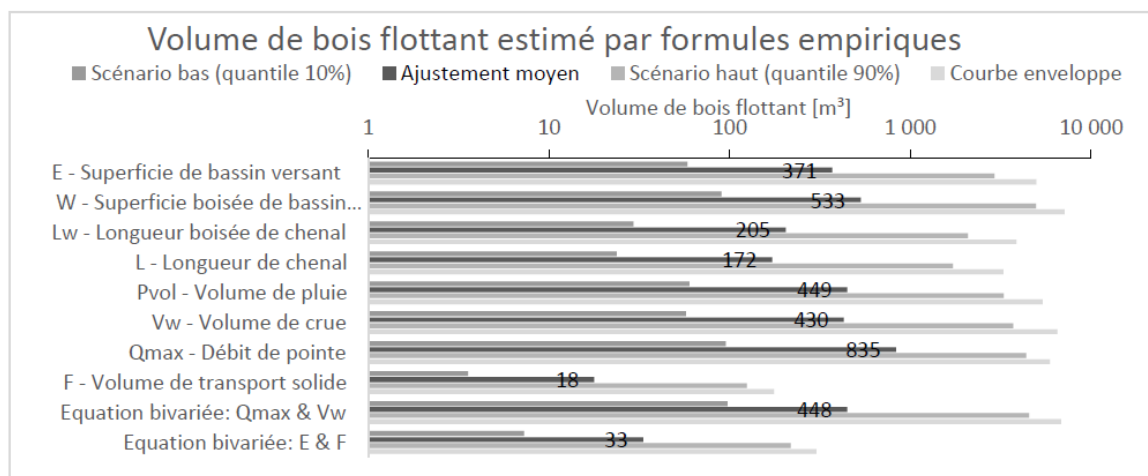
Représentation graphique:


FIGURE 1.5: Exemple d'application des formules empiriques au cas de la Brague à Antibes (Alpes-Maritimes). Les données cartographiques sont issues des BD IGN Alti (cartographie bassin versant), IGN Forêt V2 (zones boisées), SYRAH (linéaires de cours d'eau), les données hydrologiques des analyses de PITON et TACNET (2020) et le volume solide est une estimation experte incertaine)

Volume d'apport en bois flottant \neq volume de bois observé dans le lit!

L'ensemble des données utilisées pour ajuster les formules présentées dans la section précédente sont des données d'apport mesurées à l'exutoire d'un bassin versant donné (bassin de plage de dépôt, piège à flottant, lac naturel ou de barrage, etc.). Il est important de souligner qu'il y a une différence significative entre ces volumes d'apport et les volumes de bois disponibles dans le chenal ou dans le lit majeur (arbres sur pied ou non) à un moment donné : seule une fraction⁵ du bois réellement disponible est transportée et apportée en un point donné d'observation. Il existe des formules empiriques permettant de prédire les volumes de bois flottant observés dans le lit des cours d'eau (BRADLEY et al., 2005; GURNELL, 2013). Il est toutefois incorrect d'utiliser ces volumes pour prédire directement la production de flottants d'une rivière : un tel bilan néglige d'une part la fraction souvent significative de bois flottant qui restent dans les zones naturelles (chenal et lit majeur); et d'autre part les volumes parfois très significatifs de bois flottant issus d'arbres sur pied, recrutés à l'échelle de la crue. Le premier terme

5. Voir p. 28 pour des valeurs des taux de transfert.

aura tendance à abaisser l'estimation tandis que le second terme peut l'augmenter significativement. Il est ainsi tout à fait possible d'observer des apports significatifs de bois flottants issus de cours d'eau où la présence de bois mort en rivière est virtuellement nulle du fait d'une gestion fréquente et stricte de ces derniers. Compte tenu, d'une part, de la variabilité de la production potentielle de flottants illustrée par la gamme des coefficients du Tableau 1.1 ; et d'autre part de la faible quantité de bois flottant généralement présente dans le lit des cours d'eau, il ne semble pas utile, en tout cas dans des études préliminaires, de tenter de corriger les estimations empiriques des approches simplifiées avec un terme correcteur représentant le volume de bois déjà compris dans le chenal : la contribution des berges au bilan global est très largement prépondérante et une partie du bois déjà en rivière n'atteindra de toute façon pas l'exutoire du bassin versant.

1.2.5 Etude détaillée : Analyse cartographique des zones de production

L'application des formules empiriques fournies à la section précédente est très rapide. A un stade d'étude plus avancé, une analyse cartographique de la répartition spatiale des sources de bois flottant peut être utile (MAZZORANA et al., 2009; MAZZORANA et FUCHS, 2010; RUIZ-VILLANUEVA et al., 2014b). L'analyse se déroule en plusieurs étapes :

- Identification des superficies potentiellement sources de bois flottant (Figure 1.6) ;
- Estimation des volumes mobilisables présents sur ces zones sources au travers des densités de peuplement ;
- Estimation d'un taux de transfert de ces volumes totaux représentant la fraction transportée jusqu'au point d'étude alors que le reste des volumes disponibles est resté dans les zones sources ou s'est arrêté avant le point d'étude.

Des recommandations associées à ces trois étapes sont compilées dans les paragraphes suivants. Pour ce stade d'étude aussi, le chapitre 1 du Guide OFEV (2019) fournit de nombreux éléments complémentaires.

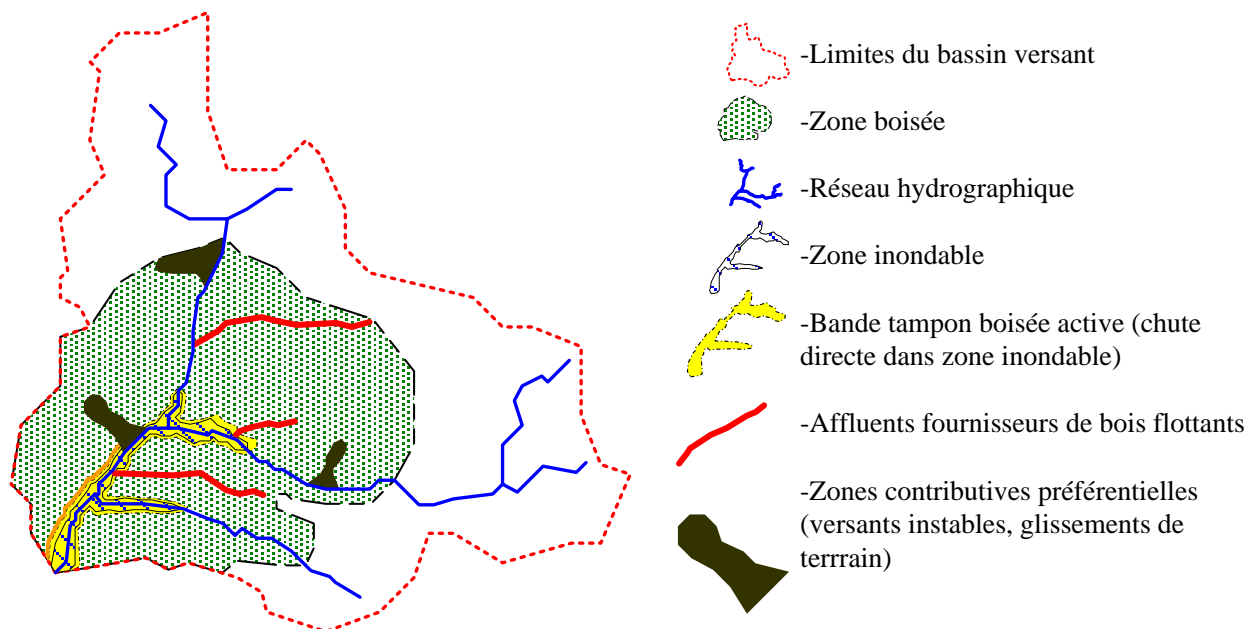


FIGURE 1.6: Schéma de la délimitation des différentes zones de recrutement de bois flottant (adapté de MAZZORANA et al., 2009)

Identification des superficies des zones sources

La première étape consiste à analyser la distribution spatiale des zones sources principales (glissements de terrain, tributaires gros pourvoyeurs de bois flottants et érosions de berges). Les cartes des aléas multirisques tirées des documents d'affichage du risque (PPR Risques Naturels) sont un bon exemple de source d'information sur la présence avérée ou suspectée de zones géologiques instables et de cours d'eau torrentiels. La base de données BD-RTM⁶ du service de Restauration des Terrains en Montagne de l'Office National des Forêts (ONF-RTM) compile des informations historiques sur l'occurrence des crues torrentielles et des glissements de terrain. D'autres portails SIG et sources de données pré-existantes peuvent être mobilisés à ce stade. Des outils dédiés à l'étude du bois flottant ont été développés et produisent des cartographies de susceptibilité sur la base d'une intégration de plusieurs bases de données, de descriptions simplifiées de l'activation des différentes sources telles que la stabilité des versants, la mobilisation des tributaires ou du corridor fluvial (notamment MAZZORANA et FUCHS, 2010; COMITI et al., 2012; RUIZ-VILLANUEVA et al., 2014b; CISLAGHI et al., 2018). La présentation de ces derniers dépasse la portée de cette synthèse et n'est donc pas incluse dans ce rapport.

Déterminer l'emprise du corridor potentiellement soumis aux érosions de berges reste une étape très incertaine. Les analyses diachroniques des bandes actives pré- et post-crues constituent des points de références historiques utiles. A l'occasion de crues morphogènes majeures, les élargissements des bandes actives peuvent toutefois dépasser largement les observations tirées des photos aériennes qui ne couvrent en général que la seconde moitié du XX^{ème} siècle. Ce type d'étude fait partie intégrante des études de détermination des espaces de bon fonctionnement (AE-RMC, 2016). Des travaux de compilation d'études des élargissements de bande active observés pendant les crues sont en cours (RUIZ-VILLANUEVA et al., 2022). Les taux d'élargissement (largeur post-crue/largeur pre-crue) de plus de 3000 tronçons ont été mesurés sur un ensemble de 85 cours d'eau européens situés en montagne ou sur leurs piémonts, ceci pour 95 crues (certains cours d'eau ont subi deux crues majeures). A l'échelle du tronçon, le taux d'élargissement est très variable (>1.7 pour 50 % des tronçons, > 2.8 pour 25 % des tronçons, il dépasse 4.8 pour les 10% supérieurs). L'analyse montre en synthèse que le premier facteur explicatif de l'élargissement est la magnitude de la crue : le taux d'élargissement des tronçons étant en moyenne de 2.6 pour les périodes de retour > 100 ans, alors qu'il est "seulement" de 1.9 pour les périodes de retour < 30 ans. Le second facteur explicatif est le confinement du chenal : les cours d'eau confinés entre les versants (largeur de lit majeur < 2×largeur du lit mineur) sont plus limités dans leur extension que les cours d'eau partiellement ou non-confinés. La production de flottants est toutefois le fruit de l'érosion cumulée des tronçons d'une rivière. A cette échelle, ce jeu de données montre que la surface de bande active étudiée (longueur moyenne : 4.7 km) a subi une augmentation de moins de 42% dans 25% des cas, de moins de 91% dans 50% des cas et de plus de 188% dans 25% des cas. *Ces observations montrent qu'une augmentation de la surface du chenal actif de l'ordre de 50% à 200% est un scénario tout à fait réaliste.*

La cartographie des zones actives géomorphologiquement est à croiser avec la carte du couvert forestier. La base de données IGN BD Forêt⁷ V2 cartographie les formations végétales de superficie supérieure ou égale à 0.5 ha. Après un contrôle rapide à l'aide des images aériennes pour écarter les zones ne correspondant pas à du couvert forestier dense (en général les polygones de type "Landes", "Formation herbacée" et certaines "Forêts ouvertes"), cette base de données permet de disposer rapidement d'une cartographie précise des zones boisées.

Méthodes d'estimation des densités de peuplement

Les phases précédentes d'analyse visent à disposer d'une surface potentiellement boisée mobilisable. L'obtention d'un volume de bois mobilisable nécessite de déterminer les volumes de bois par hectare de surface boisée. Deux méthodes peuvent être mobilisées pour estimer ce paramètre :

- L'utilisation de valeurs de densité de peuplement moyennes tirées de données forestières telles que celles de l'IFN (chiffres synthétiques fournis dans les paragraphes suivants);
- L'utilisation de levés LiDAR (données MNT et MNS, ou fichiers originaux .las) permettant, après extraction du modèle numérique de canopée (MNC) estimé par différence entre l'altitude de la végétation et l'altitude

6. Accessible en ligne à l'adresse suivante : <https://rtm-onf.ign.fr/>.

7. Voir la description sur le site internet de l'IGN : <https://inventaire-forestier.ign.fr/spip.php?article646>

du sol, de mener des extractions automatiques localisant les arbres (EYSN et al., 2015) et de disposer de mesures de ces derniers par la même occasion (hauteur, volume de houppier, etc.).

Estimation des volumes disponibles sur la base de données forestières

Les données de l'IFN ont été mobilisées afin de disposer de données sur les volumes de bois flottant mobilisables dans les forêts de France Métropolitaine. Plusieurs étapes de traitement ont été nécessaires pour cela :

1. **Estimation du volume de bois sur pied** Les données brutes de l'IFN fournissent une estimation du "volume bois fort tige" de chaque arbre. Cette donnée correspond au volume du tronc depuis sa base jusqu'à un diamètre de 7 cm. Elle néglige donc le volume solide issu des branches qui contribue pourtant au volume global de bois flottant. Une autre estimation du volume de chaque arbre a donc été réalisée à l'aide de la formule dite "EMERGE" (issu du projet éponyme et publiée dans DELEUZE et al., 2014). Les densités de peuplement, y compris les chandelles, c'est à dire les arbres morts sur pied, ont ensuite été estimées en m^3/ha grâce aux coefficients de pondération fournis pour chaque arbre par l'IFN. Les volumes unitaires de bois varient entre 0 et $2000 m^3/ha$, les valeurs supérieures à $1000 m^3/ha$ restant rares. Les volumes "EMERGE" sont en moyenne 1.42 fois supérieurs aux volume IFN de bois "forts" (seulement les troncs).
2. **Estimation du volume de bois mort** L'étape suivante était de prendre en compte les éventuels volumes complémentaires de bois mort. La figure 1.7A compile les volumes de bois mesurés sur les 72 382 placettes de l'IFN. Les volumes de bois mort sont en général faibles ($< 8 m^3/ha$ pour la moitié des cas, $< 20 m^3/ha$ pour 75% des cas) mais une minorité de forêts retrouve peu à peu des valeurs naturelles dépassant $100 m^3/ha$. Des volumes $> 100 m^3/ha$ semblent cohérents avec les valeurs retrouvées dans d'autres forêts européennes sujettes à des exploitations forestières similaires (PULETTI et al., 2019), bien que les volumes fournis par l'IFN correspondent aux arbres morts mais encore sur pied. Il est important de noter que ces volumes sont très inférieurs aux volumes de bois mort observés sur des forêts non exploitées. Les données mesurées par exemple sur des forêts primaires de Pologne montrent des volumes de bois mort variant plutôt entre 100 et $300 m^3/ha$ (BUJOCZEK et al., 2018). Cette sous-représentation du bois mort dans les forêts et les ripisylves actuelles est le fruit de l'histoire ancienne et plus récente (COMITI, 2012). En l'état, on relève donc que le volume de bois mort augmente le volume de bois total de l'ordre de 1 à 8% en général (Figure 1.7B).

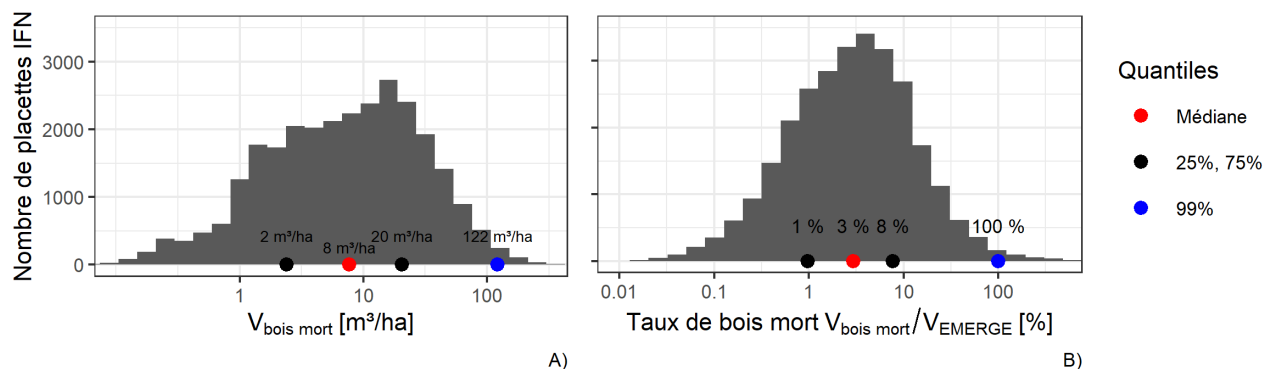


FIGURE 1.7: Volume de bois des arbres morts mais sur pied relevé dans les placettes IFN de France métropolitaine : A) Volume de bois par hectare et B) ratio entre volume de bois mort et volume de bois sur pied estimé par la formule EMERGE (Source : IGN – Inventaire forestier national français, Données brutes, Campagnes annuelles 2005-2018, <https://inventaire-forestier.ign.fr/spip.php?rubrique159>, site consulté le 16/09/2020).

3. **Sélection des placettes représentatives** Les volumes de bois sur pied "EMERGE" et de bois mort ont été sommés pour chaque placette pour fournir des densités de bois (vivant et mort) exprimées en m^3/ha . La dernière étape d'analyse a consisté à identifier les placettes les plus représentatives possible de forêts de ripisylves.

L'utilisation des sylvo-éco régions d'alluvions récentes (SERar) permet théoriquement une analyse régionale. Elle n'a toutefois pas été retenue à ce stade pour plusieurs raisons : (i) la localisation de placettes étant

imprécise, il persiste un doute sur l'appartenance réelle de la placette à la SERar ; (ii) les contours des SERar sont fixés par la géologie alluvionnaire du sol. La nature alluvionnaire du sol n'est pas nécessairement un indice de proximité immédiate présente de cours d'eau ; et (iii) les formations alluvionnaires de moins de 200 m de large ne sont pas intégrées aux SERar alors qu'elles constituent le support d'un très grand nombre de cours d'eau de montagne.

L'utilisation de la position topographique a aussi été abandonnée. Les placettes situées dans des positions vraisemblablement proches des talwegs et cours d'eau étant minoritaires (types "7 Bas de versant", "8 Vallée" ou "9 Vallon"). De nombreuses ripisylves se trouvent vraisemblablement dans des fonds de vallées alluvionnaires larges et leur position topographique ne se démarque probablement pas selon les critères retenus par l'IFN.

C'est finalement la proximité de formation hydrographique que nous retenons pour présenter les résultats (Figure 1.8). Cette donnée n'est disponible que depuis 2013 (cf. présentation des données IFN p. 14). Les données antérieures ont donc été classées "99 Hydrographie inconnue" et rassemblées avec les données classées "0 Pas d'hydrographie". Ce sous-groupe comporte significativement plus de placettes. On relève que les densités de peuplement varient entre 0 jusqu'à 1000 m³/ha, le nombre de placettes approchant la borne haute est faible. La densité médiane varie sur la gamme 239-289 m³/ha dans les trois sous-groupes. On note que le second sous-groupe qui rassemble les placettes proches d'entités d'hydrographie moyennes présente des valeurs de quantiles proches du troisième sous-groupe. Le premier sous-groupe (placettes proches des ruisseaux et sources) présente par contre des densités de peuplement un peu plus fortes. L'écart inter-quantiles, c'est à dire la différence entre le quantile 75% et le quantile 25% (cet intervalle regroupe 50% de l'échantillon) reste toujours assez large. En l'état de ces analyses, on retient que les densités de bois varient typiquement dans la gamme 130 m³/ha - 400 m³/ha, mais que sensiblement un quart des sites présentent des densités plus faibles et un quart des densités plus fortes.

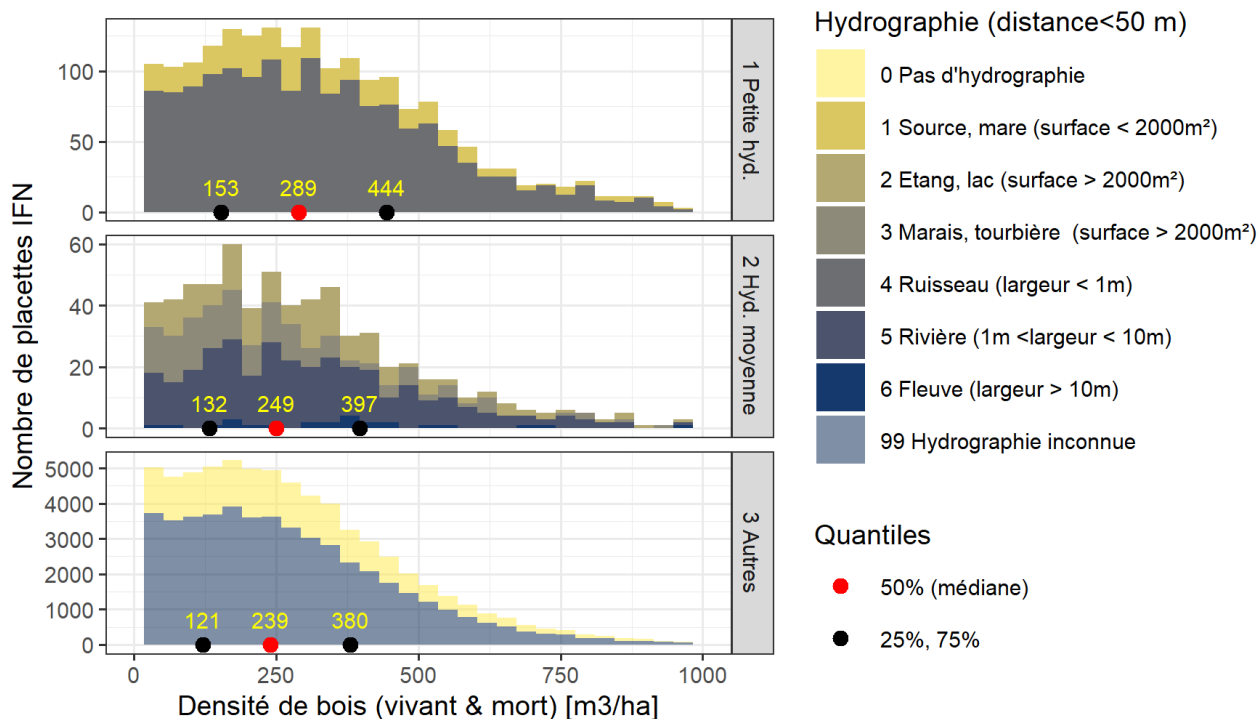


FIGURE 1.8: Variabilité du volume de bois (vivant et mort) en fonction de la proximité de formation hydrographique (Source : IGN – Inventaire forestier national français, Données brutes, Campagnes annuelles 2005-2018, <https://inventaire-forestier.ign.fr/spip.php?rubrique159>, site consulté le 16/09/2020).

Les données de l'IFN donnent des ordres de grandeurs intéressants qui permettent des estimations rapides mais imprécises des volumes de bois disponibles. Il est possible de répéter ces analyses sur des sous-échantillons en sélectionnant par exemple les placettes issues d'un secteur géographique particulier (Sylvo-éco-régions, Sylvo-éco-régions d'alluvions récentes, etc.). Les tests menés en ce sens sur deux sites ont montré que restreindre de cette façon le nombre de placettes ne diminuait que marginalement la variabilité de l'estimation : les densités de bois varient aussi localement sur des gammes de plusieurs centaines de m³/ ha.

Utilisation de données LiDAR pour la télédétection des densités de peuplement

La mobilisation des données LiDAR permet de caractériser les peuplements forestiers locaux. Ce type de levé s'est démocratisé pour alimenter les études hydrauliques et géomorphologiques. Il faut par ailleurs noter que l'Etat a commandé à l'IGN la réalisation d'un levé LiDAR HD (10 points/m²) sur l'ensemble du territoire métropolitain sur la période 2021-2026. Les approches présentées ci-après sont ou seront donc applicables sur l'ensemble du territoire. L'analyse des données LiDAR se déroule en trois étapes :

1. **Calcul du modèle numérique de canopé (MNC)** La première étape est d'estimer la hauteur de la végétation dans le MNC à travers la différence entre le Modèle Numérique de Surface (MNS - qui représente les points altimétriques les plus hauts mesurés sur un pixel) et le Modèle Numérique de Terrain (MNT - qui représente les points altimétriques minimums représentatifs du niveau du sol). Il est important de noter que les points des données sources LiDAR (fichiers de points bruts de type ".las") sont classés selon différentes catégories (sol, végétation basse, moyenne, haute, bâtiment, réseaux électriques, points haut anormaux, points bas anormaux). Si ce classement est fait de manière rigoureuse, il est possible de retirer automatiquement certaines catégories lors de la génération du MNS.
2. **Localisation automatique des arbres** Des scripts de traitements automatiques des MNC ont été développés pour localiser automatiquement les arbres (EYSN et al., 2015; MONNET, 2020). Leur performance est meilleure dans les forêts de conifères où la forme des houppiers est géométriquement plus nette. Ce type d'analyse permet toutefois d'obtenir rapidement des ordres de grandeur du nombre de tiges et des longueurs de ces dernières. Les résultats peuvent être automatiquement exportés sous format exploitable sous SIG. Un exemple d'application est fourni dans la figure 1.9 où 17 845 arbres ont été automatiquement détectés sur une surface de 83.2 ha.
3. **Contrôle des points** Une vérification manuelle sommaire des points est nécessaire pour écarter les points aberrants évidents (bâtiments, lignes électriques). Dans l'exemple de la Figure 1.9, environ 500 points, soit 3% des points, ont été écartés par une vérification rapide à l'aide des vues aériennes. Ce travail mené sous SIG peut être facilité par un affichage sélectif en fonction de la hauteur de l'arbre détecté (permettant d'écarter certains points haut aberrants associés à des antennes, viaducs, bâtiments hauts) ou de l'élancement (Volume du houppier/(hauteur*surface)) permettant d'écarter des arbres potentiellement douteux car très élancés et correspondant parfois en réalité à des lampadaires et pylônes (par exemple points noirs sur la Figure 1.9).

Ces analyses aboutissent à la localisation des arbres, et à une connaissance de la variabilité des volumes de houppiers et des hauteurs des arbres. Ce dernier paramètre est une réelle plus value par rapport aux données IFN. La longueur des éléments de bois flottant étant le paramètre primordial d'analyse de la mobilité et du potentiel de formation d'embâcle, il donne par ailleurs des indications sur les diamètres probables des pièces de bois flottant (voir Equation 1.5 p. 30). Une approche simplifiée a été développée pour estimer le volume de bois de chaque arbre sur la base de sa hauteur (une formule bivariée prenant en compte le volume du houppier sera certainement plus précise mais ce type d'approche n'existe pas encore d'après les discussions que nous avons eu avec des collègues forestiers).

Les volumes solides de bois V_s et hauteurs sur pied h_{tot} de plus de 605 000 feuillus et 222 000 conifères ont été utilisés pour caractériser les corrélations entre les deux variables (Figure 1.10A) :

$$V_s = 1.46 \cdot 10^{-5} \cdot h_{tot}^{3.62} \quad \text{pour les feuillus} \quad (1.2a)$$

$$V_s = 1.49 \cdot 10^{-4} \cdot h_{tot}^{2.86} \quad \text{pour les conifères} \quad (1.2b)$$

On constate que ces lois puissances sont des représentations acceptables du volume moyen des arbres pour des hauteurs équivalentes, sauf pour les feuillus de plus de 40 m de haut où l'approche tend à sur-estimer les volumes

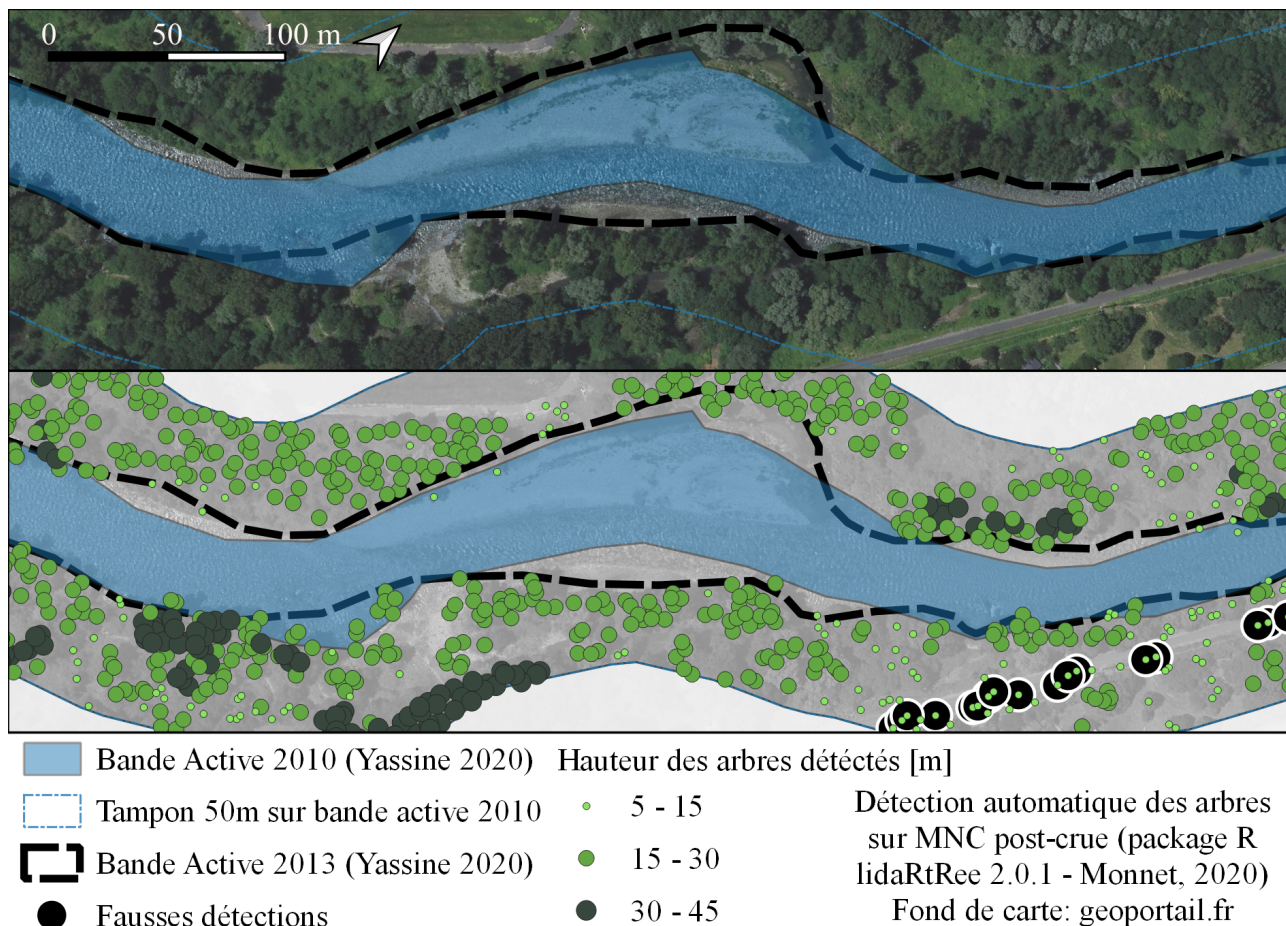


FIGURE 1.9: Exemple de détection automatique des arbres en vue aérienne du Gave de Pau en amont de Lourdes (Hautes-Pyrénées) : photo aérienne et limites des bandes actives en 2010 et après la crue morphogène de juin 2013 digitalisée par YASSINE (2020) et points représentant les arbres localisés automatiquement dans une bande tampon de 50 m autour de la bande active de 2010 (scripts R tirés de MONNET, 2020). A noter que peu d’arbres sont localisés dans l’emprise de la bande active 2013 parce que le LiDAR a été levé après la crue.

(Figure 1.10A). Ces équations simplistes sont en effet beaucoup moins subtiles que celles développées par les forestiers sur la base des données de terrains et qui ont permis d’estimer le volume solide utilisé comme référence dans cet ajustement. L’Eq. (1.2) prédit donc nécessairement des estimations incertaines, en témoignent les résidus, c’est à dire le ratio entre volume observé (en réalité estimé via la formule à trois paramètres EMERGE) et volume estimé (Figure 1.10B). Le Tableau 1.2 fournit les valeurs des quantiles des résidus : 90% sont dans la gamme [0.4; 4.3], ce qui n’est pas très précis à l’échelle de l’arbre mais qui semble acceptable dans la mesure où cette approche est à utiliser avec des centaines, voire des milliers d’individus. Dans ce cas, les surestimations compensent vraisemblablement partiellement les sous-estimations.

TABLE 1.2: Quantiles des résidus des estimations de l’Eq. (1.2)

Quantile	1%	2.5%	5%	10%	25%	50%	75%	90%	95%	97.5%	99%
Résidu pour les feuillus	0.2	0.2	0.3	0.4	0.6	1.1	2.2	4.3	7.2	11.7	21.2
Résidu pour les conifères	0.3	0.3	0.4	0.5	0.8	1.2	1.8	3.0	4.3	6.1	9.2

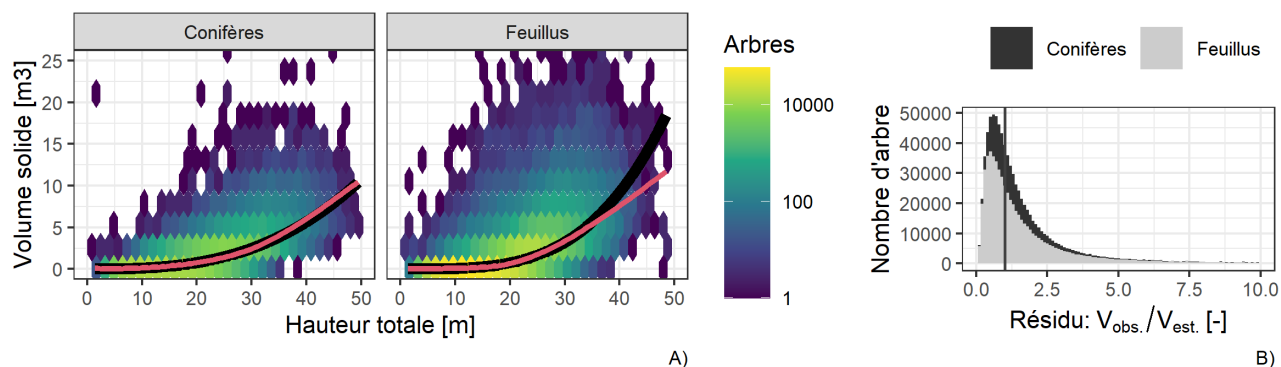


FIGURE 1.10: Lien hauteur - volume de bois des arbres : A) corrélation entre hauteur des arbres sur pied h_{tot} et volume de bois V_S (estimé via la formule EMERGE de DELEUZE et al., 2014). Noter que l'échelle de couleur est logarithmique : les pixels clairs comptent donc 100-1000 fois plus d'arbres que les pixels foncés; B) distribution des résidus des estimations de l'Eq. (1.2) (Source des données : IGN – Inventaire forestier national français, Données brutes, Campagnes annuelles 2005 et suivantes, <https://inventaire-forestier.ign.fr/spip.php?rubrique159>, site consulté le 16/09/2020)

Taux de transfert des volumes disponibles : le Facteur de réduction de la charge de bois flottant f_T

Les analyses SIG des volumes de bois disponibles fournissent un volume potentiel. La dernière étape consiste à appliquer un facteur de réduction f à ces volumes totaux pour disposer d'estimations des volumes transférés jusqu'au point d'étude. Le Tableau 1.3, tiré du guide OFEN (2019, p. 17), propose des valeurs pour ce facteur de réduction de la charge de bois flottant pour trois scénarios : un scénario de crue fréquente (période de retour \pm trentennale), un scénario de crue d'occurrence moyenne (période de retour \pm centennale) et un scénario de crue plus rare (période de retour \pm tri-centennale) et selon le type de sources de bois flottant (bois mort présent initialement dans le chenal, érosions latérales, glissements de terrains, laves torrentielles). Ces chiffres sont des ordres de grandeurs déduits de réanalyses menées sur 34 bassins versants.

TABLE 1.3: Facteurs de réduction f_T des volumes potentiels représentant le taux de transfert réel selon les types de sources et scénarios de crues

Type de source	Crue fréquente (T \pm 30 ans)	Crue moyenne (T \pm 100 ans)	Crue rare (T \pm 300 ans)
Bois mort en rivière	0.1	0.3	0.7
Erosion latérale	0.05	0.1	0.2
Glissement de terrain	0.01	0.05	0.1
Lave torrentielle	0.05	0.1	0.3

Le volume de bois flottant pour un scénario T donné $V_{BF,T}$ est donc en synthèse estimé par la formule :

$$V_{BF,T} = \sum_i (f_{i,T} \cdot V_{pot,i}) = \sum_i (f_{i,T} \cdot \text{Surface boisée}, i \cdot \text{densité peuplement}_i) \quad (1.3)$$

avec i les sources de bois flottant, V_{pot} les volumes potentiellement mobilisables et f le facteur de réduction. Dans le cadre d'une estimation des volumes potentiels via des données LiDAR, la formule prend alors la forme :

$$V_{BF,T} = \sum_i (f_{i,T} \cdot V_{pot,i}) = \sum_i \left(f_{i,T} \cdot \sum_{j=1}^{N_i} V_{S_j} \right) \quad (1.4)$$

avec N_i le nombre d'arbre concerné par le processus source i , j l'indice désignant chacun de ces arbres, et V_{S_j} leur volume solide élémentaire.

Application au cas de la Brague à Biot et Antibes (Alpes-Maritimes) En guise de synthèse, si on tente une application à l'exemple de la Brague qui a été bien documenté par les études de PITON et al. (2018) :

- Le secteur n'est pas sujet aux glissements de terrain, ni aux laves torrentielles et le plan de gestion de la ripisylve génère une présence négligeable de bois mort en rivière. La source quasi-exclusive de bois flottant est donc associée aux érosions de berges ;
- L'application des formules empiriques (Eq. 1.1a-1.1j) donne un ordre de grandeur typique de volume de bois flottant $V_{BF} \approx 200 - 500 \text{ m}^3$ (scénario basé sur les ajustements moyens), une production minimale probable de $V_{BF} \approx 50 - 100 \text{ m}^3$ (estimation optimiste basée sur le scénario bas) et une production maximale probable de l'ordre de $V_{BF} \approx 2\,000 - 4\,000 \text{ m}^3$ (estimation pessimiste basée sur le scénario haut) ;
- Le croisement de l'Atlas des Zones Inondables PACA avec la BD Forêt V2 montre 178 ha de zone inondable boisée dans le bassin versant. Un contrôle rapide a permis d'estimer la surface à environ 112 ha par exclusion des zones vraisemblablement non sources de bois flottants (situées trop en amont sur le bassin versant, en aval des verrous hydrauliques ou sur de petites combes ou sujettes à des écoulements trop dispersés et réduits pour mobiliser des arbres) ;
- En appliquant une gamme de densité de peuplement de 130-400 m^3/ha , on estime les volumes potentiellement disponibles à $V_{pot} = 7\,280 - 89\,000 \text{ m}^3$ sur l'ensemble du bassin versant ;
- Pour un événement de période de retour d'ordre centennale, d'après le Tableau 1.3, le volume de bois flottant est $V_{BF} = 0.1 \cdot V_{pot} \approx 700 - 9\,000 \text{ m}^3$.
- Les analyses menées sur les photos aériennes ont montré que ≈ 9 ha de forêt ont été arrachés par la crue. On note que c'est assez proche de 10% de la zone boisée inondable mentionnée. Ce chiffre est aussi dans la gamme 50%-200% de la surface de bande active initiale (≈ 8 ha) ;
- Les relevés menés suite à la crue ont mesuré, dans la basse vallée où sont situés les enjeux, un volume apparent de 2921 m^3 d'accumulation de flottants, soit un volume solide de bois flottant de l'ordre de $V_{BF} \approx 600 \text{ m}^3$ (hypothèse de porosité de 80%). Cette estimation est proche du scénario moyen fourni par les méthodes empiriques et de la fourchette basse fournie par l'analyse SIG détaillée.
- Il est intéressant de noter qu'en complément des volumes ayant atteint la basse vallée, un volume apparent de 5798 m^3 ($V_{BF} \approx 1160 \text{ m}^3$ avec une hypothèse de porosité de 80%) était resté dans les zones naturelles amont. Si l'ensemble de ces volumes avaient été exportés dans les zones à enjeux, ils seraient toutefois restés comparables au scénario haut des formules empiriques et à un scénario intermédiaire des analyses SIG détaillées.

En synthèse, la Brague à Biot et Antibes en Octobre 2015 a généré une production notable mais pas extrême de bois flottant. C'est sensiblement 10% des volumes potentiels mobilisables qui ont atteint les zones à enjeux. Ceci correspondait à seulement 1/3 des volumes réellement mobilisés, les 2/3 restant ayant été arrachés puis redéposés par le cours d'eau avant d'atteindre la basse vallée.

1.3 Dimensions et densité des éléments de bois flottant

Au delà d'un volume potentiel de fourniture en bois flottant, il est crucial de caractériser la dimension des pièces transportées jusqu'aux zones à enjeux. C'est en effet ce paramètre qui pilote en premier lieu la mobilité et la probabilité d'embâchement des verrous situés sur le cours d'eau.

1.3.1 Corrélation entre diamètre et hauteur des arbres d'après les données IFN

Les hauteurs sur pied h_{tot} et diamètres D (calculés par la formule $D = circonférence/\pi$) de près de 605 000 feuillus et 222 000 conifères ont été utilisés pour caractériser les corrélations entre les deux variables (Figure 1.11A). Un ajustement linéaire a été estimé en pondérant chaque arbre avec sa fréquence d'apparition par hectare avec le résultat suivant :

$$D = 0.012 \cdot h_{tot} \quad \text{pour les feuillus} \quad (1.5a)$$

$$D = 0.015 \cdot h_{tot} \quad \text{pour les conifères} \quad (1.5b)$$

L'analyse des résidus de ces ajustements, c'est à dire du ratio entre le diamètre mesuré et l'estimation issue de l'Eq. (1.5), montre que 90% des arbres ont un diamètre mesuré compris entre 0.5 et 2 fois le diamètre estimé (Figure 1.11B). L'usage de données LIDAR permet de détecter les arbres automatiquement et d'estimer leur hauteur sur pied (voir §1.2.5 p. 26). Cet ajustement permet ainsi de qualifier la gamme de variation des diamètres des éléments présents sur la zone d'étude.

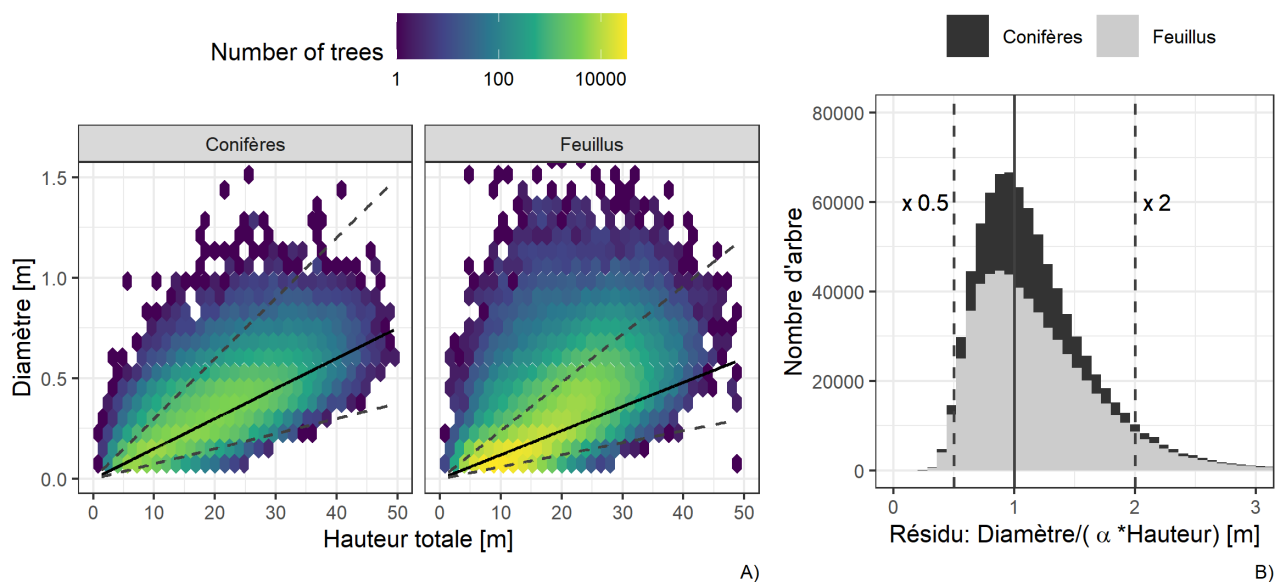


FIGURE 1.11: Lien hauteur - diamètre des arbres : A) corrélation entre hauteur des arbres sur pied h_{tot} et diamètre des troncs D (mesurés à 1.3 m de haut) et ajustement linéaire sur le nuage de points. Noter que l'échelle de couleur est logarithmique : les pixels clairs comptent donc 100-1000 fois plus d'arbres que les pixels foncés ; B) distribution des résidus de l'ajustement linéaire : 90% des arbres ont un diamètre compris entre 0.5 et 2 fois l'estimation issue de l'Eq. (1.5) (Source des données : IGN – Inventaire forestier national français, Données brutes, Campagnes annuelles 2005 et suivantes, <https://inventaire-forestier.ign.fr/spip.php?rubrique159>, site consulté le 16/09/2020)

1.3.2 Variabilité des longueurs et diamètres du bois flottant

La longueur des flottants L_{BF} joue un rôle prépondérant sur la probabilité de formation d'un embâcle au droit d'un ouvrage, ou de blocage sur la totalité de la largeur du lit mineur lorsque le flottant présente une taille importante. RICKLI et al. (2018) fournissent des analyses de la variabilité statistique des longueurs et diamètres des flottants relevés suites aux crues de 2005 en Suisse (Figure 1.12). Ils relèvent qu'elles varient fortement selon les bassins versants, les événements et le type de rivière ou de torrent. La majorité des flottants ont une longueur inférieure à 10 m mais quelques pièces dépassent cette longueur. Ces dernières forment les *pièces maîtresses* qui sont souvent à la source de l'obstruction d'un ouvrage. Les flottants de plus petit gabarit viennent ensuite s'accumuler sur l'obstacle formé par ces grands éléments.

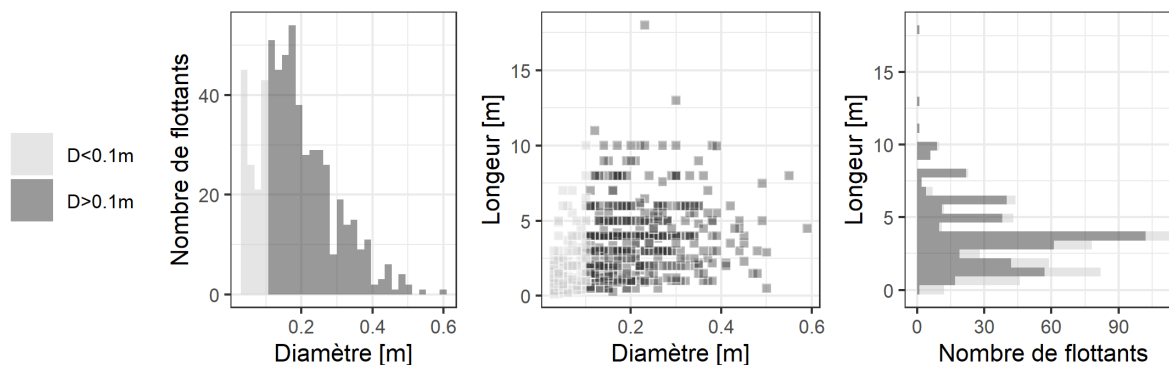


FIGURE 1.12: Distributions des diamètres et longueurs de 579 flottants mesurés par RICKLI et al. (2018) directement après les crues de 2005 dans des petits bassins versants de montagne en Suisse. Les pièces de moins de 0.1 m de diamètre, non considérées comme du gros bois flottant, sont représentées en plus clair.

Ces dimensions sont très inférieures à la hauteur totale des arbres poussant sur le bord des rivières (les arbres sur pieds relevés à la Figure 1.11a atteignent 50 m). En effet, durant la chute des arbres, ou plus tard pendant leur transport, les arbres et branches subissent chocs, frottements et attaques. Après des crues à fort transport solide, il est courant d'observer des troncs "pelés" par la crue, dont l'écorce et les branches ont disparu. Ce phénomène amène souvent à confondre du bois frais avec du bois mort : on imagine mal que les flottants acquièrent un aspect aussi endommagé en seulement quelques heures de crue intense, c'est pourtant le cas.

1.3.3 Le taux de réduction : longueur des flottants/hauteur sur pied

Les éléments de bois flottants sont plus courts que les arbres sur pied. La réduction de la longueur des bois flottants en comparaison de la hauteur des arbres sur pied est étudiée en détail dans le guide OFEV (2019, p. 53). En estimant les longueurs probables des arbres sur pied via le diamètre des flottants et des données forestières, les auteurs du guide ont reconstruit un échantillon de 579 valeurs de taux de réduction (Figure 1.13A). Ils constatent qu'en moyenne les flottants ont une longueur de l'ordre de 0.2 fois la hauteur des arbres sur pied OFEV (2019, p. 53) et que 75% des pièces sont réduites d'un facteur inférieur à 0.3 (Figure 1.13A). Si la longueur moyenne des flottants est un paramètre intéressant, c'est surtout la longueur des pièces maîtresses qu'il faut évaluer. L'analyse du quantile 90% des longueurs (la dimension dépassée par seulement 10% des pièces) montre que ces dernières ont en général subi un taux de réduction de l'ordre de 0.36-0.52. Sur deux cours d'eau, des valeurs de 0.66 et de 0.75 sont mesurées mais le nombre de flottants mesuré était faible (< 50 éléments). La distribution des tailles des flottants observés après une crue telle qu'illustrée par la Figure 1.12 est donc le fruit (i) de la distribution de la taille des arbres qui bordent ce cours d'eau et qui ont été recrutés par l'écoulement et (ii) de la variabilité dans le taux de réduction de leur taille. Ce processus naturel aléatoire peut être modélisé et utilisé pour prédire sur un site donné les longueurs des flottants.

A l'aide des longueurs d'arbres détectées sur les données LiDAR de la ripisylve du Gave-de-Pau en amont de Lourdes (Hautes-Pyrénées) dont on présente un extrait dans la Figure 1.9, il est possible de proposer une approche

probabiliste d'estimation de la longueur et du diamètre des flottants. La distribution des hauteurs des 17 356 arbres sur pied détectés sur une bande de 83.2 ha longeant le cours d'eau est fournie dans la Figure 1.13B. On constate que la hauteur médiane est de l'ordre de 20 m mais que certains arbres atteignent 30 m de haut, quelques rares éléments dépassant les 40 m.

En tirant aléatoirement 10 000 valeurs dans cette distribution et en les multipliant par des valeurs de taux de réduction tirées, elles aussi aléatoirement, dans la Figure 1.13A, on peut estimer une distribution théorique de longueur de flottants (traits tiret-pointillé dans la Figure 1.13B). On constate que les valeurs varient dans la gamme 0-22 m et que 95% des pièces sont généralement plus courtes que 10 m (99% plus courtes que 13 m). Ce genre d'approche peut être utile au calage d'un modèle numérique par exemple ou à la conception d'un piège à flottants. Les quelques pièces maîtresses dépassant ces longueurs jouant un rôle majeur dans l'obstruction des verrous hydrauliques et cette méthode n'étant pas parfaitement précise, il semble prudent de réaliser une étude de sensibilité sur le paramètre de longueur maximale, par exemple en testant des valeurs de 15 m, 22 m et 27 m.

Le même exercice a été réalisé sur la prédiction des diamètres des flottants en utilisant les hauteurs des arbres détectés, l'Eq. (1.5a) qui relie la hauteur des arbres sur pied à leur diamètre et les résidus de la Figure 1.11B qui permettent de prendre en compte la variabilité aléatoire réelle autour de la tendance saisie par l'Eq. (1.5a). Les résultats sont fournis dans la Figure 1.13C. On constate que le diamètre prédit varie dans la gamme 0-1.5 m avec 95% des diamètres $D < 0.6$ m et 99% des diamètres $D < 0.8$ m. Ces données peuvent, elles aussi, être utilisées pour alimenter des modèles numériques.

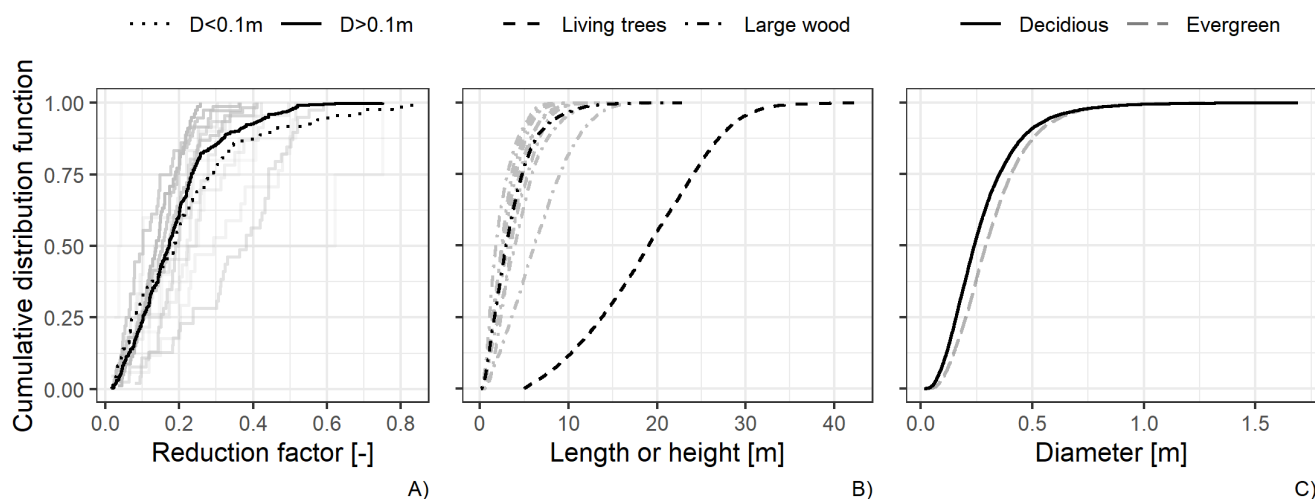


FIGURE 1.13: A) Distributions des taux de réduction estimés par RICKLI et al. (2018) sur des pièces mesurées dans de petits bassins versants de montagnes en Suisse après les crues de 2005 (ensemble de l'échantillon en noir et chaque bassin versant en gris); B) Distribution des hauteurs sur pied des arbres détectés le long du Gave-de-Pau en amont de Lourdes (Hautes-Pyrénées) et longueurs des flottants estimées via tirage aléatoire de longueur d'arbre multipliée par le taux de réduction du panneau A (ensemble de l'échantillon en noir et chaque bassin versant en gris); C) Diamètres des flottants prédits via tirage aléatoire de longueur d'arbre, de l'Eq. (1.5a) et des résidus de la Figure 1.11B.

Cette approche a été comparée avec les seules mesures disponibles à notre connaissance pour un cas d'étude issu du territoire français : celles compilées lors du retour d'expérience réalisé suite à la tempête Alex (2-3 Oct. 2020, Alpes-Maritimes). Cet épisode torrentiel a touché très violemment les vallées de la Vésubie et de la Roya générant des changements morphologiques extraordinaires, l'érosion de près de 300 hectares de ripisylves et le transport de plusieurs dizaines de milliers de m^3 de bois flottant (ONF-RTM et al., 2022a,b). Des photos interprétées ont permis de localiser et de mesurer près de 25 000 éléments de bois flottants sur la Vésubie et de 17 000 éléments sur la Roya. L'application de l'approche par tirage aléatoire du taux de casse dans les données de RICKLI

et al. (2018) fournissait une estimation assez fidèle des valeurs observées sur la Roya (cours d'eau étroit, nombreuses gorges, lit pavé de gros blocs). Le quantile 95% $L_{BF,95\%}$ a par exemple été prédit à 6.5 m et mesuré à 5.2 m. Sur la Vésubie (cours d'eau plus large, faciès de tresses, lit alluvionnaire), les valeurs observées étaient sensiblement 50% plus longues que les valeurs prédites, le quantile 95% $L_{BF,95\%}$ a par exemple été prédit à 7.8 m et mesuré à 11.8 m. La largeur plus importante des chenaux et la moindre présence de gros blocs sont vraisemblablement les facteurs explicatifs de cette différence. L'ordre de grandeur reste tout de même correct.

1.3.4 Forme des flottants : avec ou sans branches et racines

Le processus de casse durant la chute initiale ou pendant le transport est donc très significatif. Les branches sont les plus fragiles, les racines étant par ailleurs aussi régulièrement séparées du tronc. La majorité des flottants a donc une forme relativement simple souvent approximée par un cylindre. Les mesures menées par RICKLI et al. (2018) dans des bassins versants de torrents montrent déjà le taux très significatif de pièces cylindriques (simples troncs ou branche isolée), malgré des distances de transport nécessairement courtes en lien avec la taille des bassins versants étudiés (Tableau 1.4). La violence des écoulements en torrent et la présence de nombreux obstacles contribuent significativement à ce fort taux de casse. Il reste toutefois toujours possible que quelques arbres, parfois entiers, soient recrutés à courte distance d'un ouvrage et qu'ils l'atteignent avec un houppier et/ou des racines en bon état.

TABLE 1.4: Forme des flottants mesurés par RICKLI et al. (2018) dans des petits bassins versants de montagne (superficie < 3 km²) suite aux crues de 2005 en Suisse

Forme	Arbre entier	Tronc et racines	Racines seules	Tronc	Houppier	Total
Nombre	425	1353	484	4226	240	6728
%	6	20	7	63	4	100

1.3.5 Masse volumique des éléments de bois flottants

La densité ou masse volumique des éléments de bois flottant varie beaucoup, typiquement entre 500 et 1000 kg/m³ (RUIZ-VILLANUEVA et al., 2016b). On retrouve cet ordre de grandeur de variation dans d'autres sources.

Les mesures de RUIZ-VILLANUEVA et al. (2016a) sur l'Ain et le Rhône montrent que les masses volumiques des essences mesurées, typiques des boisements de berges en France métropolitaine, varient dans la gamme 800±170 kg/m³ pour le bois vert et dans la gamme 660±200 kg/m³ pour le bois mort récupéré dans la retenue de Génissiat. Ces valeurs augmentent avec le temps passé immergé dans l'eau mais le processus de saturation se déroule à l'échelle de dizaines de jours. Certaines essences dépassent une densité de 1 quand elle sont saturées, expliquant la présence de bois au fond de l'eau. Ce dernier est alors transporté par les courants de fond.

Les différents éléments de bois flottant ayant généralement passé des durées variables dans l'eau en fonction de leur point d'origine, il faut considérer ce paramètre comme incertain et tester la sensibilité des méthodes qui font appel à ce dernier.

Chapitre 2

Effets environnementaux du bois flottant

Pascale RIBO¹, Margaux QUINIOU¹, Swann BENAKSAS², Guillaume PITON²

¹ ISL Ingénierie, 15 rue du Maréchal Harispe, 64500 Saint-Jean-de-Luz - FRANCE.

² Univ. Grenoble Alpes, INRAE, UR ETNA, 2 rue de la Papéterie, 38402 St-Martin-d'Hères - FRANCE.

La littérature scientifique et technique sur les effets du bois flottant sur les milieux aquatiques et rivulaires est très large (WOHL et al., 2019). Cette section n'est pas une synthèse exhaustive de cette littérature. Elle a plutôt pour vocation de rappeler les conclusions clés utiles aux agents des milieux opérationnels. Comme le rappelle l'excellent livre de Stéphane DURAND (2018), "*20000 ans : ou la grande histoire de la nature*", les êtres vivants qui peuplent les cours d'eau et leurs corridors boisés ont évolué pendant des millions d'années dans des milieux généralement très chargés en bois mort. La disparition de ce dernier associée à l'action de l'Homme n'est vieille que de quelques siècles, ce qui est très court à l'échelle de l'évolution. L'état optimal des milieux aquatiques et rivulaires, d'un point de vue écologique, est donc encore normalement celui où le bois mort est présent en quantité.

La Directive Cadre Européenne (Directive 2000/60/CE du 23 octobre 2000) s'attache à caractériser les masses d'eau superficielles et définit dans son annexe II les caractéristiques des masses d'eau de surface selon deux systèmes :

- Système A, basé sur les Ecorégions reprenant les caractéristiques d'altitude, de surface de zone de captage et de géologie ;
- Système B, basé sur les facteurs physiques et chimiques qui déterminent les caractéristiques de la rivière, et donc la structure et la composition de la population biologique.

Les caractéristiques physiques et physico-chimiques soutiennent la biologie des milieux aquatiques. Le bon état des eaux superficielles défini par la Directive Cadre sur l'Eau est atteint lorsque la masse d'eau présente un bon état chimique et écologique. L'état écologique correspond à la qualité de la structure et du fonctionnement des écosystèmes aquatiques et prend en considération les éléments suivants (ARGILIER et al., 2016) :

- Éléments biologiques : la flore aquatique, la faune benthique invertébrée, l'ichtyofaune ;
- Éléments de physico-chimie généraux : température, bilan en oxygène, salinité, état d'acidification, concentration en nutriments. Selon la DCE, les éléments physico-chimiques généraux interviennent essentiellement comme facteurs explicatifs des conditions biologiques.

Ces indicateurs sont réalisés à une échelle stationnelle et nécessitent pour leur analyse de prendre en considération la typologie des cours d'eau et les caractéristiques du bassin versant (surface, altitude, domaine piscicole, géologie, etc.), d'où l'importance de prendre en compte à la fois la physico-chimie de référence mais également les Ecorégions comme référentiels.

D'autres éléments sont également à prendre en compte mais les indicateurs ne sont à l'heure actuelle pas disponibles :

- Le régime hydrologique : quantité et dynamique du débit d'eau ; la connexion aux masses d'eau souterraines,
- La continuité de la rivière,
- Les conditions morphologiques : variation de la profondeur et de la largeur de la rivière, structure et substrat du lit, structure des berges.

A ce jour, l'analyse du bon état des masses d'eau superficielles s'appuie sur les caractéristiques des peuplements biologiques et sur la qualité physico-chimique de l'eau. La mise en œuvre de la DCE a donc mis l'accent sur l'amélioration de l'état écologique des eaux de surface et sur la préservation des services écosystémiques qu'ils rendent.

Une rivière fonctionnelle peut être considérée comme un écosystème résilient aux événements extrêmes et aux perturbations qui en découlent (crues notamment), et qui est apte à maintenir les structures physiques (abondance et diversité des habitats), la qualité de l'eau, ainsi que les communautés aquatiques tant dans leur diversité, leur biomasse et leur fonctionnalité (WOHL et al., 2019).

Dans ce cadre, l'étude des bois flottants est tout à fait pertinente puisque ces éléments naturels vont jouer sur les trois composantes principales qui définissent l'écosystème rivière :

- Le compartiment physique et sa dynamique,
- Le compartiment physico-chimique et les cycles associés,
- Le compartiment biologique.

Ces différents compartiments sont étroitement liés et en interaction permanente les uns avec les autres.

L'effet des bois flottants sur l'environnement est étudié depuis les années 1970 sur les rivières Nord américaines, en Europe et en Australie. De nombreuses études ont permis d'alimenter la connaissance de cette composante sur l'écosystème rivière. Les effets bénéfiques étant nombreux, l'utilisation des bois flottants comme élément de restauration et de renaturation des rivières a été encouragée comme élément d'amélioration de la biodiversité et d'amélioration hydromorphologique.

Le bois flottant est une composante fonctionnelle des hydro-systèmes au même titre que l'eau et les sédiments qui y transitent (WOHL et al., 2019 ; GURNELL, 2013 ; DE CICCIO et al., 2018). Ces structures participent notamment aux différents processus hydromorphologiques, physico-chimiques et au soutien des communautés biologiques aquatiques.

2.1 Effets sur la morphodynamique

L'impact des bois flottants sur la morphologie et la dynamique des cours d'eau et *in fine* sur la composition des habitats aquatiques a été largement étudié ces dernières années (voir notamment GURNELL et al., 2002 ; ABBE et MONTGOMERY, 2003 ; LE LAY et MOULIN, 2007 ; LOVETT et PRICE, 2007 ; LE LAY et al., 2013 ; PILOTTO et al., 2014 ; DE CICCIO et al., 2018 ; GURNELL, 2013 ; GURNELL et al., 2019 ; HARVEY et al., 2018 ; WOHL et al., 2019) ; ainsi que les résumés de la 3ème conférence Internationale *Wood in World Rivers* de 2015 (PICCO et al., 2015).

Il ressort des différentes publications que les effets sur le compartiment physique sont étroitement liés à la typologie des cours d'eau (rivière en tresse, rivière à méandres, rivière sinueuse, rivière rectiligne), à la taille du cours d'eau (ordre du cours d'eau), à la puissance du cours d'eau (débit et pente) et à la longueur des bois en présence.

La Figure 2.1 rend compte de l'influence relative des différentes composantes (caractéristiques hydrologiques, caractéristiques des bois, caractéristiques géomorphologiques) sur la rétention *naturelle* des bois dans le corridor

fluvial. Dans ce modèle conceptuel, les petites rivières sont définies comme ayant une largeur inférieure à 4 m, les rivières moyennes peuvent être définies comme ayant une largeur comprise entre 4 et 15 m et les grandes rivières présentent des largeurs supérieures à 15 m. Sur les petites rivières, la rétention du bois va être principalement influencée par le paramètre de la taille des bois par rapport à la largeur de la rivière, le style fluvial n’aura pas d’incidence. A contrario sur les rivières larges, le paramètre taille du bois sur la largeur de la rivière n’intervient plus comme paramètre influençant la rétention du bois alors que le style fluvial devient un paramètre déterminant.

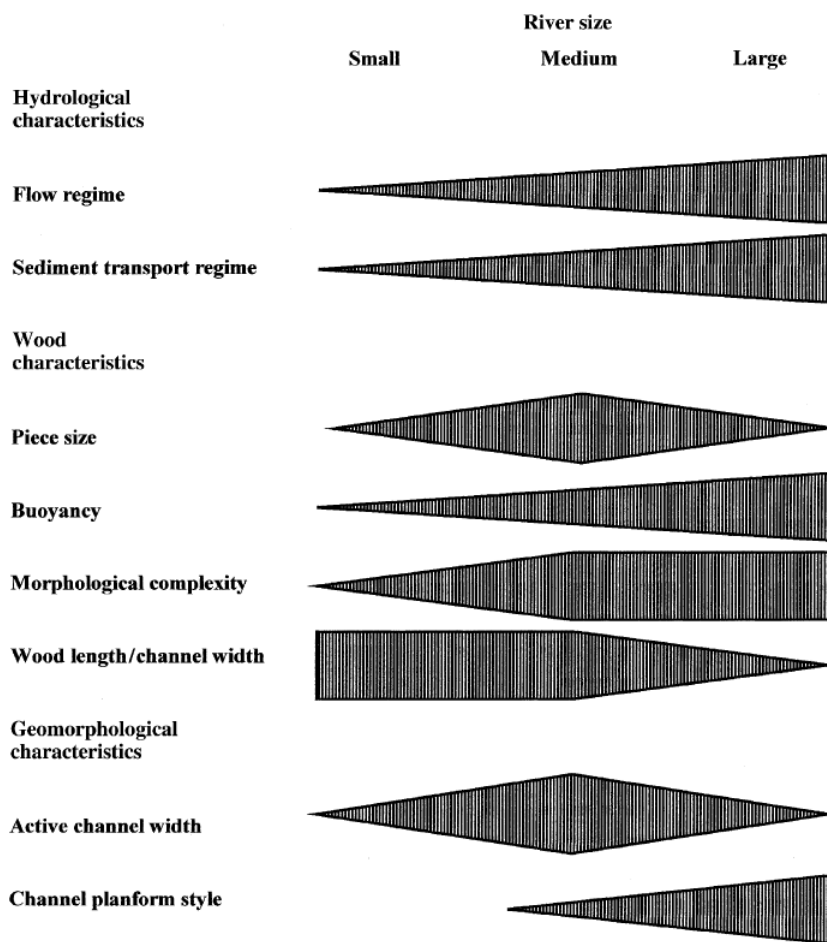


FIGURE 2.1: Importance relative du bois, des caractéristiques hydrologiques et géomorphologiques influençant la rétention des bois en fonction de la largeur des cours d’eau (GURNELL et al., 2002)

Les petites rivières, définies par leur largeur inférieure à 4 m, seront plus sensibles à une accumulation de bois parce que la plupart des essences sont assez longues pour bloquer le lit sur toute sa largeur du lit (GURNELL et al., 2019). Le bois flottant y est par contre peu mobile : les gros éléments étant généralement plus long que le chenal n’est large. L’effet du bois flottant est donc plutôt local. La Figure 2.2 représente les relations entre la taille des rivières et la présence d’accumulations de bois. Pour les cours d’eau plus larges où la longueur des bois flottants est très inférieure à la largeur du cours d’eau (et ne peut ainsi plus le barrer), les accumulations seront plus généralement localisées en bordure ou en amont des îles en fonction du style fluvial (Figures 2.4). Le bois flottant entrant dans ces systèmes est mobile à très mobile et les infrastructures qui les équipent sont généralement mieux adaptées parce que le gabarit du cours d’eau et les débits qui y transitent nécessitent de grandes sections. C’est donc plutôt dans les cours d’eau de largeur intermédiaire (4 – 15 m) que le bois flottant est partiellement

mobile et peut néanmoins barrer l'ensemble du lit.

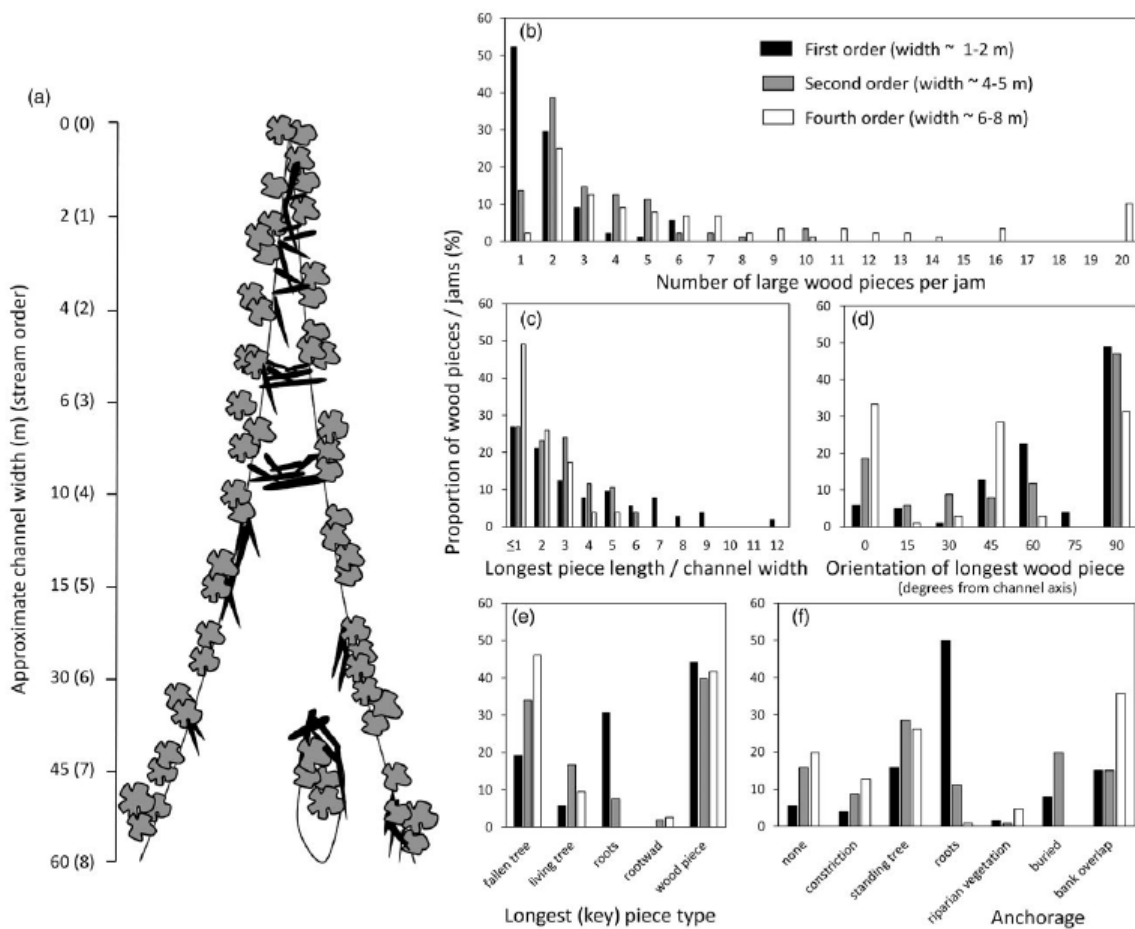


Fig. 3. Large wood and river size. (a) Schematic changing spatial distribution of in-channel large wood with increasing river size (note that the values for channel width and order are only indicative, after Sedell *et al.*, 1988). The proportions (%) of wood jams and their key pieces in First, Second and Fourth Order reaches of the Highland Water, New Forest, England displaying different (b) numbers of large wood pieces (>1 m long, >0.1 m wide), (c) ratios of longest wood piece length to channel width, (d) orientation of longest wood piece, (e) types of key piece and (f) anchorage mechanisms.

FIGURE 2.2: Relations entre typologie de dépôt, dimension des bois flottants et taille des rivières (GURNELL *et al.*, 2019)

Les bois flottants ont une influence sur l'hydraulique de la rivière, la répartition spatiale et temporelle des sédiments, la géométrie du lit avec notamment des interactions réciproques en fonction du style fluvial, une modification des connexions du lit avec ses annexes hydrauliques et sa plaine alluviale, une modification des habitats aquatiques et des habitats en plaine alluviale (ABBE et MONTGOMERY, 2003).

La présence de bois flottant sous forme d'accumulation en lit mineur ou en lit majeur peut avoir des effets bénéfiques en cas de crue. Ils provoquent une augmentation de la résistance hydraulique (rugosité du lit ou de la plaine alluviale), favorisant les échanges du lit mineur vers les annexes hydrauliques (zones d'expansion des crues). En ralentissant les écoulements dans la plaine d'inondation, ils contribuent à la diminution des pics de crues (ralentissement dynamique). Les analyses de MASON ET AL. (1990) d'une opération de recalibrage et de retrait du bois flottant ont par exemple mesuré une réduction significative de la durée des pics de crue, associée à une augmentation des débits de pointes des événements sur la rivière Chicod Creek, après avoir retiré le bois flot-

tant et augmenté la capacité hydraulique du chenal. Le guide Australien très complet de LOVETT et PRICE (2007, Chap. 5) fournit des exemples et montre que la présence de bois flottants dans les chenaux réduit de 10% à 50% le coefficient de Strickler équivalent du chenal (on néglige ici l'effet sur la morphologie du cours d'eau). Le même guide fournit aussi des éléments sur les effets hydrauliques de la végétation rivulaire, sur la rugosité des chenaux et sur l'écrêtement dynamique.

La gestion des bois flottants, mais aussi plus largement de la ripisylve dans le cadre de plans de gestion de cours d'eau, doit prendre en compte ces différents enjeux de manière localisée et globale à l'échelle du bassin versant afin de ne pas intervenir de manière systématique et généralisée, mais de manière ponctuelle et orientée par les enjeux présents à l'amont et à l'aval. En effet, la suppression systématique du bois flottant a des effets négatifs durables sur les écosystèmes, conduisant à une banalisation des habitats physiques du cours d'eau (WOHL et al., 2019). Elle a par ailleurs un coût significatif pour une efficacité dans la réduction du risque qui est en fait assez limitée (COMITI et al., 2016).

Les effets des bois flottants sur la morphologie du lit des petites et moyennes rivières sont plus marqués que sur les rivières larges. En effet, la présence d'accumulations de bois sur ces cours d'eau devient un élément structurant la morphologie du lit (Figure 2.3).

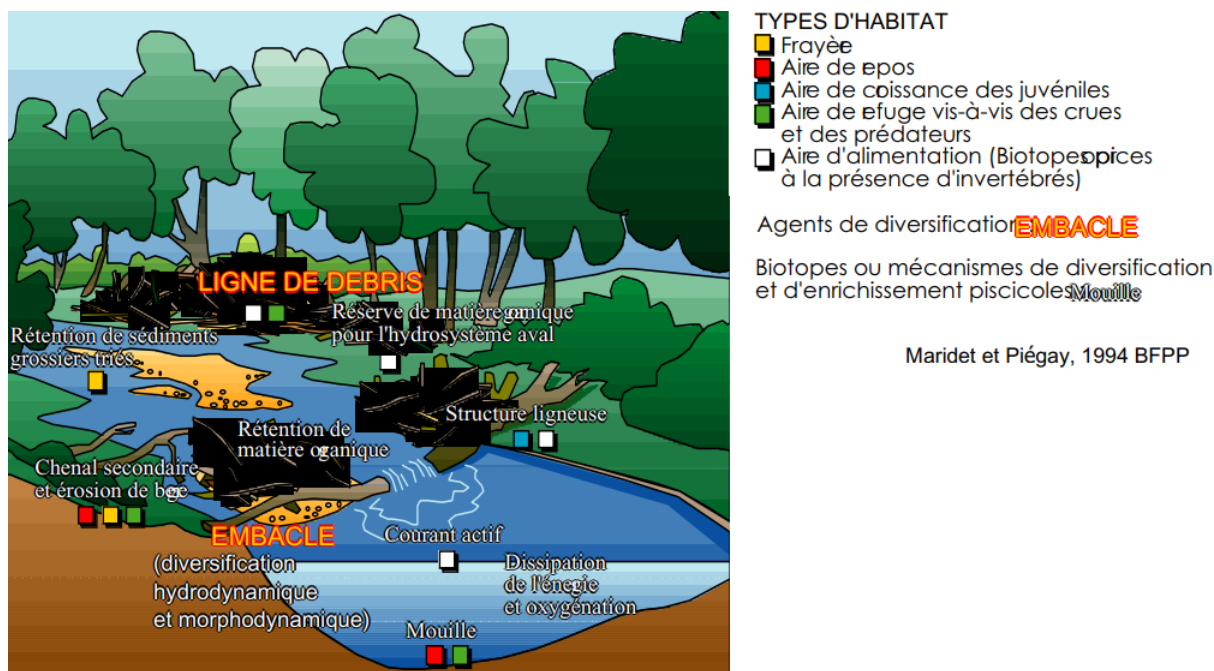


FIGURE 2.3: Typologie d'habitats en lien avec les bois flottants (adapté de PIÉGAY et MARIDET, 1994)

Les principaux effets de ces accumulations sur les petites rivières sont (WOHL et al., 2019) :

- Une modification hydraulique localisée entraînant des adaptations morphologiques de la rivière. Le profil en long de la rivière est modifié. Sur les têtes de bassin, un profil en escalier se dessine. Les profils en travers sont aussi modifiés par la variation des conditions d'écoulement et la redistribution spatiale des sédiments. Dans le cas de bois flottants en travers du lit mineur, une fosse de dissipation ou mouille peut se créer à l'aval, dans laquelle les hauteurs d'eau seront augmentées et les vitesses d'écoulement diminuées. Ce type d'habitat constitue des zones de repos aux populations piscicoles et peuvent être des zones refuges en cas de crue ou d'étiage marqué. La chute créée peut aussi contribuer à la re-oxygénation du cours d'eau ;
- La modification de la répartition spatiale des sédiments se caractérise par une augmentation de l'hétérogénéité des sédiments (phénomène de patchs sédimentaires), et un stockage des sédiments fins et grossiers

accru à l'échelle de la rivière, ce qui augmente le temps de séjour des sédiments dans les cours d'eau. L'augmentation de l'hétérogénéité sédimentaire augmente la diversité des habitats favorables à la macrofaune d'invertébrés benthiques et aux populations piscicoles et notamment des zones de fraie préférentielles pour les salmonidés;

- La création de chenaux secondaires et d'érosion de berges est propice au développement d'habitats de fraie, d'aires de repos et de refuge pour la faune piscicole et permet un accroissement des connexions entre le lit et la plaine inondable.

Ainsi, l'accumulation de bois flottant contribue à la formation de l'alternance des faciès d'écoulement et à la diversification des habitats favorables à la faune aquatique sur ces cours d'eau.

Sur les rivières moyennes à larges (largeur supérieure à 4 à 15 m), les accumulations de bois se répartissent principalement en berge et en amont des îles, la longueur des bois n'étant pas suffisante pour constituer un blocage sur la largeur totale du lit (Figure 2.4). Sur ces cours d'eau, le style fluvial influence la répartition spatiale des bois flottants et, en rétroaction, la présence des bois influence la dynamique de ces styles fluviaux.

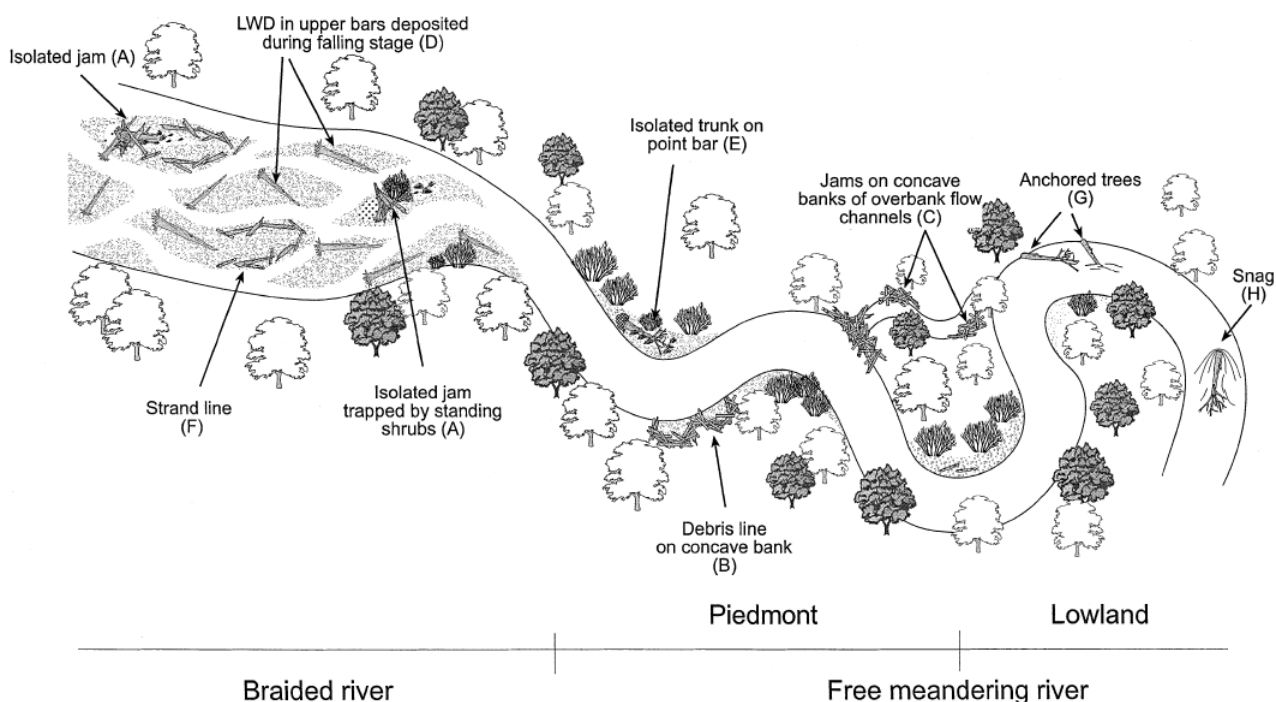


FIGURE 2.4: Typologie d'accumulation des bois observée sur les rivières larges en fonction du style fluvial (GURNELL et al., 2002)

Sur les rivières en tresse, l'accumulation de bois à l'apex des îles permet la fixation de celles-ci en favorisant la sédimentation et la colonisation des espèces végétales pionnières. Lors des crues, ces différentes structures vont permettre la diversification des chenaux d'écoulements.

Sur les rivières à méandres, la localisation en berge va, là aussi, avoir un effet sur la dynamique du cours d'eau, en favorisant soit l'érosion des berges, soit la création de points durs non érodables fixant la berge localement. Cela peut également engendrer le sous-cavement des berges en extrados de méandres végétalisés, avec une mise à nu du tissu racinaire, bénéfique pour la faune aquatique. Sans que l'érosion ne soit totalement empêchée, l'effet de retard par la végétation rivulaire est alors favorable à une diversité d'habitats. Ces différentes singularités contribuent à la migration longitudinale des méandres, mais aussi à l'élargissement de la plaine alluviale par déplacement latéral.

L'érosion latérale permet au cours d'eau de collecter des bois supplémentaires en berge. De plus, elle participe à dynamiser les structures végétales en les renouvelant régulièrement et favorise ainsi la présence de l'ensemble des strates (végétation herbacée pionnière, arbustive, arborée). La dynamique latérale de la rivière et la distribution spatiale des zones arborées sont d'ailleurs deux éléments clés de la définition des Espaces de Bon Fonctionnement AE-RMC (EBF, voir 2016). Cette démarche se traduit par la définition concertée d'un espace où la mobilité du cours d'eau est acceptée et les principes d'intervention sont adaptés pour permettre le maintien d'une mobilité latérale des cours d'eau permettant son bon état écologique.

Localement, aux abords de ces accumulations, les mêmes effets sont rencontrés que sur les petits cours d'eau : modification de l'hydraulique locale, forte hétérogénéité sédimentaire, diversification des habitats et notamment des habitats préférentiels pour les populations piscicoles (zone de repos, de croissance, d'alimentation et de fraie) et pour les macroinvertébrés (Figure 2.5).

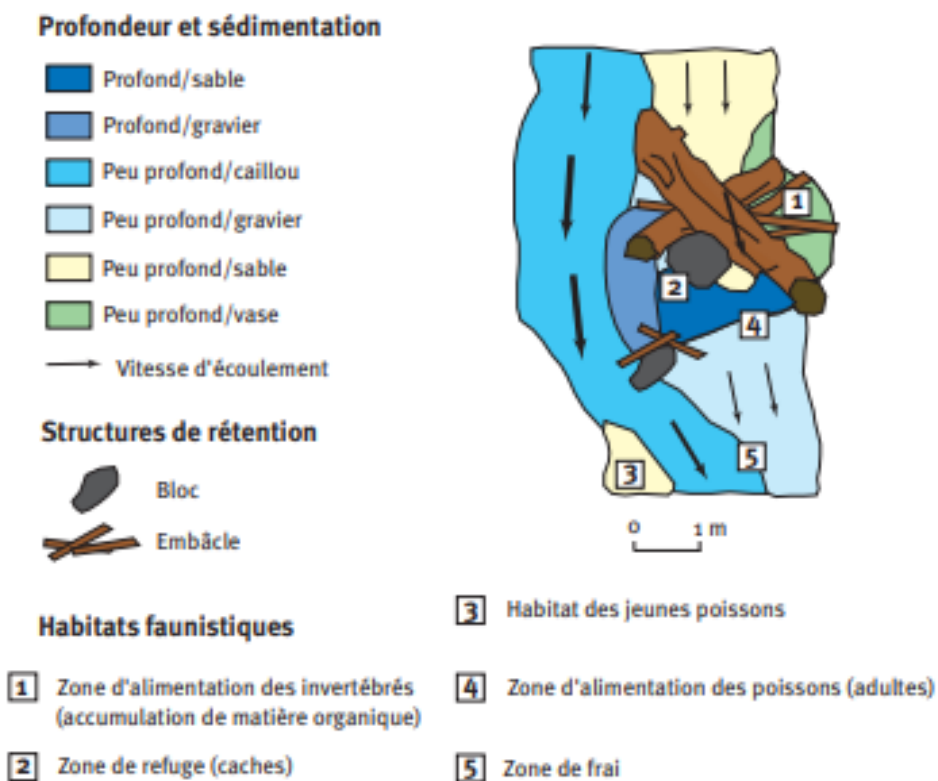


FIGURE 2.5: Le bois facteur de diversification physique de la rivière (LE LAY et MOULIN, 2007)

En lit majeur, ces bois flottants sont source d'habitat refuge pour les organismes aquatiques en périodes de crue, mais aussi d'habitats terrestres (insectes, amphibiens, reptiles, mammifères, oiseaux) en période de basses eaux.

2.2 Effets sur l'écologie et la biologie

2.2.1 Effets sur la qualité des eaux

Les accumulations de bois flottants peuvent avoir des effets sur les échanges entre les eaux superficielles et les eaux souterraines de manière directe et indirecte. La présence d'accumulation de bois flottant sur la totalité de la largeur du lit peut localement directement modifier ces échanges par un changement des gradients de pressions

entre l'amont et l'aval de cette accumulation. Les effets indirects peuvent venir de la diversification de la morphologie du lit et de son substrat pouvant, eux aussi, augmenter les gradients de pressions et favoriser les échanges. L'augmentation de ces échanges sur les rivières à salmonidés améliore les chances de survie des embryons sur les frayères. Ces échanges permettent aussi une certaine variabilité de température favorable à une diversification des habitats bénéfiques pour les macroinvertébrés et la faune piscicole. Toutefois, en cas de remous trop important, un risque de colmatage des substrats apparaît, ou de dégradation des frayères et des habitats pour les espèces enfouies dans le substrat, comme certaines moules d'eaux douces par exemple, à forte valeur patrimoniale (mulette épaisse, moule perlière par exemple ...).

2.2.2 Effets sur les cycles des nutriments

Le bois est une source de carbone pour les organismes aquatiques. Sa dégradation plus lente en milieux aquatiques qu'en milieux terrestres peut présenter un intérêt comme source de stockage du carbone organique.

SUTFIN et al. (2015) ont étudié le stockage du carbone organique sur les ruisseaux des Montagnes Rocheuses du Colorado en fonction du style fluvial. La majorité du carbone organique est stockée dans la plaine alluviale. Les rivières en tresses qui présentent des interactions importantes entre le lit et la plaine alluviale stockent quatre fois plus de carbone organique que les rivières de tête de bassin présentant une plaine alluviale réduite (Figure 2.6).

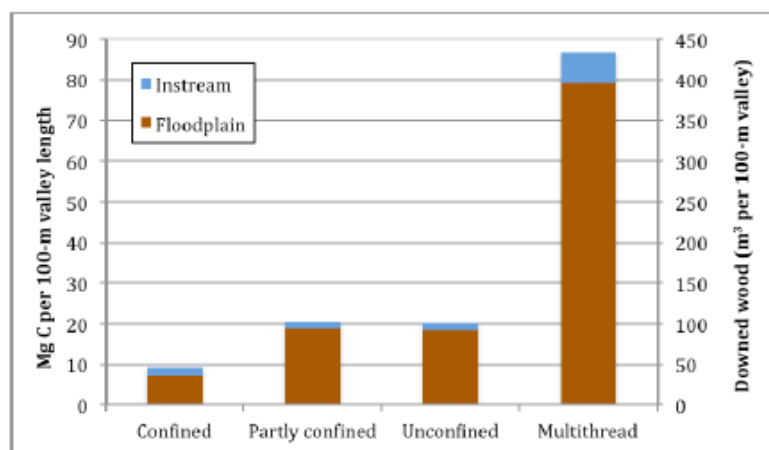


Figure 1. Mean organic carbon storage as floodplain and instream wood at 11 paired study sites in confined, partly confined, and unconfined valley segments with single thread streams and multithread channels. Multithread channels occur only where old-growth forests are present and store much more organic carbon per valley length compared to single thread channels in more confined valley segments.

FIGURE 2.6: Stockage des sédiments et du carbone organique dans les ruisseaux de montagne Colorado Montagnes Rocheuses USA (SUTFIN et al., 2015)

L'amélioration des connexions entre le cours d'eau et la plaine alluviale favorise les échanges de nutriments et de matières organiques nécessaires à l'alimentation des organismes aquatiques et terrestres mais aussi à la fertilisation des sols par une décomposition lente des bois.

La dégradation du bois en milieu aquatique fait intervenir une succession d'organismes (LE LAY et al., 2013). Un des premiers mécanismes de cette dégradation est lié à l'activité microbienne. Il apparaît que celle-ci est plus présente sur les bois que sur le substrat minéral. En rivière, l'action des champignons lignicoles sur la décomposition des bois flottants est importante, mais seul un groupe de champignons possède les enzymes nécessaires à la dégradation de la cellulose et de la lignine. Les insectes xylophages contribuent eux aussi à la dégradation du bois par fractionnement et digestion de celui-ci. Ces organismes permettent de créer des cavités dépourvues de lignine, de ramollir le bois et de le préparer à son fractionnement, le rendant ainsi disponible aux autres groupes.

2.2.3 Effets sur les communautés aquatiques

PILOTTO et al. (2014) ont étudié l'effet de l'introduction de bois flottants en rivière de plaine à fond sableux sur les populations de macroinvertébrés. L'introduction des bois a conduit à une réduction de la vitesse moyenne d'écoulement autour des bois de 32 % par rapport aux sites témoins. La taille médiane des sédiments a été augmentée de 50 %. La teneur en matière organique dans le lit de la rivière était 287 % plus élevée sur les sites ayant fait l'objet d'une réintroduction de bois flottant. Concernant les habitats, aux abords des bois flottants, trois typologies de placettes se sont développées : la création de mouilles, la création d'atterrissements gravelo-sableux et des zones d'accumulation de matière organique. Ces placettes ont été colonisées par des communautés de macroinvertébrés distinctes. Une augmentation de 110 % de la richesse taxonomique a été observée sur les placettes de graviers, ce qui représentait une augmentation de diversité 168 % plus élevée que les sites témoins. Les bois eux-mêmes n'ont contribué qu'à une petite fraction de cette augmentation (augmentation de 15 % de la richesse taxonomique et 21 % de la diversité). *La diversification des habitats autour des accumulations de bois est majoritairement à l'origine de l'augmentation de la richesse taxonomique et de la diversité observée.*

La présence de bois flottant permet de fournir non seulement un habitat préférentiel par sa présence et son interaction avec son environnement proche, mais il favorise aussi les cycles de dégradation des matières organiques et permet de fournir une réserve de nutriments aux organismes aquatiques.

THEVENET (1998) montre l'importance de ces bois pour le peuplement piscicole dans les grandes rivières, et que le nombre d'individus, la diversité d'espèces et les abondances spécifiques sont toujours supérieurs dans les habitats formés par les bois flottants par rapport à ceux qui en sont dépourvus. De plus, la complexité des structures semble avoir une influence sur la fréquentation par la population piscicole (Figure 2.7).

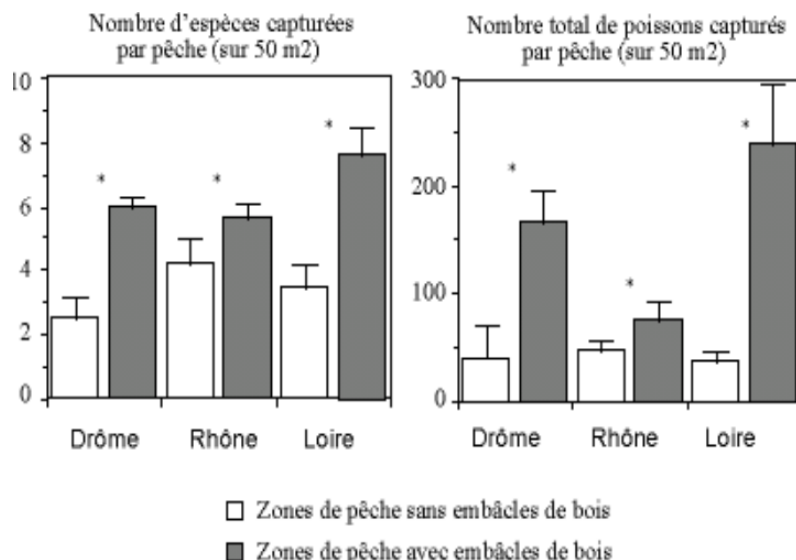


FIGURE 2.7: Influence des bois flottants sur l'abondance et la diversité piscicole (THEVENET, 1998)

Les effets des bois flottants sur la composition des populations aquatiques ont fait l'objet d'études *in situ*, notamment dans le cadre de suivi d'opérations de restauration et de renaturation de cours d'eau. Une étude pilote de réintroduction de gros bois dans les rivières navigables a été réalisée aux Pays Bas (SCHOOR et al., 2015). Des arbres morts ont été introduits dans le Rhin navigable pour améliorer la biodiversité aquatique. Dès la première année, une recolonisation par les macro-invertébrés benthiques a été observée, et la population piscicole a pu bénéficier de la structure (Figure 2.8). Le peuplement piscicole initial était dominé par la présence d'une espèce de gobie exogène (*Neogobius melanostomus*). La réintroduction des arbres s'est accompagnée d'une recolonisation autour des arbres d'une population plus diversifiée et d'espèces indigènes. Les poissons utilisent ces arbres pour s'abriter (zone refuge), se nourrir et comme zone de frayère.

Dans un tout autre contexte, URABE et NAKANO (1998) ont étudié la contribution des bois flottants dans les

petits ruisseaux du Japon sur les populations de truites arc-en-ciel. La biomasse de truite a été positivement corrélée au volume des mouilles. La contribution des bois à la création de cet habitat favorable à la truite a aussi été positivement corrélée. La diversification géomorphologique est augmentée par la présence de bois mort, les mouilles sont par exemple plus profondes, plus fraîches et plus durables (notamment à l'étiage) et constituent des caches plus propices. Ces exemples ne sont que quelques extraits de la littérature très fournie sur le sujet. On souligne donc simplement que *l'effet globalement positif de la présence de bois mort en rivière fait consensus au sein de la communauté des spécialistes des milieux aquatiques*. Un impact négatif des embâcles est parfois pointé sur les espèces piscicoles : leur potentiel effet de blocage des accès aux frayères (rupture de continuité piscicole vers certaines annexes hydrauliques). Dans ce cas, les faciès propices aux poissons sont remplacés par des zones humides propices à d'autres communautés.

La réintroduction de bois mort dans les chenaux des cours d'eau comme mesure de restauration est ainsi de plus en plus fréquente. Des tests ont par exemple été menés avec succès sur l'Yzeron (69) ou dans le Jura Suisse (voir par exemple le webinaire de GUÉRIN, 2020 ; GUERNE, 2020, ainsi que d'autres retours d'expérience régulièrement relayés par le Réseaux Rivières TV : <https://www.youtube.com/channel/UC0naNM4iGMG7vLwV36REQw>). D'autres solutions de prise en compte des embâcles dans l'environnement de la rivière sont également possibles, comme par exemple, des chantiers de restauration en rivière, consistant à mettre en place des arbres morts cablés à leur base, et fixés en berge. Ces arbres sont orientés vers l'aval et ont une longueur inférieure à la largeur du lit mineur. Leur fixation évite ainsi les risques d'embâcles sur les zones à enjeux.

Ce sujet dépasse la portée du présent guide mais de nombreux éléments et conseils peuvent être trouvés notamment dans les guides de BROOKS et al. (2006, en anglais) et de ÖWAV (2021, en allemand).



Figure 2: a) Trees are placed in shallow zones along the river
 b) Trees weighted with concrete slabs are placed in erosion pits behind groynes, up to 9 meters deep.

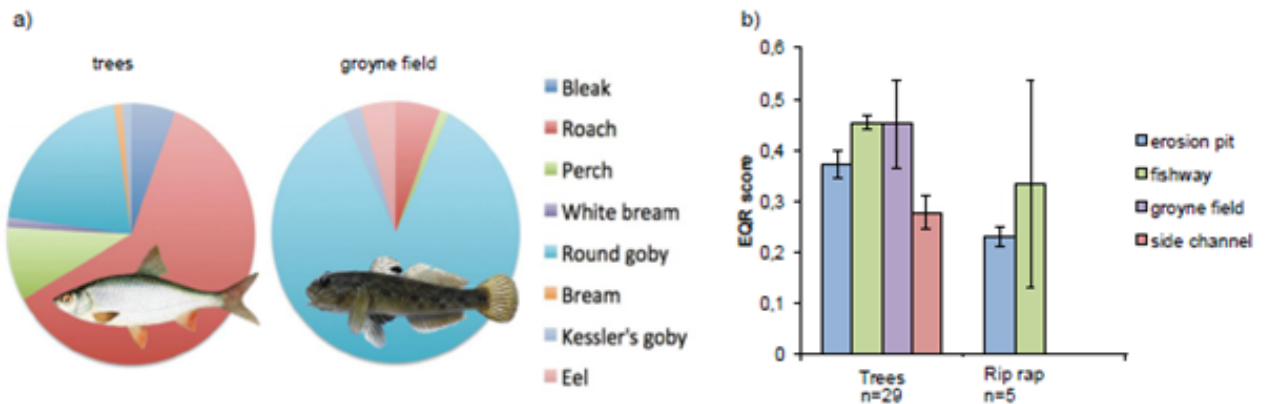


Figure 4: a) The fish community near the dead trees differs from the reference site in sandy groyne fields (relative densities electrofishing)
 b) EQR score of macro invertebrates compared in different locations on trees and rip rap. (EQR scores with 95% confidence intervals)

FIGURE 2.8: Réintroduction de gros bois dans les rivières navigables : une étude pilote pour stimuler la biodiversité dans les contraintes de sécurité. Photos du haut : illustration de la mise en oeuvre et du lestage des éléments réintroduits avec des blocs de béton. Figures du bas : a) espèces piscicoles inventoriées à proximités des éléments réintroduits (gauche) et sur la placette de référence (fonds sableux proches d'épis). b) Score EQR (Ecological Quality Ratios) pour les macro-invertebrés meilleurs à proximités des arbres que à proximités d'énrochements (SCHOOR et al., 2015)

2.2.4 Effets sur les communautés terrestres

Dans la forêt alluviale et la ripisylve, le bois mort a aussi un rôle important à jouer : source de nutriments sur le long terme ou abri pour la faune, il a de nombreux effets bénéfiques pour l'écosystème (DURAND, 2018). On estime que plus de 25% des espèces forestières dépendraient du bois mort (CATEAU et al., 2015). Sa présence est d'ailleurs une des caractéristiques des forêts naturelles.

Le bois mort dans le corridor fluvial a la particularité d'être régulièrement immergé, mais bien que les crues puissent être néfastes pour les populations terrestres vivant en lit majeur (ADIS et JUNK, 2002), ces inondations régulières sont nécessaires pour le maintien de l'écosystème terrestre et aquatique de ces zones inondables (BOULTON et LLOYD, 1992). Afin d'évaluer l'intérêt écologique du bois mort dans le lit majeur, il est nécessaire de considérer l'ensemble du cycle d'inondations, composé de périodes sèches et immergées (JUNK, 1997). De ce point de vue, les inondations régulières du lit majeur sont sources de diversité. En effet, le bois mort en lit majeur est plus riche en nutriments (notamment en Azote et Phosphore) que son homologue hors de la zone inondable (POLIT et BROWN, 1996). Ensuite, les champignons dégradant la cellulose du bois sont stimulés par ces immersions (MOLLES et al., 1998), augmentant la disponibilité de la matière organique pour les invertébrés. De même que pour la décomposition du bois immergé, de nombreux organismes se succèdent pour dégrader et fractionner le bois, attirant ensuite les insectes, puis la macro-faune.

Le lit majeur étant régulièrement inondé, les espèces s'y développant se sont adaptées. La recolonisation du bois mort dans le lit majeur par les invertébrés à la suite d'une crue est très rapide (quelques semaines), ce qui indique un haut niveau de résilience et d'adaptations (BALLINGER et al., 2009). Cette résilience réduit donc les effets délétères des crues sur les populations terrestres.

Un des autres atouts principaux de ce bois est qu'il peut servir d'abri à de nombreuses espèces. Selon s'il est sur pied ou couché, selon son diamètre et sa hauteur ou son état de décomposition, le bois mort n'abritera pas la même faune (HARMON et al., 1986) : le bois vertical par exemple attirera principalement les oiseaux et chauve-souris, et constituera un milieu très particulier au fort intérêt écologique (voir le guide de BÜTLER et al. (2020) sur les dendromicrohabitats). Le bois à l'horizontal intéressera plus les mammifères et espèces à sang froid telles que les reptiles ou les amphibiens (MASER, 1984).

Il a été observé que le bois présentant de nombreuses cavités abritait plus d'espèces et de populations que le bois en étant dépourvu (HARMON et al., 1986; O'CONNOR, 1991), or les arbres morts sont plus propices à la création de cavités que ceux vivants (GUTZAT et DORMANN, 2018).

Le bois mort présent dans le lit du cours d'eau (immergé donc) peut aussi être bénéfique pour des espèces terrestres se nourrissant dans les cours d'eau. C'est le cas du Grand-Duc de Blakiston : il a été observé en Russie que le bois mort présent dans les cours d'eau permettait aux saumons de s'y abriter, et donc favorisait la présence de ce rapace, le saumon étant sa principale nourriture (SLAGHT et al., 2013).

Le bois mort en forêt alluviale ou dans la ripisylve accomplit donc diverses fonctions essentielles au sein de l'écosystème : de nombreuses espèces en dépendent à toutes les échelles. Il est d'ailleurs primordial de garder en tête que toutes les espèces vivant autour des rivières et dans les forêts ont évolué et se sont adaptées pendant des dizaines de milliers d'années à un milieu contenant du bois mort en grande quantité (DURAND, 2018). A l'échelle de leur évolution, ce n'est que très récemment que l'Homme a retiré en masse les arbres vieillissant ou mort pour se protéger, se chauffer ou bien construire. L'accumulation naturelle de ces débris de bois étant de plus un phénomène très lent, la conservation ou bien la réintroduction de bois mort permettent de maintenir des fonctionnalités vitales pour ces écosystèmes.



FIGURE 2.9: Restauration de la Bure River (UK), largeur initiale 8–10 m, par mise en place de bois flottant : (a) avant et (b) après (HARVEY et al., 2018)

En synthèse WOHL (2017) résume que les bois flottants augmentent la résistance du flux, augmentent la profondeur de l'écoulement, et engendrent des variations spatiales du transport de sédiments. Les bois flottants dévient le flux de la rivière vers les berges, créant de l'affouillement local et des différences spatiales dans le transport et le stockage de sédiments, et encouragent les échanges hyporhéiques (échanges nappe-rivière). Les effets bénéfiques pour l'environnement de la présence des bois flottants en rivière sont variés. La diversification des conditions d'écoulement permet une augmentation de la diversité des habitats, support de la biodiversité. La présence de ces structures augmente le stockage et l'accès aux ressources de nutriments pour ces différentes communautés aquatiques.

La réintroduction de bois dans les rivières est par conséquent une méthode de renaturation et de restauration des écosystèmes permettant d'améliorer la composante hydromorphologique des cours d'eau (Figure 2.9) et, par là même, l'abondance et la diversité des populations aquatiques. On recommande notamment la lecture du guide^a très complet de WOHL et al. (2019) intitulé : "Managing for large wood and beaver dams in stream corridors" (Gestion du bois flottant et des barrages de castors dans les corridors fluviaux). Cet ouvrage rappelle plus en détail la grande variété des effets du bois flottant sur les rivières et donne des recommandations sur sa gestion et son utilisation à des fins de restauration environnementale. Plusieurs cas d'exemples illustrent aussi ce guide.

L'utilisation du bois flottant (ou la non-intervention) nécessite d'intégrer les différents enjeux liés au cours d'eau et à son environnement, et ceci à l'échelle du bassin versant :

- La prise en compte de l'espace de fonctionnalité des cours d'eau,
- La prise en compte des enjeux humains (vulnérabilité aux inondations), la présence de zone de stockage de polluants potentiels en lit majeur pouvant être mobilisés en crue ...).

Ces interventions doivent être menées au travers d'un diagnostic à large échelle et défini au travers de plans de gestion, accompagnés de la mise en œuvre de suivi des actions sur le moyen et long termes. En effet, si le bois flottant a de nombreuses vertus pour l'environnement, WOHL (2017) rappelle aussi que des dégâts matériels sont parfois observés quand des bois flottants percutent un ouvrage, quand ils s'accumulent au niveau d'une structure (créant un remous liquide qui augmente éventuellement les débordements vers le lit majeur), quand un embâcle cède brutalement (aggravant transitoirement l'onde de crue), et quand un embâcle dévie le flux vers les berges, encourageant l'inondation des berges, son érosion et éventuellement l'avulsion du chenal (bifurcation brutale des écoulements avec création d'un nouveau chenal).

^a. Téléchargeable ici <https://www.srs.fs.usda.gov/pubs/59331>

Chapitre 3

Transport et interaction bois flottant - ouvrages

Guillaume PITON¹, Margaux QUINIOU²

¹ Univ. Grenoble Alpes, INRAE, UR ETNA, 2 rue de la Papéterie, 38402 St-Martin-d'Hères - FRANCE.

² ISL Ingénierie, 15 rue du Maréchal Harispe, 64500 Saint-Jean-de-Luz - FRANCE.

3.1 Généralités sur le transport du bois flottant

Le manque d'observations directes rend difficile l'étude du transport de bois flottant, de manière analogue à l'étude du transport de sédiments dans les années 2000. Quelques rares stations de monitoring du bois flottant existent par exemple sur l'Ain et sur l'Isère (GHAFFARIAN et al., 2020b; ZHANG et al., 2021). La détection automatique des pièces de bois flottant progresse mais ne permet pas encore un suivi totalement automatique des flux. Des campagnes ponctuelles de suivis sur le terrain ainsi que de nombreux travaux sur modèles réduits ont permis de progresser sur le sujet du transport de bois flottant (RUIZ-VILLANUEVA et al., 2019). Des modèles numériques se multiplient pour étudier le transport et la communauté scientifique est très active sur le sujet.

Comprendre les mécanismes permettant le transport de bois flottant dans les rivières est au moins aussi complexe qu'étudier le transport de sédiments, car la flottabilité est une force primordiale à prendre en compte (elle varie entre autres selon le type de bois et son degré de décomposition), les bois flottants présentent des formes très irrégulières, avec branches et racines (formes difficiles à prévoir et à modéliser) et la longueur des bois flottants est généralement suffisamment importante pour permettre des interactions avec la végétation des berges, ce qui a une grande influence sur le transport (COMITI et al., 2016). L'ensemble de ces aspects implique que, de même que la production, le transport de bois flottant est partiellement aléatoire et que son étude oblige à travailler en contexte incertain.

3.1.1 Paramètres influençant le transport

Les paramètres majeurs à prendre en compte dans l'étude du transport de bois flottant sont :

Les caractéristiques de l'écoulement de la rivière : La profondeur relative, ratio entre la hauteur d'écoulement h_0 et le diamètre du flottant D , joue un rôle prépondérant sur sa mobilité. Les troncs lisses avec une masse volumique moyenne de 500 kg/m^3 sont typiquement transportés si $h_0 > D/2$, c'est-à-dire si h_0 est supérieure à la

moitié du diamètre D du tronc, ce qui implique un frottement nul ou faible sur le fond (LANGE et BEZZOLA, 2006). Les situations sur le terrain sont en réalité plus variables comme le confirment les observations de ABBE et al. (1997) sur une rivière non aménagée aux USA où ils ont observé que les pièces maîtresses peu mobiles déclenchant la formation d'accumulations de bois flottants respectent toutes la condition $h_0 > 1.25 \cdot D$ (en utilisant la profondeur de plein bord du chenal pour estimer h_0). Pour de faibles profondeurs relatives données ($h_0 < D/2$), les éléments sont en général peu mobiles hors de conditions très hydrodynamiques (OFEV, 2019). Ces conditions sont toutefois rares sur le terrain et le mode de transport prévalent est la flottaison.

Les propriétés des bois flottants : géométrie, dimensions, densité : Les dimensions et la géométrie des éléments, notamment la présence de branches et de racines, jouent un rôle clé dans la mobilité des bois flottants (CSB, 2017), de même que leur orientation dans le chenal et leur taille relative aux dimensions du chenal (BRADLEY et al., 2005). Ces caractéristiques des bois flottants et leur variabilité entre les pièces influent sur les conditions de mise en mouvement et sur leur distance de transport (CSB, 2017). Pour des troncs simples dépourvus de branches et de racines, l'effet de la longueur relative L_{BF}/D sur la profondeur d'eau relative requise h_0/D est faible (cette dernière augmente pour des densités de bois plus élevées - CSB, 2017). ABBE et al. (1997) indiquent aussi que les pièces maîtresses peu mobiles ont en règle générale une longueur supérieure au quart de la largeur du chenal. Il a été montré que le transport du bois flottant dépend en réalité plus de la quantité de bois se trouvant dans la rivière, que de la zone considérée (COMITI et al., 2016). La densité des éléments influence aussi leur flottabilité (voir §1.3.5 p. 33 pour des valeurs de masse volumique du bois flottant).

La morphologie de la rivière et les caractéristiques du bassin versant : Les caractéristiques du chenal (largeur, profondeur, nombre de bras, pente) influencent à la fois les conditions d'écoulement, la dynamique géomorphologique (érosion de berges, instabilité de versant) et les types de peuplements rivulaires, c'est à dire l'ensemble des paramètres majeurs influençant le transport de bois flottant (BRADLEY et al., 2005; PITON et RECKING, 2016). Ce point a été abordé au Chapitre 2.

L'hydrologie antérieure et la dynamique de la crue : Le transport n'est pas influencé que par les conditions d'écoulement dictées par le débit, mais aussi par des facteurs temporels comme le déroulement de l'hydrogramme et l'historique des crues récentes qui peuvent avoir exporté les stocks disponibles et influencer l'état des peuplements rivulaires (OFEV, 2019). La relation entre débit liquide et flux de bois flottant n'est pas linéaire : le transport de bois flottant est en général très faible sur une large gamme de débit, pour les crues morphogènes, il peut par contre devenir très significatif. Les stocks disponibles dans le lit mineur sont en effet globalement faibles dans les rivières Européennes. Les flux associés aux débits inférieurs au débit de plein-bord sont donc souvent marginaux. L'inondation du lit majeur peut mobiliser le bois mort stocké dans ce dernier ainsi que les grosses pièces situées sur les points hauts des bancs, îles et hauts de berges générant une augmentation du flux de bois flottant. L'apparition d'érosions de berges de grande ampleur ou de glissements de terrains déclenche une autre augmentation significative des flux de bois. En fonction de la morphologie du cours d'eau, l'inondation du lit majeur apparaît avant ou après les érosions de berges. Les érosions de berges massives apparaissant usuellement pour des crues morphogènes impliquant un transport solide significatif, les crues générant un transport significatif de bois flottant sont donc globalement aussi rares que les crues transportant de très grandes quantités de sédiments. L'état d'encombrement du lit mineur antérieur à une crue peut également jouer un rôle sur le transport de bois flottant. Lors de crues de faible amplitude, les flottants peuvent s'accumuler sur des obstacles existants et lors de crues plus importantes, ces embâcles formés précédemment peuvent être emportés. L'existence de plans d'eau et d'ouvrages transversaux peuvent favoriser la formation d'embâcles, alors que pour certains bassins versants, les accumulations peuvent se faire en zone d'eau morte ou de recirculation, sans qu'il n'y ait de chance de reprise des flottants et de transport vers l'aval (effet de piège).

De façon analogique avec le transport solide qui différencie les zones où la charge solide est limitée par la fourniture des sources ("supply-limited") et les zones où elle est limitée par la capacité de transport ("transport limited"), le guide OFEV (2019) identifie trois types de zones du transport de bois flottant (Figure 3.1) : (i) les têtes de bassins où le processus de transport implique des laves torrentielles (apport > capacité de transport, dépôts importants); (ii) les zones de "transport limité" où les apports dépassent largement la capacité du chenal ce qui

entraîne des stocks dans les chenaux; et (iii) les "zones d'offre limitée" où le chenal est capable de transporter de très grands volumes de flottants et de transférer l'ensemble des volumes qui lui sont délivrés.

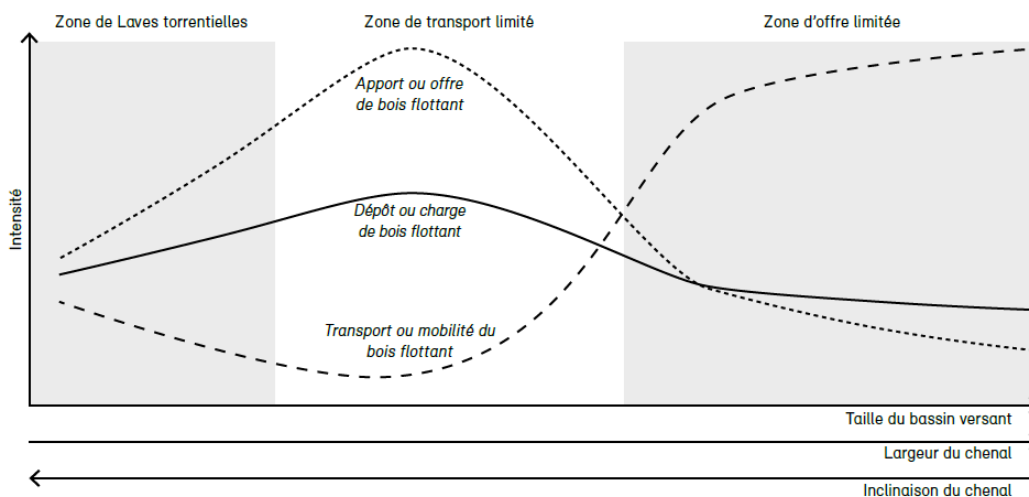


FIGURE 3.1: Tronçons de transport et dépôt de bois flottant dans un réseau hydrographique (OFEV, 2019)

3.1.2 Régimes de transport

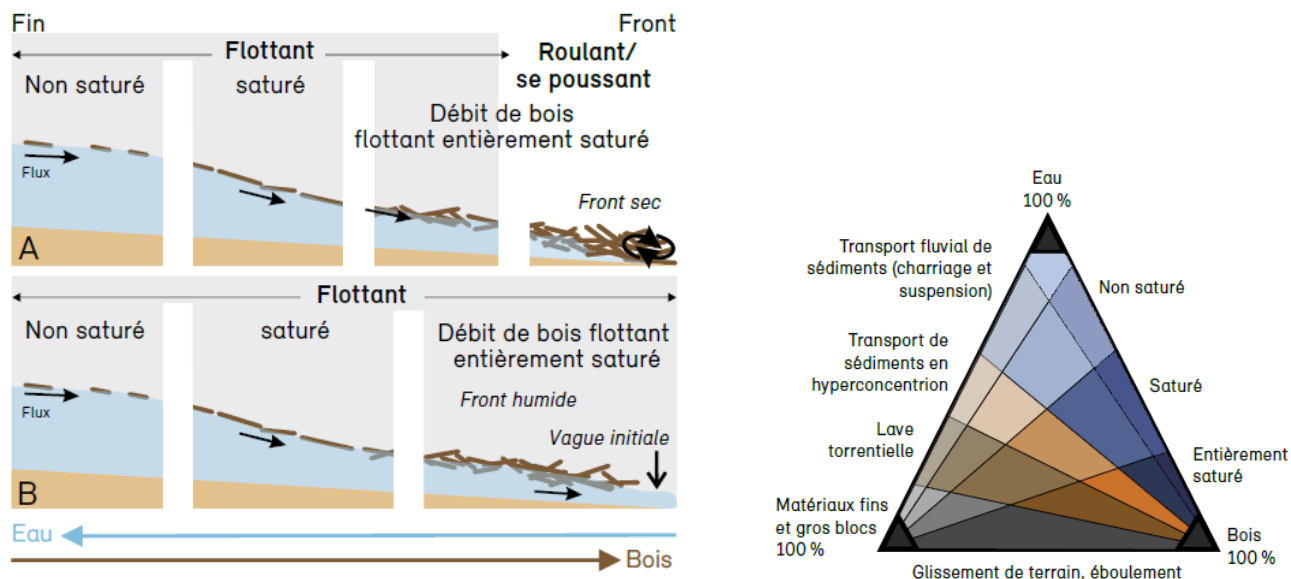
Le principal mécanisme de transport du bois est par flottaison. En fonction de sa densité et de son degré de saturation en eau, le bois peut toutefois avoir une masse volumique supérieure à celle de l'eau et être charrié au fond, sur le lit de la rivière. Lorsqu'un morceau de bois est charrié, sa vitesse est différente de la vitesse d'écoulement, la friction avec le lit étant le principal facteur de contrôle du mouvement. En revanche, si le morceau de bois flotte, sa vitesse de déplacement est sensiblement égale à la vitesse d'écoulement (RUIZ-VILLANUEVA et al., 2016e). Comme illustré sur la Figure 3.2a, différents régimes de transport de bois sont décrits dans la littérature selon le caractère groupé des pièces transportées (RUIZ-VILLANUEVA et al., 2019). Tout écoulement est ainsi constitué d'une fraction donnée d'eau, de sédiments et de bois et peut être replacé dans le diagramme triangulaire de la Figure 3.2b. La pointe sommitale correspond aux écoulements d'eau pure. Dans les cours d'eau torrentiels, les conditions d'écoulement correspondent à la partie centrale du triangle avec des quantités plus ou moins significatives de sédiments et de bois en complément de l'eau.

Le régime non saturé ("Uncongested regime" en anglais) est majoritairement observé pour de faibles quantités de bois flottants, lorsqu'il y a peu d'interactions entre chaque pièce. Ces bois occupent généralement moins de 10 % de la surface du chenal. Les obstacles et les différentes vitesses d'écoulement selon les sections de la rivière engendrent des rotations et des changements d'orientation aléatoires des troncs.

Le régime semi-saturé ("semi-congested regime") est observé pour des quantités intermédiaires de bois flottants. Les morceaux de bois se déplacent individuellement et d'autres par paquets. Ces éléments occupent généralement 10 à 33 % de la surface du chenal.

Le régime saturé ("congested regime") est observé pour d'importantes quantités de bois flottants dans la rivière, avec peu d'espace entre chaque pièce. Les bois sont transportés quasi-exclusivement en paquets, occupant plus de 33 % de la surface du chenal. Beaucoup de troncs sont orientés dans la direction de l'écoulement, mais certains peuvent être orientés perpendiculairement à cette direction, surtout près des bords de la rivière.

Le régime hyper-saturé ("hyper-congested regime") correspond au transport d'une masse de flottants occupant toute la largeur du chenal et transportés sur une épaisseur de plusieurs fois le diamètre des flottants. La plupart des bois flottants sont positionnés perpendiculairement ou obliquement à la direction de l'écoulement. Un "front" de flottants est alors formé. Dans les rivières, la propagation d'un front de bois hyper-saturé



(a) Régimes de transport de bois flottant (A) en torrent avec hauteur d'écoulement faible et (B) en rivière avec hauteur d'écoulement significative.

(b) Diagramme triangulaire des différents types de processus selon la composition en sédiments, eau et bois

FIGURE 3.2: Schémas présentant les différents régimes de transport et les typologies d'écoulements, adaptés de RUIZ-VILLANUEVA et al. (2019) par OFEV (2019)

forme une onde au dessus de l'écoulement préalable. Dans les petits cours d'eau ou dans les oueds et autres creeks éphémères des milieux arides, ce type d'écoulement peut être observé alors que l'écoulement préalable est quasi inexistant. Dans ce régime, les forces de friction dominent, et les bois flottants ont tendance à rouler sur eux-mêmes. Ces forces de friction et les collisions entre les morceaux de bois augmentent la dissipation d'énergie. Les analogies entre écoulements de bois flottant hyper-saturé et laves torrentielles sont nombreuses, il semble notamment possible de les modéliser avec les mêmes lois de comportement (RUIZ-VILLANUEVA et al., 2019).

En pratique, le régime semi-saturé est souvent observé pendant les crues majeures (RUIZ-VILLANUEVA et al., 2016e; OFEV, 2019). Les phases de régime saturé (et éventuellement hyper-saturé) sont les plus dangereuses car les paquets de bois forment plus facilement des embâcles (GSCHNITZER et al., 2017).

3.1.3 Mobilité et trajectoire des flottants

Des techniques d'analyse d'images ont été mises en oeuvre pour mesurer les vitesses et trajectoires des flottants en canal et en milieu naturel. Tant que les flottants gardent le contact avec le lit de la rivière (couronne de branche bien développée, racines), les points de contacts génèrent un frottement qui agit comme une "ancrage" sur le flottant (DIEHL, 1997). Ce dernier est ralenti et moins mobile que les éléments dépourvus d'ancres. Les éléments plus courts, au diamètre moindre, dépourvus de branches et racines sont ainsi beaucoup plus mobiles (WELBER et al., 2013; RUIZ-VILLANUEVA et al., 2020). Cette mobilité accrue peut être un effet pervers des opérations d'entretien consistant à simplement billonner les troncs en éléments plus courts : il devient en effet improbable que ces petits éléments initient une obstruction, ils sont par contre mobilisés plus tôt et s'arrêtent plus tard et parcourent ainsi de plus longs trajets à l'échelle d'une crue.

Les éléments flottant sans contact avec le lit ou les berges, se comportent comme des traceurs : ils suivent les courants de surface (GHAFFARIAN et al., 2020a). Les lignes de courant de surface, c'est à dire les lignes tangentes

aux vitesses de surface, indiquent de façon indirecte les trajectoires les plus probables des flottants. Les modèles numériques 2D calculent les vitesses moyennées sur l'épaisseur et peuvent donc produire des lignes de courant de la vitesse moyenne. Dans les secteurs où ces vitesses sont bien alignées avec les vitesses de surface, il est possible d'utiliser directement les résultats d'un modèle 2D pour analyser les trajectoires de flottants (STOCKSTILL et al., 2009; RUIZ-VILLANUEVA et al., 2014c; ZISCHG et al., 2018). Cette approche perd en validité :

- Si les courants secondaires, transversaux ou hélicoïdaux sont assez significatifs pour que les courants de surface n'aient pas les mêmes trajectoires que les courants moyens modélisés par les outils 2D. LEFORT et LAFFONT (2008) étudient, par exemple, le cas d'un coude très marqué où la mise en oeuvre d'un modèle Telemac 3D a été nécessaire à la modélisation de champs de vitesses réalistes : son analogue 2D surestimait les vitesses à l'intrados du coude.
- Si les flottants sont de grande dimension ou évoluent par paquets (régime saturé ou hyper-saturé). Dans les deux cas, la trajectoire des flottants est influencée par de nombreuses lignes de courant et devient éventuellement plus difficile à prédire par analyse simple. Il est alors nécessaire de coupler le modèle hydraulique avec un modèle mécanique faisant un bilan des forces appliquées à chaque flottant et prédisant les trajectoires de chacun (c'est l'approche adoptée dans les modèles IberWood et Orsa2D - RUIZ-VILLANUEVA et al., 2014c; PERSI et al., 2018a).

En milieu naturel, la forme de la section en travers présente souvent un chenal principal dans lequel s'écoule la majorité du débit. Cette veine fluide concentre aussi souvent la majorité des flottants. Dans les coudes, cette veine fluide est généralement localisée à l'extrados. Aidés en complément par les courants hélicoïdaux éventuels, les flottants adoptent donc souvent des trajectoires préférentielles plutôt situées côté extrados des coudes (DIEHL, 1997).

3.2 Méthodes d'étude du transport du bois flottant

Différentes méthodes peuvent servir à étudier et modéliser le transport de bois flottant.

3.2.1 Observations sur le terrain

Les observations de terrain permettent de quantifier les dépôts de bois, d'identifier les zones d'apport et de déterminer les processus impliqués dans la fourniture, le transport et les dépôts de bois flottant (OFEV, 2019). L'analyse de photos aériennes et les méthodes de télédétection permettent de dresser des inventaires des quantités et dimensions de bois flottant dans le chenal et d'analyser les modifications spatiales et temporelles des dépôts (LIVERS et al., 2020).

3.2.2 Modèles réduits

Les modèles réduits sont régulièrement utilisés pour étudier le transport, les dépôts et les interactions écoulements - bois flottant (KOULINSKI et RICHARD, 2008; PITON et RECKING, 2016). L'intégration de bois flottant dans un modèle réduit suit normalement les similitudes géométriques (même réduction d'échelle pour les flottants que pour la géométrie du chenal) et de densité (même masse volumique entre le flottant taille réel et le flottant taille réduite). L'utilisation de petites branches de bois pour modéliser des troncs est donc en général appropriée. Il faut noter que la similitude mécanique (propriétés élastiques et résistance à la rupture) n'est alors pas respectée : les troncs modélisés sont anormalement rigides et résistants. Si les processus modélisés peuvent briser ces éléments sur le terrain, il faut prendre ce phénomène en compte de manière indirecte (introduire des éléments déjà brisés) ou direct via l'usage d'autres matériaux respectant la similitude mécanique. Pour un meilleur contrôle de la densité, certains travaux sont menés avec du plastique (KOULINSKI et RICHARD, 2008; FURLAN, 2019). La même démarche pourrait être suivie pour respecter et mieux contrôler à la fois les similitudes géométriques, de densité et mécaniques.

Les accumulations de bois flottant générant souvent des affouillements (SCHALKO et al., 2019a), la modélisation physique des interactions impliquant bois flottant et ouvrages affouillables nécessite la mise en place de modèles

physiques hydro-sédimentaires. Lorsque seuls des processus de surface sont en jeu, par exemple dans l'étude des interactions évacuateurs de crue - bois flottant, un modèle physique hydraulique à fond rigide peut être suffisant (PFISTER et al., 2020 ; BÉNET et al., 2021).

3.2.3 Modèles numériques du transport de bois flottant

Comme le rappellent ADDY et WILKINSON (2019) dans leur article de synthèse, les effets hydrauliques associés à la présence de bois flottant peuvent être pris en compte dans les modèles numériques de façon indirecte (modification de la géométrie du modèle, des coefficients de frottement, des coefficients de seuils et d'orifices représentant les ouvrages obstrués) et parfois directe (paramètres décrivant les dimensions des embâcles). Ces approches sont focalisées sur les interactions bois flottant - ouvrages et sont présentées aux paragraphes 3.4 et 3.5.

L'étude numérique du transport des flottants se développe à l'aide de modèles 2D et 3D. Deux catégories de modèles existent : les modèles couplés ou non-couplés. La description de la trajectoire des flottants est généralement basée sur une approche Lagrangienne (la trajectoire de chaque élément de bois flottant est suivie pas à pas). A chaque pas de temps, un bilan de force est résolu sur chaque flottant (poussée d'Archimède, traînée, frottement sur les berges, le lit et les autres flottants) puis les équations de Newton permettent de déterminer la trajectoire de ce dernier. Le calcul des forces de traînée est issu des champs de vitesses fournis par un modèle hydraulique, par exemple une formulation classique basée sur les équations de Saint-Venant 2D et une approche Eulérienne (champs d'écoulement calculés sur un maillage). Les modèles *non-couplés* calculent le mouvement des flottants mais n'intègrent pas les perturbations induites par les flottants sur les champs d'écoulement. Ils correspondent sensiblement à une façon plus sophistiquée d'analyser les lignes de courant.

Le modèle est dit *couplé* si la présence de flottants influence la dynamique des écoulements. En effet, si il existe un différentiel de vitesse entre flottants et écoulement, une dissipation d'énergie par frottement peut être introduite dans le calcul des conditions d'écoulement. Il est ainsi possible de modéliser en 2D une partie de la rehausse des lignes d'eau induites par les accumulations de flottants (en partie seulement parce que les modèles 2D font généralement l'hypothèse que les flottants moins denses que l'écoulement flottent nécessairement : la position verticale des flottants n'est pas précisément connue). Un tel modèle est incapable de décrire les processus d'accumulation d'embâcles en 3D, formés soit au fur et mesure que la surface libre monte, soit par aspiration des flottants dans les zones où les forces de traînées sont plus fortes que la poussée d'Archimède (PITON et al., 2020), soit encore dans des régimes d'écoulement hypersaturés. Bien qu'il y ait des limites dont l'utilisateur doit être conscient, ce type de modèle reste un outil très puissant pour l'étude du transport de bois flottant en rivière. La liste suivante présente les principaux modèles dont l'utilisation a été documentée (liste non exhaustive) :

Modèles couplés

Iber Wood (module complémentaire du modèle Iber) est un modèle numérique 2D de simulation de la dynamique des bois flottants développé par RUIZ-VILLANUEVA et al. (2014c). Il adopte une approche Lagrangienne-Eulérienne couplée. Ce modèle est celui sur lequel il existe le plus de recul, il a été utilisé pour étudier de nombreux processus tel que l'effet des flottants sur les ponts (RUIZ-VILLANUEVA et al., 2013 ; RUIZ-VILLANUEVA et al., 2014a ; RUIZ-VILLANUEVA et al., 2017), leur mobilité relative entre des morphologies de lits en tresses ou à chenal unique (RUIZ-VILLANUEVA et al., 2016d,e, 2020) ou encore l'effet des hydrogrammes sur la mobilité des flottants (RUIZ-VILLANUEVA et al., 2016c).

Les troncs sont modélisés sous forme de cylindres ou de double cylindres (un long pour le tronc et un court et large pour les racines). Les principaux paramètres à prendre en compte sont la densité du bois, la gamme de variation des longueurs et diamètres des flottants et des éventuelles racines, la position des flottants initialement présents dans le domaine de calcul et les débits de flottants aux points d'entrées. Il est aussi possible de modifier le coefficient de frottement entre le tronc et le lit du cours d'eau, et le coefficient de résistance du tronc dans l'eau.

ORSA2D_WT : Dans la même lignée que IberWood, PERSI et al. (2018a,b, 2019a) ont récemment implémenté une approche Eulérienne-Lagrangienne couplée pour modéliser le transport de bois flottant. Les résultats de ORSA2D ont notamment été confrontés à des campagnes de suivi de terrain (PERSI et al., 2019b) et à des

essais en laboratoire PERSI et al. (2020). ORSA2D permet de modéliser des solides de forme sphérique en complément de cylindres.

Modèles non couplés (sans rétro-action du bois sur l'hydrodynamique)

SOBEK : MAZZORANA et al. (2011b) ont développé un modèle 2D nommé SOBEK rural couplé à ArcGIS pour le transport de bois flottant dans les rivières de montagnes, en injectant les résultats d'un modèle hydrodynamique 2D dans des formules empiriques décrivant la dynamique et le dépôt d'éléments de formes simplifiées. Pour chaque cellule, la dynamique et le transport des bois flottants est implémentée. Après avoir déterminé la direction de propagation du flux dans chaque cellule, les morceaux de bois sont positionnés perpendiculairement à cette direction et leur mouvement est déterminé par un simple bilan d'équilibre. Cette approche a permis de modéliser les volumes de bois potentiellement recrutables et d'identifier des zones critiques d'accumulation et de dépôt de bois.

LWDsimR est l'extension des développements menés sur SOBEK pour fonctionner couplé avec le logiciel de modélisation 2D BASEMENT (ZISCHG et al., 2018). Il présente l'avantage d'intégrer des modules de détection des arbres sur la base de données LiDAR.

Des modèles hydrauliques 3D sont utilisés dans des travaux de recherche pour étudier les processus de transport de bois mais les temps de calcul beaucoup plus importants limitent pour le moment l'extension spatiale et temporelle des domaines étudiés (ADDY et WILKINSON, 2019; LASSUS et al., 2019; KIMURA et KITAZONO, 2019).

DE CICCIO et al. (2018) fournissent une revue de la littérature dédiée aux interactions entre bois flottants et ponts. La Figure 3.3 est tirée de leur synthèse et résume bien le potentiel des différentes approches de modélisation numérique. Les modèles numériques 1D ne permettent pas directement d'analyser le transport des flottants. Ils permettent par contre de modéliser les rehausses de lignes d'eau sur la base de modifications de la géométrie et/ou des coefficients de calibration (rugosité, débitance). Ce point est décrit au §3.4 p. 63.

Questions toujours ouvertes associées à la modélisation numérique du transport de bois flottant Si la modélisation numérique des interactions entre écoulements et bois flottants a beaucoup progressé durant la dernière décennie, de nombreuses questions restent ouvertes. GURNELL souligne dès 2013 que peu de modèles (conceptuels, empiriques ou numériques) incorporaient des paramètres représentant la dynamique d'un chenal, bien que son importance dans le transport de bois flottant ait été démontrée dans de nombreux environnements lors d'observations sur le terrain. Dans leur synthèse récente, DE CICCIO et al. (2020) confirment que l'étude numérique conjointe de transport de flottants et de sédiments reste à mener. GURNELL (2013) insiste aussi sur un aspect rarement mentionné et systématiquement ignoré dans les modèles numériques : l'ensevelissement partiel ou total du bois dans le lit de la rivière (plus efficace que la décomposition dans la disparition de bois du chenal). De plus, les progrès dans la modélisation numérique des flottants sont limités par la faible quantité d'observations de terrains dans des conditions de crues intenses et de forte mobilité des flottants. Le caractère aléatoire des processus impliqués impose de mener des analyses de sensibilité aux paramètres, ce qui reste aussi trop rarement mené à bien rigoureusement.

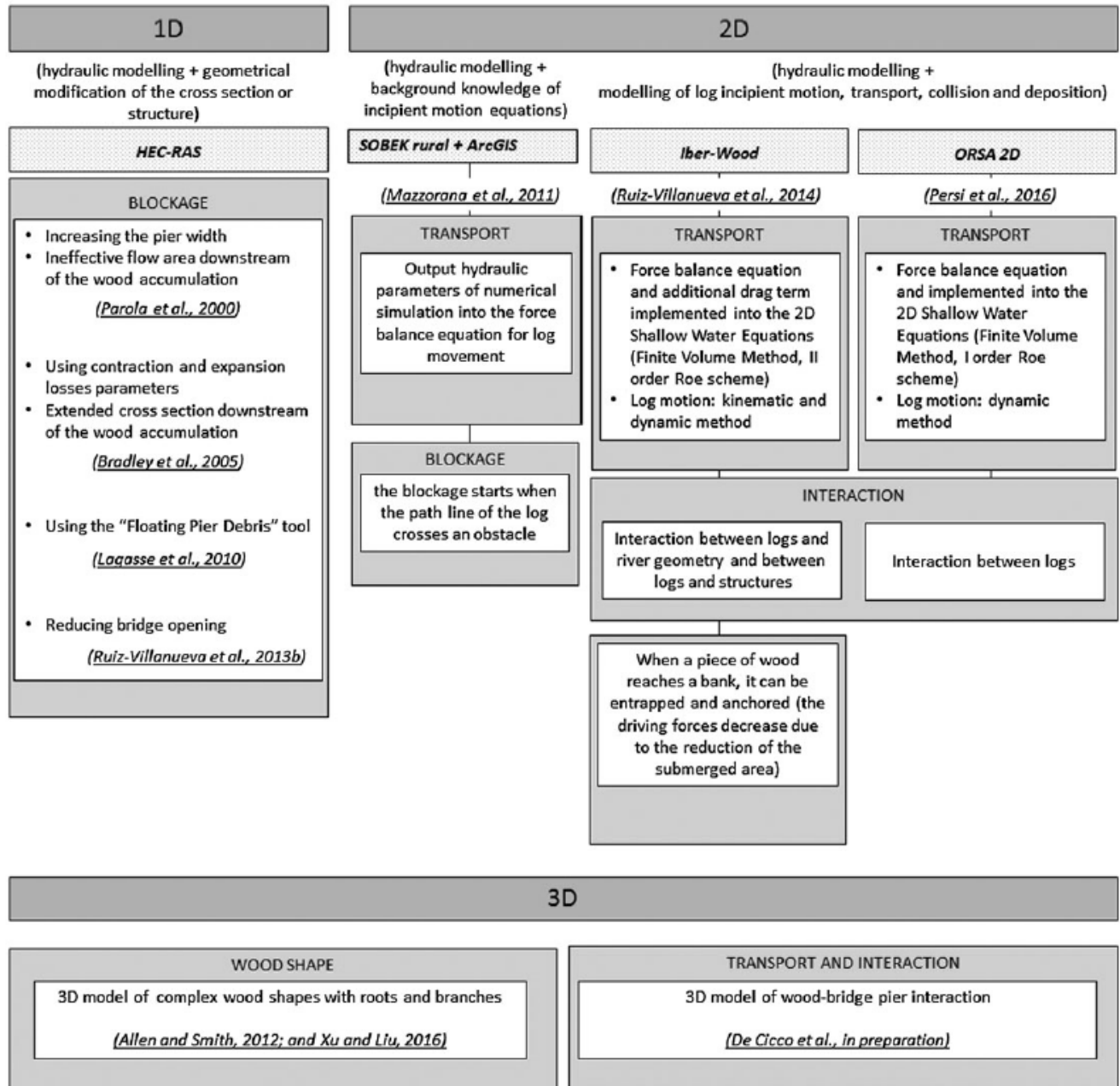


FIGURE 3.3: Caractéristiques des principaux modèles numériques utilisés pour la modélisation des interactions bois flottants - ponts (DE CICCIO et al., 2018)

3.3 Dépôts et blocages naturels

3.3.1 Conditions de dépôts naturels

Par analogie avec le §3.1.1 décrivant les paramètres influençant le transport, les conditions de dépôts naturels sont associées à des faibles submersions ($D/h_0 < 0.5 - 1$) ou à des formations au droit d'obstacles (ouvrage, verrou rocheux, arbres, etc.). Les essais en canal menés par BOCCHIOLA et al. (2006) montrent que lorsque les hauteurs d'eau sont suffisantes pour les transporter, c'est le ratio entre la longueur des flottants et l'inter-distance entre les arbres qui contrôle la localisation de l'embâcle. Les éléments courts pénètrent plus profondément, voire traversent les zones boisées, tandis que les pièces maîtresses sont rapidement stoppées. Si les hauteurs d'eau sont faibles et que les flottants sont transportés par roulement, le moindre obstacle suffit à les arrêter.

En complément des accumulations souvent observées à l'extrados des coudes et méandres, dans les lits à bras multiples, la tête amont des bancs et îles forment aussi des points d'accumulation naturelle des flottants par le double effet de réduction locale de la hauteur d'eau et de présence éventuelle d'obstacles naturels. La Figure 3.5 propose une synthèse simplifiée des facteurs favorisant les dépôts naturels de flottants et la régulation naturelle de leur flux.

L'étude de RUIZ-VILLANUEVA et al. (2016e) combinant observations de terrain et modélisation numérique a bien mis en évidence que les zones de dépôts varient en fonction de la magnitude de la crue (qui joue sur les hauteurs d'eau locales). La probabilité de dépôt dépend ainsi à la fois de la géomorphologie, de la végétation et de la courantologie de la crue (Figure 3.4). La modélisation 2D n'intègre toutefois pas la présence des arbres résistants aux écoulements de façon explicite sous forme d'obstacles, elle les intègre de façon implicite sous la forme d'une rugosité augmentée. Les flottants modélisés ont donc paradoxalement tendance à être mieux transportés dans les forêts où les écoulements sont plus profonds que dans un lit majeur à l'occupation des sols plus lisse. L'usage des modèles 2D pour l'étude du transport des flottants est donc plus pertinent pour l'étude du transport dans les lits alluvionnaires où la végétation ne peut pas bloquer les flottants par effet d'obstacle et à l'étude des interactions avec les structures dont la géométrie est explicitement décrite dans le modèle (RUIZ-VILLANUEVA et al., 2017, 2020).

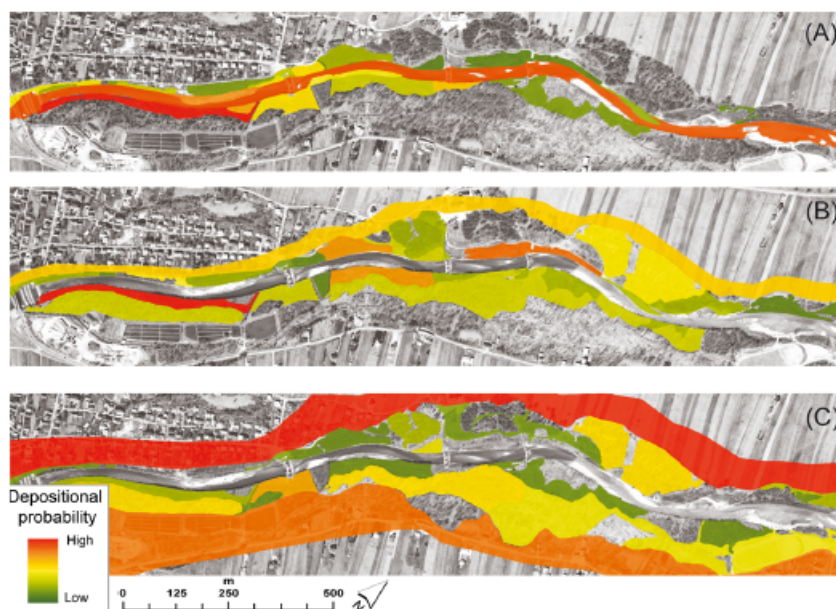


FIGURE 3.4: Carte de la probabilité de dépôt des bois flottants pour différents scénarios : (a) hautes eaux (période de retour de 1 à 2 ans, débit de pointe : $28 \text{ m}^3/\text{s}$), (b) crue fréquente (période de retour de 10 ans, débit de pointe : $105 \text{ m}^3/\text{s}$) et (c) crue moyenne (période de retour de 80 ans, débit de pointe : $210 \text{ m}^3/\text{s}$) (RUIZ-VILLANUEVA et al., 2016e)

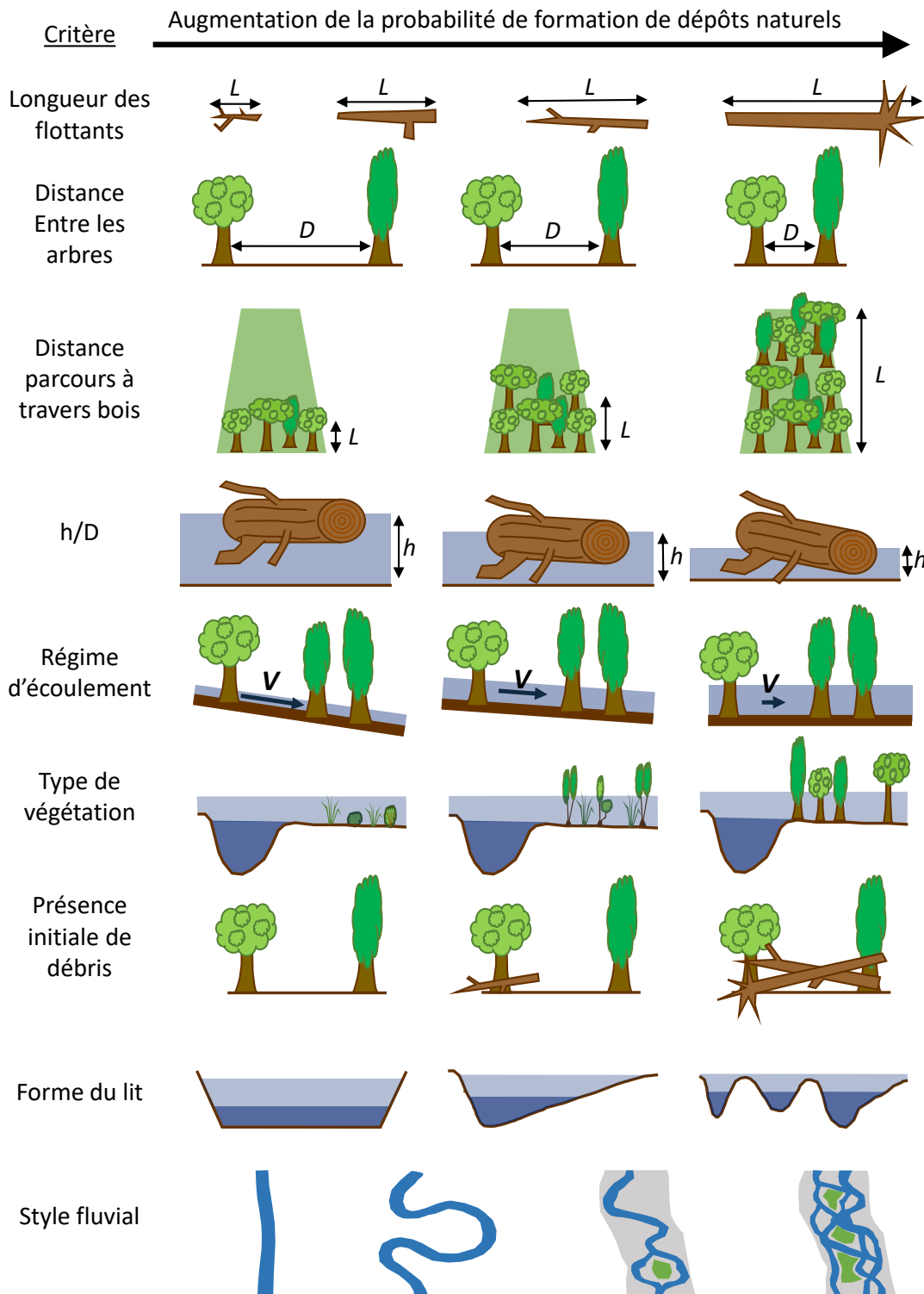


FIGURE 3.5: Facteurs principaux pilotant la probabilité de formation de dépôts naturels

3.3.2 Type d'accumulation : tapis de flottants ou accumulation multi-couches ?

En amont des obstacles, on retrouve deux grands types d'accumulations de flottants :

Les tapis de flottants ("large wood carpet" en anglais) correspondent à des accumulations de flottants disposés cote à cote sur une épaisseur faible, de l'ordre de grandeur du diamètre moyen des éléments. On retrouve typiquement ces accumulations dans les lacs (Figure 3.6) et les zones où l'hydrodynamique est faible.

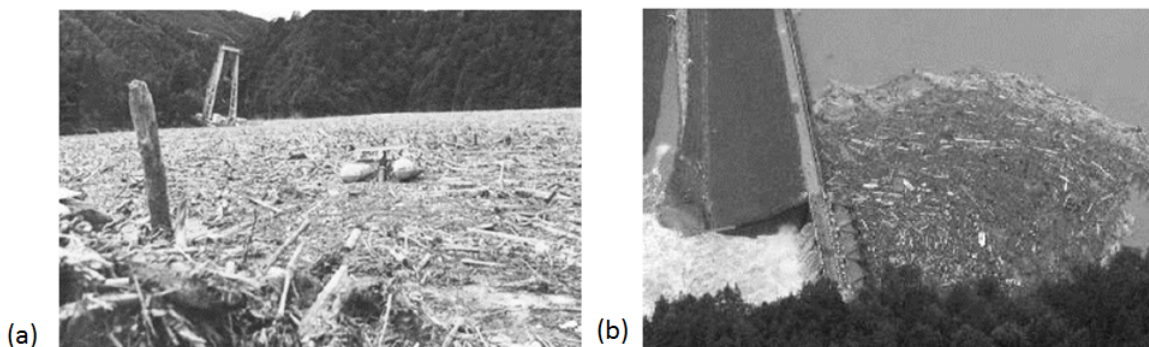


FIGURE 3.6: (a) Tapis de flottants à la surface du réservoir du barrage de Palagnedra en Suisse et (b) obstruction d'un râtelier avec évacuateur de crue en Autriche présentant un tapis de flottants (Source : OFEN, 2019).

Les accumulations multi-couches correspondent au contraire à des accumulations formées de couches multiples ou de flottants entrelacés (Figure 3.7). L'accumulation peut avoir une forme 3D complexe. On observe de tels embâcles par exemple contre les piles de ponts dans les rivières torrentielles ou en amont des pièges à embâcles sur les torrents. Il y a deux raisons possibles à leur formation : (i) une variation forte du niveau de l'eau conjointe à une faible mobilité verticale des troncs bloqués : l'accumulation s'est alors formée par couches successives pendant la montée de crue, (ii) des conditions très hydrodynamiques où les vitesses sont suffisamment fortes pour que les forces de traînées dépassent la poussée d'Archimède et entraînent les troncs sous le tapis de flottants formé en surface.



FIGURE 3.7: Exemples d'embâcles multi-couches : denses, développés dans l'épaisseur (a) sur le Bitoulet (Hérault) après la crue de Septembre 2014 (Source ©Midi Libre) et (b) sur une prise d'eau de la rivière alpine Trisanna (Tyrol) pendant les crues de 2005 (Source : RUDOLF-MIKLAU et HÜBL, 2010).

Des descriptions détaillées des phases de formation d'accumulations au droit d'obstacles existent dans les travaux de modélisation physique menés sur le fonctionnement des râteliers pare-flottants (SCHMOCKER et HAGER, 2013; SCHALKO et al., 2019b; PITON et al., 2020). Les embâcles au droit de ponts équipés de pieux multiples ou dans les zones boisées se forment vraisemblablement de façon analogue. Plusieurs phases peuvent être isolées (Figure 3.8) :

Initiation Au début des essais, le râtelier est vide de flottants. L'influence de la présence de la structure sur l'écoulement est marginale si l'écartement entre les pieux est suffisant. Quelques flottants peuvent passer à travers l'ouvrage si ils l'approchent selon une orientation propice. Quand un élément approche un obstacle transversalement, il sera plus probablement piégé. S'il est assez long pour reposer sur deux points (deux pieux, deux arbres, une pile de pont et la berge, etc.), le piégeage est très probable. A partir de cette étape, le mécanisme s'emballe : les nouveaux éléments atteignant l'ouvrage buttent contre l'élément piégé, tournent et contournent ce dernier ou viennent augmenter la taille de l'embâcle. Sur un ouvrage occupant toute la largeur de l'écoulement, c'est l'ensemble de la section qui s'obstrue dès le blocage de quelques pièces maîtresses formant un barrage.

Rehausse de la ligne d'eau et croissance verticale de l'embâcle L'embâcle naissant forme un barrage et génère une rehausse de la ligne d'eau. Si les obstacles contre lesquels reposent les flottants sont verticaux, il est probable que les forces de traînée plaquent les flottants dans leur position initiale. Ces derniers ne changent alors pas de position malgré la hausse graduelle du niveau de la surface libre. D'autres éléments flottants s'empilent alors sur le barrage initial. L'embâcle se développe dans la direction verticale et forme un barrage d'une épaisseur de l'ordre de quelques fois le diamètre des troncs. Dans les grands cours d'eau où la profondeur de l'écoulement est significative, les écoulements sont détournés sous l'embâcle. Ceci augmente les problématiques d'affouillements mais les rehausses de lignes d'eau ne sont pas significatives. Dans les cours d'eau où les hauteurs initiales d'écoulements sont faibles, le barrage ainsi formé peut éventuellement se développer sur l'ensemble de la colonne d'eau.

Apparition d'un tapis de flottants dans la zone de remous liquide Si les vitesses d'écoulement deviennent assez faibles (parce que l'écoulement est naturellement lent ou parce que l'embâcle formé obstrue suffisamment la section d'écoulement pour générer un fort remous amont), les forces de traînée et contraintes hydrodynamiques sur l'accumulation faiblissent. Les flottants forment alors un tapis plus ou moins dense en amont de l'obstacle. L'accumulation se développe alors dans le plan horizontal plutôt que dans l'épaisseur.

Apparition d'accumulation multi-couches Si au contraire, malgré la formation de l'embâcle, les vitesses restent suffisamment élevées, les flottants atteignant l'accumulation peuvent être aspirés sous l'eau par des forces de traînée supérieures à la flottabilité des troncs. Ils viennent alors développer l'accumulation dans les directions verticales et horizontales.



FIGURE 3.8: Phases clés de la formation d'un embâcle contre un obstacle : (a) Début de l'accumulation, croissance verticale et rehausse marquée de la ligne d'eau, (b) début de la formation d'un tapis de flottants et (c) tapis de flottants bien développé. La partie frontale de l'embâcle n'a que marginalement grossi, la majorité des pièces est stockée dans le tapis de flottants. Malgré l'augmentation significative du volume de flottants piégés entre (a) et (c), le niveau d'eau en amont n'a que marginalement changé, démontrant l'importance de l'effet d'obstruction des quelques flottants visibles en (a) et l'effet relativement faible des frottements sur l'important tapis de flottants visible en (c) (tiré de SCHMOCKER et HAGER, 2013).

Les travaux de SCHMOCKER et HAGER (2013) et SCHALKO et al. (2019b) montrent que l'introduction d'un volume de flottants donné induit une rehausse des lignes d'eau plus forte pendant la phase de croissance verticale que pendant les phases suivantes. Le volume de bois flottant V_c générant cette première phase peut être calculé pour des écoulements avec $Fr \in [0.3; 1.5]$ par les équations (SCHALKO et al., 2019b) :

$$V_c = 3.1 \cdot Fr_0 \cdot B \cdot h_0^2 \quad (3.1)$$

$$V_c = 3.1 \cdot Fr_0 \left(\frac{h_0}{d_m} \right)^{-0.2} \cdot B \cdot h_0^2 \quad (3.2)$$

avec d_m diamètre moyen des sédiments [m]. L'Equation 3.1 s'applique aux embâcles formés sur fond inaffouillable (rateliers et ponts équipés de radiers) alors que l'Equation 3.2 s'applique si le lit est affouillable. Ces équations peuvent être utilisées pour estimer si un volume donné de flottants risque de générer une rehausse significative de la ligne d'eau sur un site où la largeur B et les conditions d'écoulements (h_0 et Fr_0) sont connues. Elle permet en général de mettre en évidence qu'il faut assez peu de flottants pour obstruer un pont.

Discriminer les conditions de formation de tapis de flottants de celles de formation d'embâcles multi-couches

PITON et al. (2020) proposent d'utiliser un nombre dimensionnel noté Π/F_D basé sur le ratio entre la poussée d'Archimède $\Pi = \frac{g(\rho - \rho_{BF})\pi \cdot D^2 \cdot L}{4}$ et la force de traînée $F_D = \frac{1}{2} \rho \cdot C_D \cdot D \cdot L_{BF} \cdot u^2$; avec g l'accélération de la gravité (9.81 m/s^2), ρ la masse volume du fluide [kg/m^3], ρ_{BF} la masse volume du bois flottant [kg/m^3], D le diamètre moyen des bois flottants [m], L_{BF} leur longueur moyenne [m], C_D le coefficient de traînée [-] pris égal à 1.2 (RUIZ-VILLANUEVA et al., 2014c) et u la vitesse relative de l'écoulement à proximité du bois flottant [m/s]. Les équations suivantes donnent les formes détaillées (Eq. 3.3) et approximées (Eq. 3.4) :

$$\Pi/F_D = \frac{\pi}{2 \cdot C_D} \cdot \frac{\rho - \rho_{BF}}{\rho} \cdot \frac{g \cdot D}{u^2} \quad (3.3)$$

$$\Pi/F_D \approx \frac{\pi}{2 \cdot C_D} \cdot \frac{\rho - \rho_{BF}}{\rho} \cdot \frac{g \cdot D \cdot B^2 \cdot h^2}{Q^2} \approx \frac{\pi}{2 \cdot C_D} \cdot \frac{\rho - \rho_{BF}}{\rho} \cdot \frac{D}{h} \cdot \frac{1}{Fr^2} \quad (3.4)$$

Avec h la hauteur d'eau [m], B la largeur du chenal [m], Q le débit [m^3/s] et Fr le nombre de Froude $= \frac{Q}{\sqrt{gB^2h^3}}$. Ces équations reposent sur les hypothèses simplificatrices suivantes : (i) les flottants sont considérés comme adoptant une position transversale, (ii) et sont en limite de flottaison : l'ensemble de leur volume est noyé et la force de traînée s'applique donc sur une surface égale à $D \times L_{BF}$; dans la version approximée (Eq. 3.4), (iii) les flottants sont quasi-immobiles, donc l'ensemble de la vitesse du fluide est utilisée pour calculer la traînée, (iv) la vitesse moyenne dans la section est utilisée pour calculer $u \approx \frac{Q}{B \cdot h}$ et le chenal est rectangulaire (le cas échéant, la formulation de la vitesse moyenne dans la section devrait être modifiée ainsi que celle du nombre de Froude).

L'étude de Π/F_D permet de discriminer les conditions d'écoulement où les accumulations de flottants prennent plutôt la forme d'un tapis de flottant ($\Pi \gg F_D \Leftrightarrow \Pi/F_D \gg 1$) des conditions d'écoulements où la formation d'une accumulation multi-couche est probable ($\Pi \ll F_D \Leftrightarrow \Pi/F_D \ll 1$). Dans la zone de transition, ($\Pi/F_D \approx F_D \Leftrightarrow \Pi \approx 1$), les accumulations prennent la forme d'un tapis de flottants dense avec quelques éléments submergés. Compte tenu de l'incertitude sur les paramètres et des hypothèses sur lesquelles reposent cette approche, il faut considérer que la transition entre les deux régimes apparaît dans l'intervalle $\Pi \in [0.5; 1.8]$. LANGE et BEZZOLA (2006, p. 79) indiquent que pour garantir la formation d'un tapis de flottants, il est préférable de maintenir des vitesses inférieures à 0.8-1.1 m/s. Ces vitesses correspondent en effet à des valeurs de $\Pi \gtrsim 1$ si on considère des paramètres moyens pour les flottants ($\rho_{BF} \approx 650 \text{ kg/m}^3$ et $D \approx 0.4 \text{ m}$).

La Figure 3.9 illustre par exemple l'augmentation significative des embâcles formés contre des piles de pont quand le nombre Π/F_D approche puis passe sous la valeur critique de 1.

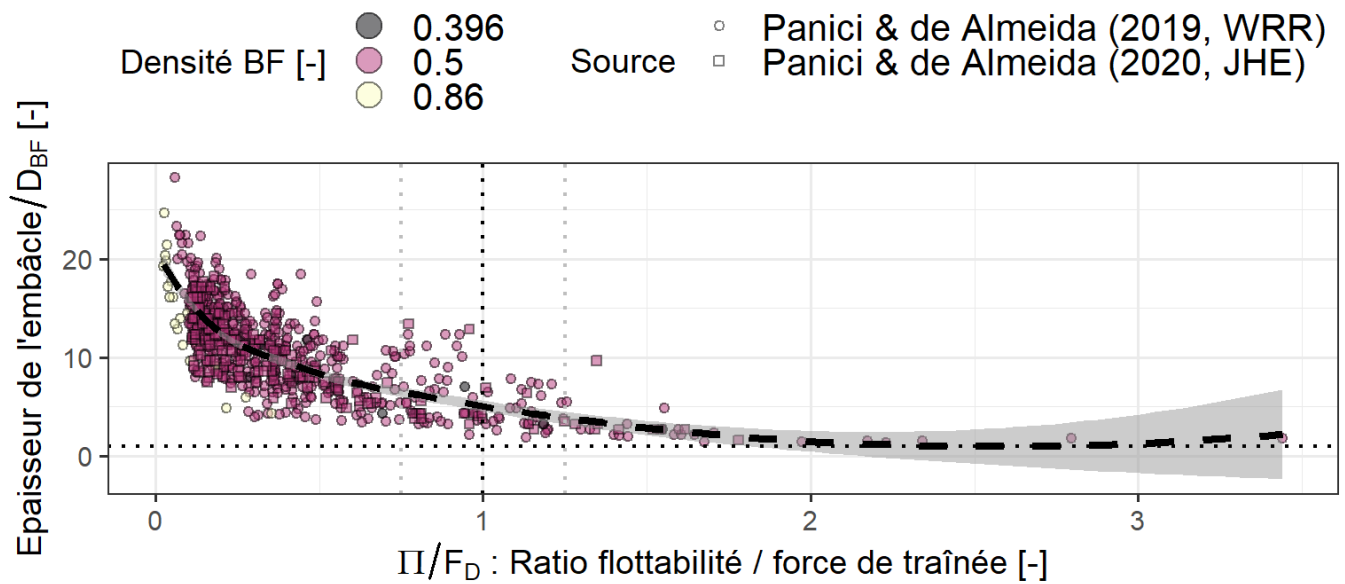


FIGURE 3.9: Evolution de l'épaisseur des embâcles formés en laboratoire en fonction du nombre Π / F_D : les épaisseurs restent faibles, de l'ordre de grandeur d'un diamètre, dans le domaine $\Pi / F_D \gg 1$ et augmente significative dans le domaine $\Pi / F_D \ll 1$ (données tiré de PANICI et ALMEIDA, 2018, 2020).

3.4 Interactions bois flottants et ponts

Les ponts sont des sites préférentiels d'accumulation des bois flottants. Au droit des ponts, ces derniers réduisent la section d'écoulement, détournent et augmentent les vitesses vers le fond et sur les côtés, aggravant ainsi les affouillements. En amont des ouvrages, les obstructions induisent parfois des augmentations du niveau de la surface libre (effet de surcote) associées à une chute des vitesses et éventuellement une certaine sur-sédimentation (DIEHL, 1997 ; DE CICCIO et al., 2018).

3.4.1 Types d'embâcles se formant sur les ponts

Deux types d'embâcles se forment au niveau des ponts (Figure 3.10) : des accumulations isolées au niveau des piles ("single-pier accumulation" en anglais, nommé "embâcle de pile" dans la suite de ce document) et/ou des accumulations bloquant l'ensemble d'une ou de plusieurs travées ("span blockage", "embâcle de travée" ci-après).



(a) Exemple d'embâcles isolés au droit de piles



(b) Exemple d'embâcle barrant des travées

FIGURE 3.10: Les deux grands types d'embâcles se formant sur les ponts (images tirées de DIEHL, 1997)

Des embâcles de pile peuvent se former au droit de piles de pont (et de tout autre obstacle en rivière) dans les conditions et rivières les plus variées. Ils se forment par accumulation successive de un ou de plusieurs troncs qui se placent perpendiculairement à la direction d'écoulement. Le phénomène est partiellement aléatoire, de nombreux troncs rebondissant, pivotant ou glissant contre la pile. L'arrêt d'un élément génère ensuite la croissance de l'accumulation, d'autant plus rapidement que les éléments arrêtés sont grands et "capturent" les flottants dans l'écoulement. Cette croissance est perturbée par des épisodes de déstabilisation et de relargage d'éléments à l'occasion de chocs, ou plus généralement de pivotement de la masse autour de la pile en lien avec une croissance hétérogène et déséquilibrée de l'accumulation.

La formation d'embâcles de travée est plus rare : elle est principalement pilotée par le ratio entre la longueur des bois flottants L_{BF} et la largeur entre les piles B_0 . Bien que des accumulations puissent être formées par plusieurs éléments relativement courts ($L_{BF} < B_0$), ces "arches" sont généralement transitoires et instables. Les embâcles de travées persistants se forment en règle générale à la suite du blocage d'une "pièce maîtresse" de grande longueur ($L_{BF} > B_0$) sur laquelle des éléments plus courts viennent s'empiler (et cachant parfois la ou les pièces maîtresses). Ce type d'embâcle peut également se former entre une pile de pont et la berge (DIEHL, 1997).

En plus des arrêts intempestifs au droit d'obstacles isolés (embâcle de pile) ou de plusieurs obstacles (embâcle de travée), des accumulations peuvent se former au droit de ponts dont le tirant d'air est faible, voir négatif (mise en charge). Ce type d'accumulation est éventuellement relargué à la décrue lorsque le tirant d'air redeviendra suffisant ou, au contraire, si la partie supérieure du pont (parapets, piliers) est suffisamment submergée, l'accumulation a des chances d'être relarguée en grande partie (Figure 3.11). Si par contre la submersion est insuffisante, l'embâcle a peu de chance d'être relargué et l'effet d'obstruction du pont persiste au pic de crue.



© Jean François Ottonello /NICE MATIN/MAXPPP

© Nicolas Tucac / AFP

FIGURE 3.11: Deux perspectives sur un embâcle localisé sur un pont submergé dans la traversée de Breil-sur-Roya (Alpes-Maritimes), suite à la tempête Alex d'Octobre 2020 : quelques grandes pièces maîtresses sont restées coincées mais la submersion du pont (profondément noyé dans le remous du barrage aval) a relargué les troncs plus petits.

3.4.2 Probabilité de formation d'un embâcle au niveau d'un pont

La formation d'un embâcle est clairement un processus partiellement aléatoire. Il dépend toutefois de nombreux paramètres, difficiles à mesurer ou à prédire, et dont l'importance varie selon les situations. La probabilité de formation d'une accumulation de bois flottants constitue donc le sujet de nombreuses études, certaines aboutissant encore à des résultats contradictoires. Le phénomène étant complexe et partiellement aléatoire, son étude requière donc de lourdes campagnes expérimentales impliquant de nombreuses répétitions.

Paramètres principaux

En synthèse, outre les paramètres évidents liés à l'intensité de la crue, les paramètres **augmentant** la probabilité de formation d'un embâcle au niveau d'une structure sont (DIEHL, 1997; SCHMOCKER et HAGER, 2011; GSCHNITZER et al., 2017; DE CICCO et al., 2018) :

- **Paramètres propres aux flottants**
 - Longueurs élevées des bois flottants ;
 - Diamètres élevés des bois flottants ;
 - Présence de troncs avec racines et branches démultipliant le diamètre apparent ;
 - Transport des bois flottants par paquets, en régime saturé ;
- **Paramètres propres à l'ouvrage**
 - Faible largeur des travées (voir l'effet du ratio L_{BF}/B_0 cité ci-dessus) ;
 - Faible hauteur, en particulier faible tirant d'air : la mise en charge des ponts provoque une augmentation soudaine et significative de la probabilité de formation d'embâcle ;
 - Présence de piles de pont ;
 - Piles et culées en treillis métallique ou présentant des formes complexes propices à l'enchevêtrement des flottants ;
 - Faible pente.

La Figure 3.12 illustre ces tendances de façon simplifiée.

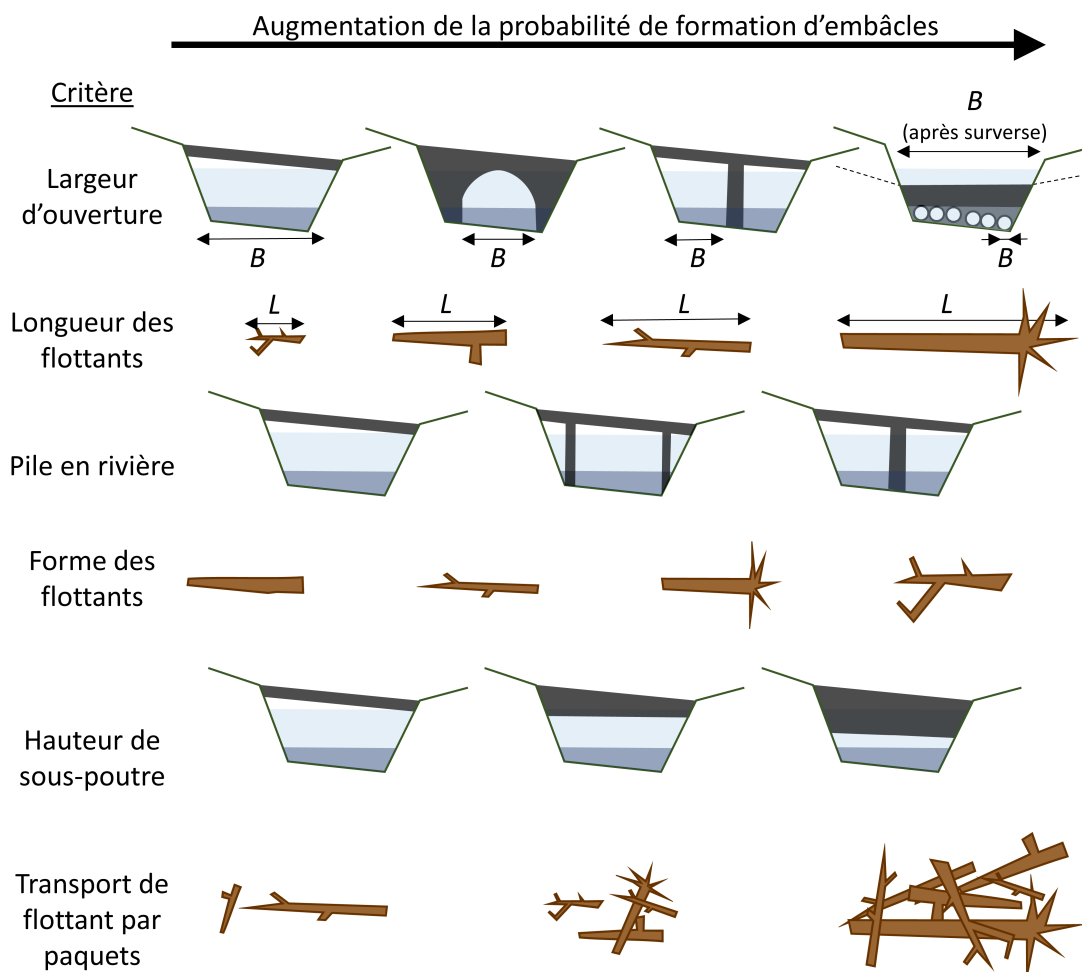


FIGURE 3.12: Facteurs principaux pilotant la probabilité de formation d'embâcle

Formules empiriques

Estimation de la probabilité de formation d'embâcle de travée

LANGE et BEZZOLA (2006, p. 26) rapportent des probabilités de blocage de pièces transportées individuellement (régime non-saturé) dans des chenaux et ponts à section rectangulaire ou trapézoïdale (Figure 3.13). Les essais ayant mené à ces résultats ont été réalisés dans des conditions de nombre de Froude $Fr \in [0.3; 1.1]$. Les probabilités de blocage sont exprimées en fonction des nombres adimensionnels de longueur relative $\frac{L_{BF}}{B_0}$ et de diamètre de flottants adimensionnel ($D_{BF}^* = (D_{BF,min} \times D_{BF,max} \times L_{BF})^{1/3}$). LANGE et BEZZOLA (2006) proposent ainsi des formules empiriques de prédiction de la probabilité $P_{blockage}$ de blocage au niveau de ponts .

— Pour $L_{BF}/B_0 < 0.5$: $P_{blockage} = 0$

— Pour $L_{BF}/B_0 \geq 0.5$: $P_{blockage} = 0.133 \cdot \frac{L_{BF}}{B_0} - 0.066$

Avec B_0 la largeur de la section d'écoulement et L_{BF} la longueur des flottants. Les formules simplifiées de ce type doivent être utilisées avec prudence pour l'évaluation de la probabilité de blocage, leur domaine d'application étant conditionné à une grande similarité avec les conditions dans lesquelles elles ont été établies. Elles ont toutefois le mérite de donner des tendances et des ordres de grandeurs.

MAZZORANA et al. (2011a) dans un article plus large portant sur la notion de sous-scénarios de crues permettant d'intégrer les risques d'obstructions de ponts, proposent des valeurs de probabilités absolues d'embâclement

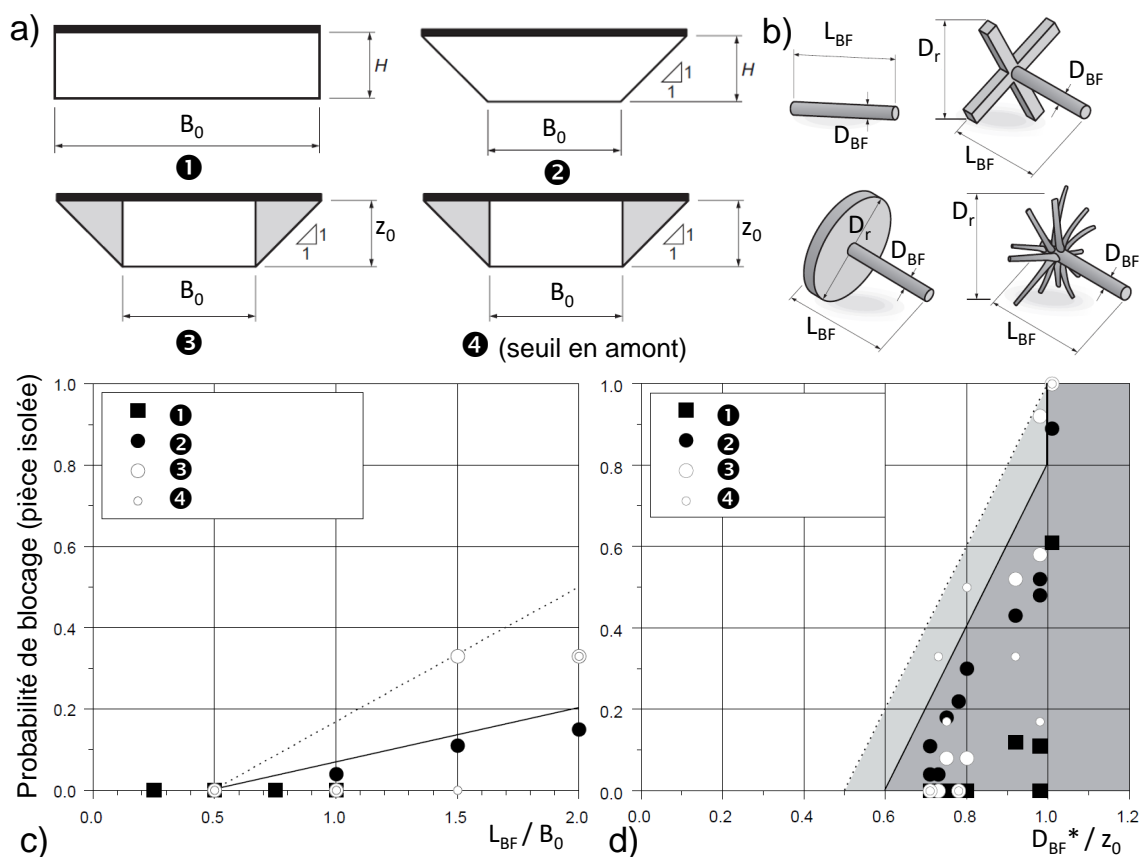


FIGURE 3.13: Probabilité de blocage de troncs transportés individuellement d'après LANGE et BEZZOLA (2006) : a) configurations testées, les zones grisées dans les configurations (3) et (4) représentent des culées, la configuration (4) est équipée d'une chute en amont du pont; b) éléments utilisés pour représenter les embâcles; c) probabilité de blocage en fonction du rapport largeur d'ouverture / longueur des flottants; d) probabilité de blocage en fonction du rapport diamètre de flottant adimensionnel / hauteur de sous poutre.

des ponts à partir d'une réanalyse de crues ayant eu lieu dans la province italienne du Sud-Tyrol. Les sites supports ont les caractéristiques suivantes :

- largeur des ponts $B_0 \approx 20$ m;
- hauteur de sous-poutre : $z_0 = 4-5$ m;
- longueur des flottants : $L_{BF} = 15-20$ m;
- diamètre des éléments y compris racines et branches : $D_{BF} = 1-1.5$ m;
- nombre de Froude des écoulements : $Fr = 0.8-1$.

Le Tableau 3.1 fournit une évaluation de la probabilité d'embâchement des ponts selon le ratio h/z_0 (avec h la hauteur d'eau et z_0 la hauteur de sous-poutre) au pic de crue et selon le mode de transport des flottants (terminologie reprise du guide OFEV, 2019, c.f. 51). Dans ces conditions, MAZZORANA et al. (2011a) considèrent que la probabilité d'embâchement est nulle pour $h/z_0 < 0.6$. Elle augmente pour h approchant z_0 et devient forte quand le pont est en charge ($h/z_0 > 1$), voire quasi-certaine si les flottants sont transportés par paquets (régime de transport saturé).

Cette approche permet de qualifier le risque de formation d'un embâcle au droit d'un pont. Sur les rivières étudiées, les embâcles ne forment pas des obstructions complètes des ouvrages mais génèrent simplement une rehausse locale des lignes d'eau. En cas d'embâchement, MAZZORANA et al. (2011a) suggèrent de considérer une obstruction de 50% de la section d'écoulement dans le modèle numérique hydraulique du système. Notons que

TABLE 3.1: Probabilité d'embâclement des ponts retenue par MAZZORANA et al. (2011a) selon la hauteur relative d'écoulement et le régime de transport de flottants

Hauteur d'eau relative h/z_0	Régime de transport des flottants		
	Non saturé	Semi-saturé	Saturé
<0.6	0	0	0
0.6-0.8	0.01	0.1	0.2
0.8-1.2	0.4	0.8	0.99
>1.2	0.6	0.9	0.99

cette approche n'intègre pas directement les éventuels érosions ou dépôts sédimentaires au droit des ouvrages. Si pour une quelconque raison, il peut être anticipé que le niveau du fond du lit doit vraisemblablement changer, il est possible de corriger les termes de hauteur d'écoulement h et de hauteur de sous-poutre z_0 avec la hauteur de dépôt ou d'érosion estimée.

SCHMOCKER et HAGER (2011) ont établi des formules permettant de déterminer la probabilité d'accumulation de bois flottant pour différents types de ponts, de conditions d'écoulement et de caractéristiques de bois. Toutefois, ils n'ont étudié cette probabilité que pour des éléments individuels (régime non saturé). GSCHNITZER et al. (2017) ont quant à eux testé plusieurs configurations de ponts (avec et sans pile centrale, ainsi qu'avec un déflecteur : c.f. Fig. 3.14) et différentes conditions d'écoulement dans les rivières de montagnes :

- des pentes de 0.1%, 0.4% et 0.8% générant des nombres de Froude = 0.6, 0.8 et 1.2;
- des hauteurs d'eau variables : entre 0.58 et 1.25 fois la hauteur sous poutre ;
- des longueurs de flottants variables : entre 0.40 et 1.20 fois la largeur du chenal, avec et sans branche et apport non-saturé ou sous forme de paquets de dix flottants en régime saturé.

Les auteurs proposent ensuite des coefficients de régression logistiques (modèle *logit*) qui permettent de reconstruire des équations paramétriques de probabilité selon l'équation :

$$P_{blockage} = \frac{e^{\beta_0 + \sum_{i=1}^7 \beta_i \chi_i}}{1 + e^{\beta_0 + \sum_{i=1}^7 \beta_i \chi_i}} \quad (3.5)$$

Avec $\beta_0 = -13.0675$ selon leur ajustement et les coefficients β_i et χ_i pour $i = 1, \dots, 7$ fournis et définis dans le Tableau 3.2. En complément des coefficients *logit* β_i , les auteurs fournissent aussi les effets relatifs moyens d'un changement de paramètre sur la probabilité de formation d'un embâcle. Cette approche permet donc d'estimer des probabilités absolues de blocage (Eq. 3.5), mais aussi de mettre en évidence un changement de probabilité en fonction de certains paramètres (Tableau 3.2).

En guise d'exemple de l'application de l'Eq. (3.5), on considère l'étude d'un pont avec une pile ($\chi_1 = 2$), sans déflecteur ($\chi_2 = 1$), situé sur un chenal de pente 0.5% ($\chi_3 = 0.5$), soumis à une hauteur d'eau relative h/z_0 de 0.9 au pic de crue de projet ($\chi_4 = 0.9$). Ce pont est supposé soumis à des apports de flottants en paquets ($\chi_7 = 2$) qui sont toutefois dépourvus de branches et de racines ($\chi_6 = 1$). Leur longueur relative, difficile à prédire, est supposée varier dans la gamme $L_{BF}/B_0 = 0.5-1.2$ ($\chi_5 = 0.5 - 1.2$). L'application de l'Eq. (3.5) indique que la probabilité de blocage varie dans la gamme $P_{blockage} = 91\% - 99\%$ (49% - 88% si le transport est en régime non saturé : $\chi_7 = 1$).

Pour des conditions similaires d'apport et d'écoulements, le retrait de la pile ($\chi_1 = 1$) permet de faire passer $P_{blockage} = 75\% - 96\%$ (23% - 68% en régime non saturé), l'ajout d'un déflecteur ($\chi_2 = 2$) sur le pont sans pile permet ensuite un gain supplémentaire à $P_{blockage} = 24\% - 70\%$ (3% - 19% en régime non saturé). On pourrait de façon similaire étudier l'effet de surélever la sous-poutre du pont en modifiant $\chi_4 = h/z_0$ ainsi que la portée du pont en modifiant $\chi_5 = L_{BF}/B$.

Contrairement à ce que pourrait laisser penser l'exemple ci-dessus (dans lequel nous fournissons des valeurs précises de $P_{blockage}$ afin que les utilisateurs puissent vérifier leurs calculs sur des valeurs connues), l'Eq. (3.5) ne fournit qu'une estimation de l'ordre de grandeur de $P_{blockage}$ plutôt qu'une valeur précise au % près. En effet, les confrontations des estimations fournies par l'Eq. (3.5) avec les observations de GSCHNITZER et al. (2017) montrent que les trois quarts des estimations sont correctes à ± 0.2 près. Notons, de plus, que cette performance correspond

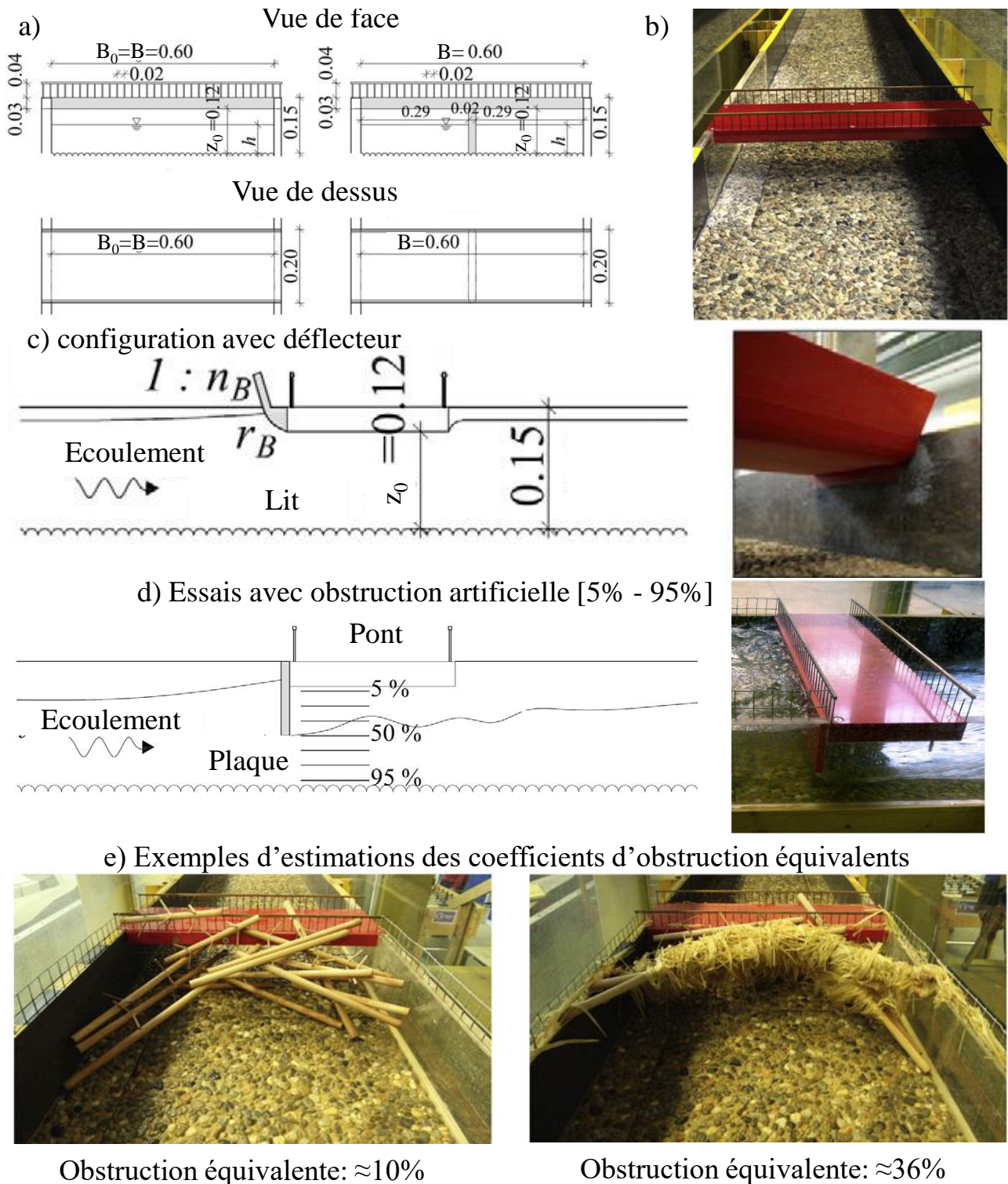


FIGURE 3.14: Illustrations des modèles physiques de ponts utilisés par GSCHNITZER et al. (2017) : a) vues d'amont et vue de dessus de la configuration sans pile de pont et avec pile de pont, b) photo de la configuration sans pile de pont, c) photo et vue de côté de la configuration avec déflecteur, d) configuration avec obstruction artificielle, e) exemples de configurations avec accumulation de 16 flottants (pente = 0.8%) et taux d'obstruction équivalents.

TABLE 3.2: Changement relatif de la probabilité de blocage de flottants au droit d'un pont et coefficients logit en fonction de la variation des paramètres principaux descripteurs du système selon GSCHNITZER et al. (2017)

#	Paramètre	$\beta_{\#}$	Définition ou valeur de χ_i	Changement relatif de la probabilité
1	Pile en rivière	1.1760	Sans pile : $\chi_1 = 1$, Avec pile : $\chi_1 = 2$	$P_{blockage} \nearrow$ 324% en présence d'une pile
2	Défecteur sur le pont	-2.2420	Sans déflecteur : $\chi_2 = 1$, Avec déflecteur : $\chi_2 = 2$	$P_{blockage} \searrow \approx 90\%*$ en présence d'un déflecteur
3	Pente	-0.2438	$\chi_3 = \text{pente} [\%]$	$P_{blockage} \nearrow$ 22% par augmentation de 1% de la pente
4	Hauteur d'eau relative h/z_0	7.91	$\chi_4 = h/z_0 [-]$	$P_{blockage} \nearrow$ 8.23% par augmentation de 1% de h/z_0
5	Longueur des flottants relative au chenal L_{BF}/B	2.83	$\chi_5 = L_{BF}/B [-]$	$P_{blockage} \nearrow$ 2.87% par augmentation de 1% de L_{BF}/B
6	Présence de branches et racines générant un diamètre 6 fois supérieur au diamètre des troncs	2.2071	Flottants sans branches : $\chi_6 = 1$, Flottants avec branches et racines : $\chi_6 = 2$	$P_{blockage} \nearrow \approx 809\%$ en présence de branches
7	Mode de transport du bois flottant	2.3074	Flottants transportés isolés : $\chi_7 = 1$, Flottants transportés par paquets : $\chi_7 = 2$	$P_{blockage} \nearrow \approx 905\%$ en régime saturé plutôt que non-saturé

* Efficacité relative du déflecteur à considérer en comparaison avec la configuration de référence, c'est-à-dire sans pile de pont.

à l'application de la formule sur l'échantillon qui a servi à la calée. Les valeurs de $P_{blockage}$ fournies par l'Eq. (3.5) peuvent donc être arrondies par les utilisateurs à 5% ou 10% près, voire plus.

Estimation de la probabilité de formation d'embâcle de pile

Le phénomène élémentaire de blocage au droit d'une pile isolée a été étudié par DE CICCIO et al. (2020) dans des conditions d'écoulement sub-critique (nombre de Froude = 0.3 et 0.5). Ces essais se sont focalisés sur l'effet de la forme de la pile sur la probabilité d'arrêt des flottants, phénomène élémentaire à l'origine de la formation d'un embâcle. Les essais montrent que les piles dont l'amont a une forme d'ogive piègent le plus rarement des flottants, aussi bien en régime semi-saturé qu'en régime non saturé. A contrario, les piles à tête plate (ainsi que dans une légèrement moindre mesure, les trapézoïdales) montrent une très forte tendance à piéger les flottants. Les piles de forme triangulaire ou rondes montrent des performances intermédiaires entre les formes plates et les formes d'ogive.

Les expériences sur modèles physiques de SCHALKO et al. (2019c) mettent en évidence que $P_{blockage}$ augmente quand la longueur du bois augmente, quand la vitesse d'écoulement amont diminue, lors d'un transport de flottants par paquets, ou quand le nombre de piles de pont augmente (OFEV, 2019; SCHALKO et al., 2019c). La probabilité d'embâcle $P_{blockage}$ contre une pile de pont pour le transport de bois flottants peut être estimée pour

$$Fr \in [0.08; 1.2] \text{ et } \left(\frac{u_0^2}{2 \cdot g \cdot L_{BF}} \right)^{0.43} \cdot \left(\frac{w_s}{L_{BF}} \right)^{0.60} \leq 0.53, \text{ par :}$$

$$P_{blockage} = e^{-12.7 \cdot x_n \left(\frac{v_0^2}{2 \cdot g \cdot L_{BF}} \right)^{0.43} \cdot \left(\frac{w_s}{L_{BF}} \right)^{0.60}} \quad (3.6)$$

Avec, $x_n = 1.0$ pour le transport de bois individuel, $x_n = 0.65$ pour le transport de bois en régime saturé, u_0 étant la vitesse de l'écoulement en amont, L_{BF} la longueur d'un tronc, et w_s le diamètre d'une pile de pont.

3.4.3 Surcote de niveau en amont d'un pont (backwater effect)

Un des effets les plus importants et visibles de la formation d'embâcles est l'élévation du niveau d'eau en amont, nommée aussi "surcote" dans ce guide. C'est l'obstruction de la section d'écoulement, ainsi que éventuellement les frottements additionnels associés à la présence des flottants, qui génèrent ces surélévations des niveaux d'écoulement. Ce phénomène peut être accompagné de l'alluvionnement du lit de la rivière, de l'avulsion du chenal, et de phénomènes locaux d'affouillement. Ces effets en cascade peuvent engendrer des problèmes au niveau des structures (affouillement, déchaussement), ou encore une inondation des berges, générant éventuellement le recrutement de plus de bois flottant (DIEHL, 1997; COMITI et al., 2012; RUIZ-VILLANUEVA et al., 2014a).

GSCHNITZER et al. (2017) ont mené une double analyse sur cette thématique : ils ont réalisé dans un premier temps des expériences avec une plaque obstruant la section sous le pont (Fig. 3.14d). Les réhausses de ligne d'eau associés à cet abaissement du niveau de la sous-poutre ont été enregistrées. Dans un second temps, des accumulations de flottants ont été constituées avec 8, 16, 32 ou 64 gros éléments ainsi qu'en présence et en l'absence de petits éléments flottants flexibles représentant des branches s'infiltrant entre les gros éléments et réduisant la porosité de l'embâcle (c.f. Fig. 3.14e). GSCHNITZER et al. (2017) indiquent enfin, à quel taux d'obstruction (abaissement relatif de la cote de la sous-poutre) correspondait en moyenne les réhausses induites par les accumulations de flottants. Sans connaître le détail des surcotes mesurées pour différents débits ou configurations, ceci permet de donner des ordres de grandeurs d'abaissement relatif de sous-poutres cohérents avec des accumulations de flottants. Cette approche peut ensuite être utilisée dans des modèles numériques pour corriger la géométrie d'un ouvrage de manière à prendre en compte implicitement la présence de l'embâcle :

- Pour des accumulations n'impliquant qu'une poignée de flottants (8 ou 16, soit 50–100 m³ de bois flottant à l'échelle terrain, le double en comptant les petits flottants), le taux d'obstruction équivalent varie dans la gamme 10%–20% en l'absence de petits flottants flexibles et dans la gamme 36%–49% en leur présence.
- Pour des accumulations impliquant un nombre plus conséquent de flottants (32 ou 64 soit 200–400 m³ de bois flottant à l'échelle terrain, 300–500 m³ en comptant les petits flottants), le taux d'obstruction équivalent varie dans la gamme 20%–40% en l'absence de petits flottants flexibles et dans la gamme 42%–57% en leur présence.

Ces essais démontrent à la fois que la présence de branches et feuilles venant densifier l'embâcle a un effet très significatif sur les surcotes amont associées, mais aussi qu'il suffit d'une poignée de grands éléments pour atteindre des degrés d'obstruction de l'ordre de 40%–50%. GSCHNITZER et al. (2017) notent tout de même qu'aucun essai n'a montré de surcote qui dépasserait un degré d'obstruction équivalent >57%. Cet effet est également dommageable pour des orifices sur des seuils latéraux permettant de restituer les débits réservés sur des tronçons court-circuités par des biefs de moulins par exemple. Il a déjà été observé qu'il suffit de quelques branches se mettant en travers des orifices pour que des feuilles tombées à l'automne s'y accumulent, jusqu'à occulter presque totalement l'ouverture. Le même problème a également été relevé sur des grilles en amont de prises d'eau de centrales hydroélectriques, colmatées rapidement à partir du moment où quelques flottants sont arrêtés par la grille.

L'analyse des observations de OKAMOTO et al. (2019) sur une configuration globalement similaire ($Fr = 0.28 - 0.78$) confirme que les embâcles formés par des accumulations de plusieurs dizaines, voire d'une centaine de flottants, généraient des surcotes équivalentes à des taux d'obstruction de l'ordre de 49%–56% ; des accumulations dépassant les 200 pièces, et jusqu'à 270 pièces, atteignaient au maximum un taux d'obstruction de l'ordre de 65%. Ces essais étaient toutefois réalisés sans petits flottants flexibles qui auraient vraisemblablement pu augmenter ces taux d'obstructions équivalents.

Le guide Américain de BRADLEY et al. (2005), un peu plus ancien que les deux articles présentés ci-dessus, fournit par ailleurs la description la plus complète des approches existantes pour estimer les surcotes associées à la présence d'embâcle sur les ponts, en particulier ceux équipés de piles en rivière. Il décrit des approches simplifiées mais aussi des exemples d'application numérique, notamment par modélisation 1D avec le logiciel HEC-RAS de l'US Corps of Engineers, logiciel de simulation utilisé très fréquemment et qui comprend des options pour modéliser implicitement les embâcles au droit des ponts (notés "floating debris"). L'approche utilisée repose sur l'ajout d'une surface d'obstruction décrite par sa largeur et sa hauteur dans le module de gestion des piles de ponts (BRUNNER, 2008, p. 5.33). La synthèse de ADDY et WILKINSON (2019) discute plus largement des différentes

façons d'intégrer la présence de bois mort ou de flottants dans les modèles numériques.

3.4.4 Érosion, affouillement et contournements

Les accumulations de bois flottants au niveau des ponts détournent les écoulements vers le bas ainsi que éventuellement vers les rives, générant des affouillements et des érosions par contournement (DIEHL, 1997). L'affouillement des piles de ponts, en particulier en présence de bois, est une cause majeure de ruine d'ouvrages (par exemple Fig. 3.15 & 3.16).

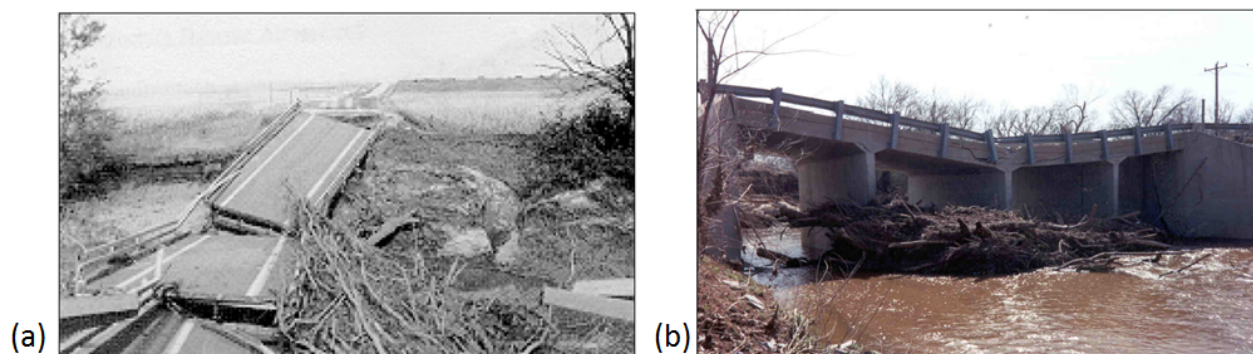


FIGURE 3.15: Effondrement suite à la formation d'un embâcle (a) d'un pont de l'autoroute du Missouri et (b) d'un pont en Oklahoma (BRADLEY et al., 2005)



FIGURE 3.16: Affouillement d'un pont après la crue du Guil en Juin 2000 (KOULINSKI et RICHARD, 2008)

Des campagnes d'essais sur modèle physique, parfois doublées de modélisations numériques, ont été réalisées afin de mieux comprendre les processus d'affouillement et de proposer des formules d'estimation de la profondeur d'affouillement au droit de piles de ponts (embâclés ou non). Le sujet est complexe et ne saurait être résumé dans le présent guide. Nous suggérons de consulter les guides américains de LAGASSE et al. (2010) et de STURM et al. (2018), ainsi que les travaux de PAGLIARA et CARNACINA (2010, 2011a,b).

3.4.5 Impacts et cas de charges associés aux flottants

Force d'impact

En faisant l'hypothèse que la structure est rigide, la force d'impact d'un flottant sur cette dernière $F_{i,max}$ peut être estimée par (HAEHNEL et DALY, 2004) :

$$F_{i,max} = u_{BF} \sqrt{\hat{k}(m_{BF} + C \cdot m_f)} \quad (3.7)$$

avec u_{BF} la vitesse de déplacement du flottant (m/s), \hat{k} coefficient de raideur au contact à l'impact (N/m), m_{BF} la masse du flottant (kg), m_f la masse du fluide déplacé par le flottant qui peut être estimée via la poussée d'Archimède (kg) et C coefficient de masse ajoutée (-). Le coefficient C dépend de la géométrie du flottant, de sa submersion et de son orientation. HAEHNEL et DALY (2004) considèrent raisonnable de prendre $C = 1$ pour des flottants transportés transversalement à la direction de l'écoulement et $C = 0$ pour des flottants parallèles à l'écoulement. Les mêmes auteurs, suite à des mesures en canal, recommandent d'utiliser une valeur de $\hat{k} = 2.4 \cdot 10^6$ N/m, leurs mesures montrant une variabilité de ce dernier dans la gamme 1.1–2.4 MN/m. En cas d'impact oblique ou excentrique, des coefficients réducteurs peuvent être ajoutés à l'équation.

La principale inconnue dans l'utilisation de cette approche est probablement l'estimation de la masse du flottant considéré.

Des efforts dynamiques associés aux impacts directs de flottants sur un ouvrage ne sont possibles que tant que l'ouvrage n'est pas embâclé. Si une accumulation de flottants se forme contre ce dernier, elle le protège des impacts directs. Un cas de charge différent émerge toutefois : le chargement pseudo-statique associé au transfert de la force de traînée appliquée par le fluide sur l'accumulation (paragraphe ci-dessous).

Forces de traînée

La présence d'une accumulation de flottants piégés contre un ouvrage génère un transfert d'effort depuis le fluide sur l'accumulation, puis de l'accumulation sur la structure.

BRADLEY et al. (2005, dans leur section 4.6) fournissent une analyse détaillée des coefficients de traînée considérés pour les piles et pour les obstructions, selon le taux d'obstruction de l'ouvrage. Des exemples d'application, ici encore utilisant des modélisations sous HEC-RAS, sont aussi proposées.

3.5 Interactions bois flottant et barrages ou seuils

Les évacuateurs de crues sont des équipements stratégiques pour la sécurité des barrages et réservoirs (CFBR, 2013; ICOLD, 2019). Leur dysfonctionnement éventuel peut avoir des conséquences catastrophiques allant jusqu'à la rupture de l'ouvrage. Les témoignages d'interactions inquiétantes entre évacuateurs de crues et embâcles durant certaines crues majeures sont nombreux dans la communauté des gestionnaires d'ouvrages (voir par exemple les cas documentés dans CSB, 2017). L'obstruction de certains évacuateurs a parfois été directement et clairement responsable de la surverse de ces ouvrages (e.g. Figure 3.17).

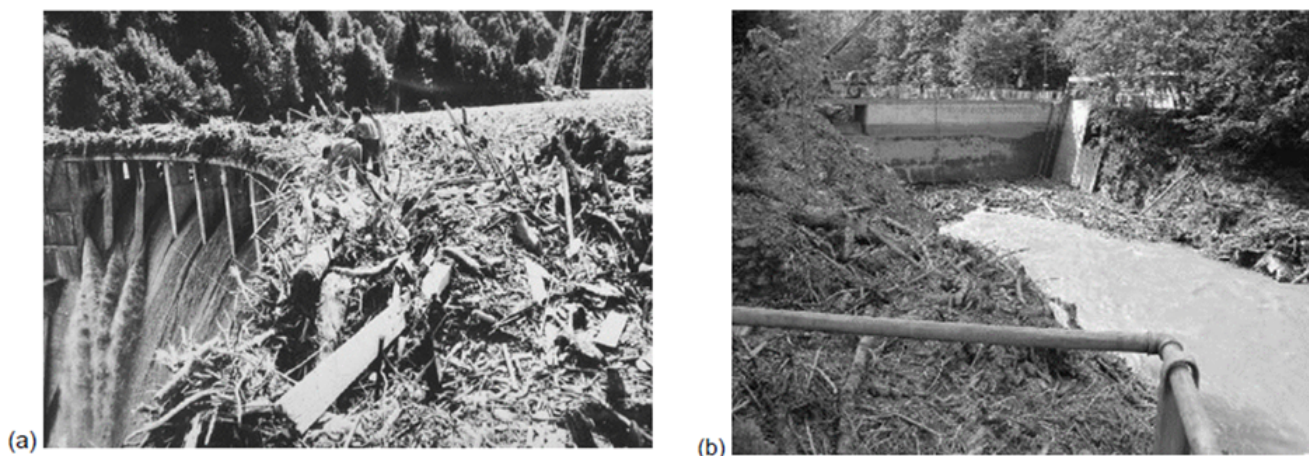


FIGURE 3.17: Obstruction de l'évacuateur de crue du barrage de (a) Palagnedra et (b) Schlattli (sources et © OFEN, 2019)

Les guides et documents de recommandations de conception des évacuateurs de crues mentionnent la problématique des embâcles et leur effet perturbateur. Le Guide CFBR (2013) fournit par exemple des recommandations quant aux tirants d'air à prévoir sur les évacuateurs des sites soumis au risque de bois flottant (Figure 3.18). Toutefois, à l'exception de quelques travaux ponctuels (notamment PFISTER et al., 2013b,a; HARTLIEB, 2012), on manquait jusqu'à récemment d'éléments quantitatifs permettant d'estimer la sensibilité intrinsèque de la retenue et de l'évacuateur (probabilité de formation d'un embâcle, effet de surcote qu'il pouvait générer en amont) ou encore les conditions amenant éventuellement à son relargage par dessus l'évacuateur. Des comités se sont emparés de ce problème (CSB, 2017; ICOLD, 2019) et des travaux de recherche ont été menés ces dernières années sur ces sujets (HARTLIEB, 2017; FURLAN, 2019; PFISTER et al., 2020; BÉNET et al., 2021) aboutissant à des recommandations plus claires. On résume dans la suite de cette section les conclusions principales sur trois sujets : (i) La susceptibilité des principaux types d'évacuateurs de crues à la formation des embâcles; (ii) La probabilité de formation d'un embâcle et les conditions amenant à son éventuel relargage et (iii) Les surcotes induites en amont et la perte de capacité d'évacuation des ouvrages.

La question des dispositions constructives permettant de limiter le risque de formation d'embâcles ou les effets induits sur l'hydraulique de l'ouvrage est abordée en filigrane dans le texte ainsi qu'au Chapitre 4 où l'on donne explicitement quelques exemples de dispositifs (voir aussi CSB, 2017; ICOLD, 2019). En résumé, comme le souligne la Figure 3.19, l'analyse doit conclure à l'une des trois possibilités suivantes :

- L'utilisation en l'état de l'ouvrage permettant le transfert à l'aval des flottants, ceci en connaissance des conséquences potentielles associées au relargage;
- L'adaptation de l'évacuateur de crue pour permettre le transfert à l'aval des flottants, toujours en connaissance des conséquences potentielles associées au relargage;
- Le piégeage volontaire dans la retenue ou en amont en cas de doutes quant à la sécurité de la retenue et du bon fonctionnement de l'évacuateur de crues et / ou de dangers associés au relargage en aval.

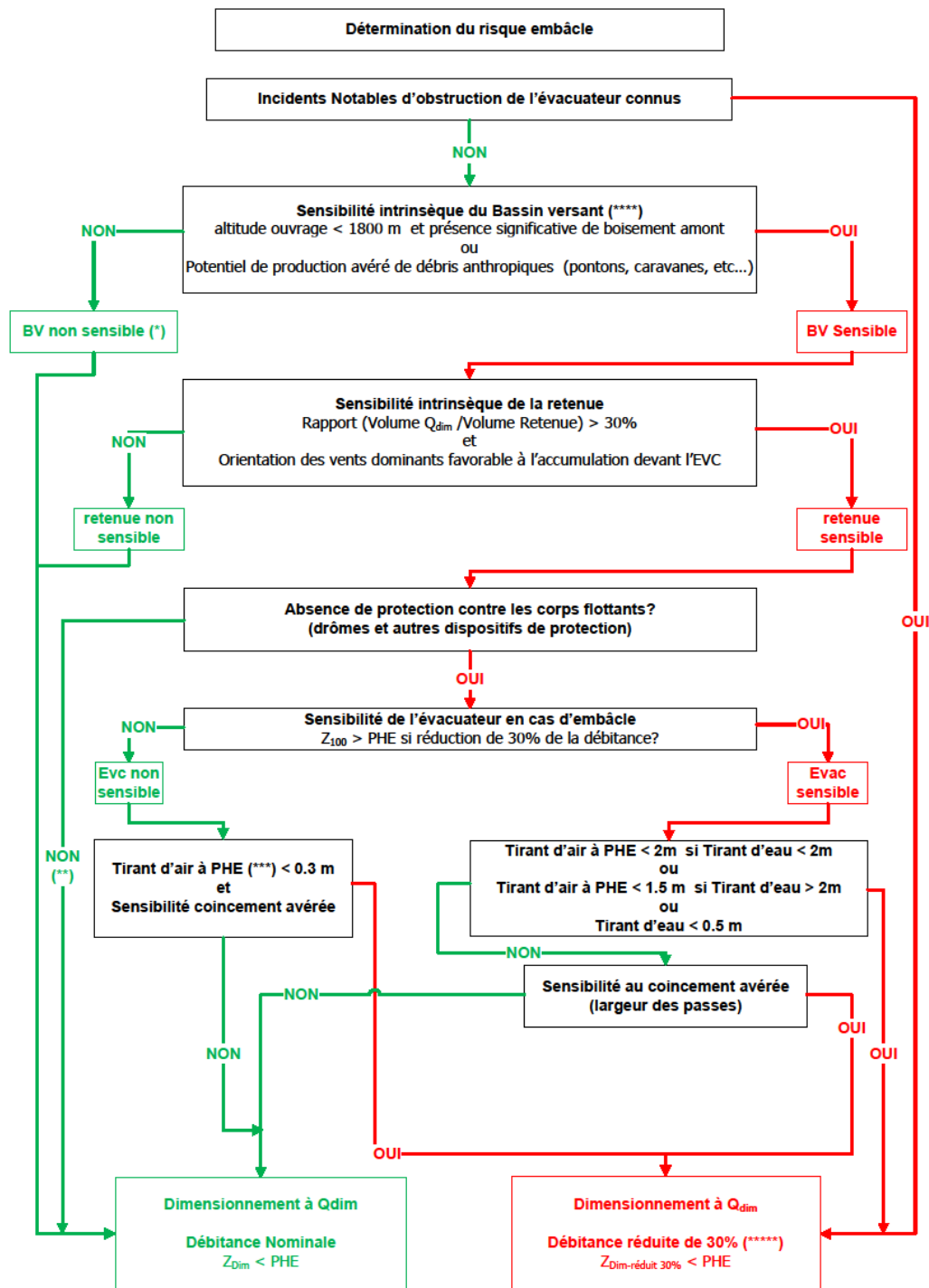


FIGURE 3.18: Logigramme de détermination du risque d’embâcles d’après le Guide CFBR (2013), voir la référence originale pour la définition des variables et les notes associées aux astérisques.

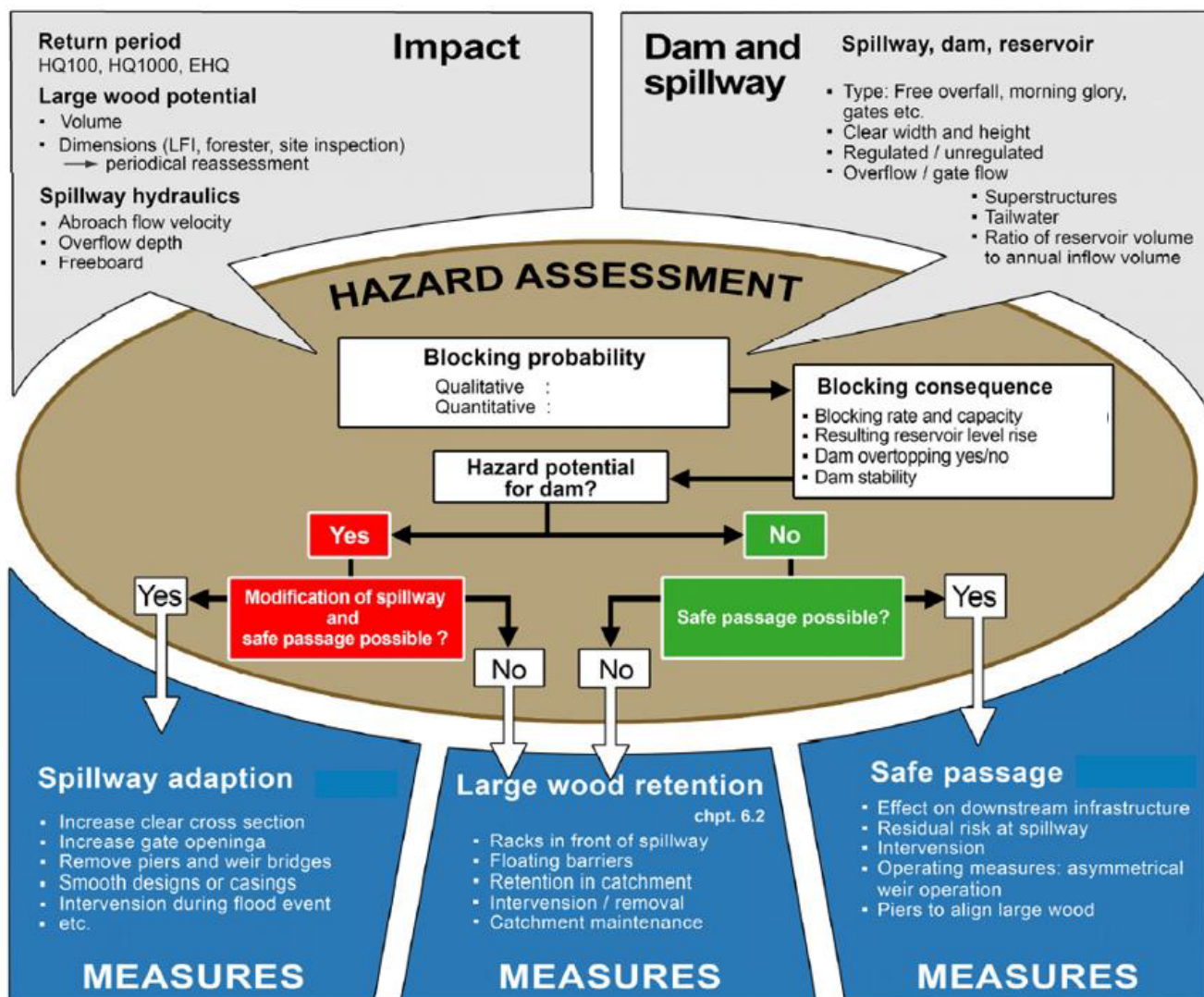


FIGURE 3.19: Diagramme synthétique d’analyse des interactions évacuateur de crue - bois flottant aboutissant à l’une des trois options possibles de gestion : adapter l’évacuateur pour permettre le relargage, piéger le bois flottant, ou laisser le relargage se faire en l’état (source : ICOLD, 2019)

3.5.1 Typologie d’embâcle en fonction des types de seuils

Cinq types d’ouvrages aux modes de fonctionnement différents peuvent être distingués, deux types plus caractéristiques des torrents et trois types plus caractéristiques du contexte fluvial. On se référera aux guides LANGE et BEZZOLA (2006), CFBR (2013), CSB (2017) et ICOLD (2019) pour les ouvrages plus spécifiques tels que les tulipes ou les évacuateurs vannés :

Les ouvrages de stabilisation du profil en long et de correction torrentielle correspondent à des ouvrages remplis de sédiments, à la hauteur de pelle¹ nulle ou négligeable. Ces ouvrages ont des fonctions de lutte contre l’érosion (fixation des profils en long, consolidation de versants, régulation du transport solide, rétention sédimentaire - PITON et al., 2019b). Ils peuvent localement former des points préférentiels de dépôt de flot-

1. Hauteur de pelle : dénivellation entre niveau du lit en amont du seuil et crête du seuil

tants mais sont généralement considérés comme quasi-transparents au transport de bois flottant (PITON et RECKING, 2016).

Les barrages filtrants des plages de dépôt sont des ouvrages équipés d'ouvertures (fentes, grilles, pertuis) et sont dédiés à la gestion du transport solide (rétention, effet tampon, piégeage des flottants et/ou des blocs - PITON et al., 2019a). L'effet des flottants n'ayant en général pas été pris en compte à la conception, ils viennent régulièrement perturber le fonctionnement de ces ouvrages (BEZZOLA et al., 2004). Les dimensions des ouvertures étant généralement d'ordre métrique ou moindre, elles sont inférieures à la longueur caractéristique des flottants transportés dans les torrents ce qui facilite leur obstruction (à l'exception des torrents à lave torrentielle les plus actifs où les flottants sont broyés en petites pièces). Cette obstruction est parfois souhaitable et recherchée puisqu'elle facilite le piégeage sédimentaire (KOULINSKI et RICHARD, 2008). Dans d'autres cas, elle perturbe la continuité sédimentaire d'événements de trop faible magnitude pour générer des dommages et augmente les efforts de surveillance et de maintenance des ouvrages. Les embâcles observés dans les plages de dépôts prennent principalement la forme d'accumulations denses obstruant l'ensemble des ouvertures. Si les débits liquides sont suffisamment importants et la débitance de l'ouvrage suffisamment faible, un tapis de flottants peut se former dans le bassin. Une récente campagne d'essais sur modèles physiques a permis de mieux quantifier les interactions entre flottants et barrages filtrants (PITON et al., 2019c, 2020).

Les seuils et évacuateurs libres (à une seule passe) correspondent à des ouvrages dont la longueur déversante est suffisamment importante pour que les flottants ne puissent pas prendre appui simultanément sur les deux ailes ou bajoyers de l'ouvrage. Le bois flottant est alors retenu par l'ouvrage simplement parce que la hauteur déversante n'est pas suffisante pour faire passer les éléments par dessus ce dernier. Les embâcles formés au droit de ce type d'ouvrage sont généralement des tapis de flottants. Ce type d'ouvrage ne permet normalement pas la formation d'accumulations multi-couches de flottants : les tapis de flottants sont relargués en aval de l'ouvrage avant que les conditions d'écoulement atteignent un hydrodynamisme suffisant (PITON et al., 2020; BÉNET et al., 2021). Le fonctionnement de ces évacuateurs est donc éventuellement perturbé seulement pour des surverses limitées. Les évacuateurs libres sont ainsi les ouvrages les moins sensibles aux problèmes d'embâcles. La transformation d'un évacuateur à passes multiples en évacuateur libre par suppression des piles permet ainsi d'en augmenter significativement la robustesse de fonctionnement (voir par exemple l'adaptation du barrage de Palagnedra dans CSB (2017));

Les évacuateurs à passes multiples (équipés de piles) présentent des comportements très similaires à ceux des ponts équipés de piles. Si la longueur déversante de chaque passe est supérieure à la longueur des bois flottants les plus longs, il faut s'attendre simplement à la formation d'embâcles isolés au droit de chaque pile. Si la longueur des passes est inférieure à la longueur des pièces maîtresses, la formation d'embâcles barrant l'ensemble des passes est probable. Dans ce cas de figure, les conditions de formation des embâcles sont similaires à celles décrites au §3.3.2 (page 59) et illustrées dans la Figure 3.8 : la probabilité de formation d'une accumulation multi-couches dense contre les piles reste possible. En amont, les vitesses d'écoulement chutent rapidement (d'autant plus que la hauteur de pelle est significative) et l'embâcle prend la forme d'un tapis de flottants (BÉNET et al., 2021);

Les déversoirs labyrinthes (PK-weir) présentent des formes 3D optimisant la débitance d'une section donnée de barrage en maximisant la longueur déversante. Un effet collatéral bénéfique est le blocage des flottants contre la partie amont de l'ouvrage; ainsi que le maintien de l'alimentation d'une grande partie de ces seuils via les écoulements passant sous le tapis de flottants. Les PK-weirs sont ainsi des ouvrages plutôt moins sensibles aux embâcles que les seuils "droits" (PFISTER et al., 2013a,b).

Trois nombres adimensionnels principaux sont utilisés dans l'étude des interactions bois flottants - seuils : la longueur de passe relative B_0^* , la hauteur de passe relative H_t^* et la hauteur de surverse relative h^* (Figure 3.20) :

$$B_0^* = \frac{B_0}{L_{BF}} \quad (3.8)$$

$$H_t^* = \frac{H_b}{L_{BF}} \quad (3.9)$$

$$h^* = \frac{h - z_2}{D_{BF}} \quad (3.10)$$

avec B_0 la longueur de passe ou largeur d'ouverture [m], H_b la hauteur de passe [m], h la hauteur d'eau totale [m] et z_2 la crête du seuil [m].

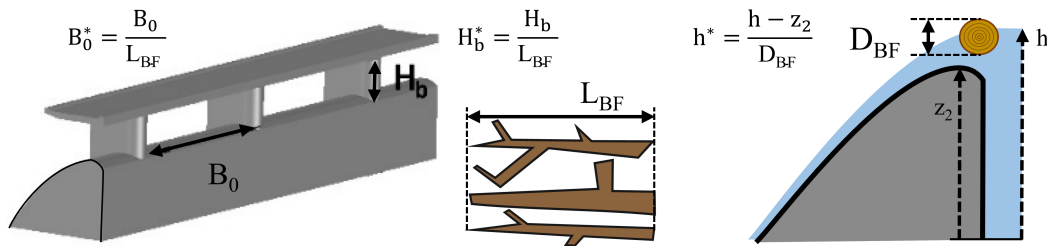


FIGURE 3.20: Définition des paramètres adimensionnels de longueur de passe relative B_0^* , de hauteur de passe relative H_t^* et de hauteur de surverse relative h^* (schéma adapté de CSB, 2017)

3.5.2 Recommandations issues des guides CFBR (2013) et CSB (2017)

Analyse de la longueur déversante et de la hauteur des passes

En complément des éléments sur les tirants d'eau et tirants d'air indiqués dans la Figure 3.18, le Guide CFBR (2013) recommande de respecter la condition $B_0^* > 1$ pour les bassins versants boisés, moins le cas échéant. Les recommandations Suisses du CSB (2017) retiennent la condition un peu moins contraignante $B_0^* > 0.8$ ainsi que $H_t^* > 0.15$ pour les ouvrages respectant $B_0^* > 1.1$ et $H_t^* > 0.2$ le cas échéant. A noter que nous ne connaissons pas de travaux démontrant que la condition $B_0^* > 1$ est associée à une probabilité d'obstruction faible (la valeur pourrait être un peu plus haute). La formation d'accumulations au droit de piles dans un premier temps pourrait être suivie d'accumulations en forme "d'arches" barrant l'ensemble des passes. Ce type d'obstruction sera toutefois moins stable et moins impactant sur la débitance que la présence de grandes pièces positionnées directement en travers des passes.

On considère donc que l'obstruction d'une passe est peu probable quand B_0^* approche puis dépasse une valeur de 1. L'obstruction est au contraire considérée certaine en dessous du seuil $B_0^* \in [0.33; 0.5]$ (pour les râteliers et ouvrages fentes - PITON et RECKING, 2016) et très probable en dessous du seuil $B_0^* = 0.8$ pour les évacuateurs de crues d'après GODTLAND et TESAKER (1994); valeurs citées et confirmées dans PFISTER et al. (2020). Dans l'intervalle intermédiaire, l'obstruction est incertaine. Elle est d'autant plus probable que la quantité de bois flottant est forte. In fine, l'incertitude sur le dimensionnement des passes est plus induite par l'incertitude sur L_{BF} pour les grands éléments de bois flottant (§1.3.3 p. 31) que par le choix de $B_0^* = 1$ ou plus.

Des méthodes d'estimation de la probabilité de blocage sont basées sur des tests sur des modèles physiques tels que HARTLIEB et RUTSCHMANN (2015) :

$$P_{blockage} = \left(\frac{1}{B_0^*} - 0.96 \right) \cdot 0.73 \quad (3.11)$$

Avec $P_{blockage}$ la probabilité de formation d'un embâcle au droit d'un évacuateur de barrage.

Le guide ICOLD (2019) indique d'après les essais de HARTLIEB et RUTSCHMANN (2015) que Le comportement des bois flottants au niveau d'évacuateurs de crues dépendant beaucoup du nombre de Froude dans la zone d'accumulation (et non directement sur le seuil où il est nécessairement proche du régime critique), des corrélations ont été établies (pour des troncs dont la densité variait de 800 kg/m^3 à 975 kg/m^3) :

- $Fr < 0.15$: engendre la formation d'un tapis épars de flottants ;
- $Fr > 0.30$: l'accumulation est alors multi-couche, les bois flottants ayant tendance à être entraînés sous le tapis initial, diminuant la débitance de l'évacuateur de crue ;
- $0.15 < Fr < 0.30$: la densité de bois flottant est dans ce cas le facteur principal pour déterminer si ces troncs coulent ou non.

Ces résultats sont cohérents avec une analyse du nombre adimensionnel Π/F_D (Eq. 3.4) qui, dans les conditions d'écoulements utilisés par HARTLIEB et RUTSCHMANN (2015, caractérisé notamment par des valeurs de $D/h_0 = 0.05 - 0.2$) passe bien d'une valeur $\Pi/F_D > 1$ (caractéristique d'un régime d'accumulation sous forme de tapis de flottant) pour $Fr < 0.15$ à une valeur $\Pi/F_D \lesssim 1$ (caractéristique d'accumulations multi-couches) pour $Fr > 0.3$.

Condition de relargage

Dans les conditions où le seuil peut être considéré comme large ($B_0^* \gg 1$), les essais montrent que le relargage des flottants apparaît pour $h^* > 1.7$ et se généralise pour $h^* > 3$ (ZOLLINGER, 1983; ICOLD, 2019; FURLAN, 2019; PFISTER et al., 2020). Le relargage partiel (probabilité de blocage de 50%) pour $h^* \approx 1.5$, puis généralisé pour $h^* > 3$ (probabilité de blocage nulle) a été confirmé sur les déversoirs labyrinthes (PK-weirs) par PFISTER et al. (2013a). Les mêmes auteurs démontrent qu'en présence d'éléments pourvus de branches ou de racines, en calculant h^* toujours avec le diamètre du tronc, la probabilité de blocage reste de l'ordre de 50% pour $h^* \approx 3$ et devient nulle pour $h^* \approx 10$. Si par contre on utilise le diamètre des racines ou de la couronne de branche, les relargages ont bien lieu pour $h^* > 3$.

Sur un seuil trapézoïdal de largeur intermédiaire ($B_0^* \approx 1$), PITON et al. (2020) ont observé la formation d'embâcles se reposant sur les ailes et la formation d'arches temporaires entre les éléments de bois flottants. Les relargages avaient alors lieu dans la gamme $h^* \in [2; 5]$. La forme trapézoïdale facilite le relargage pour les hauts débits puisque B_0^* augmente quand le niveau de la surface libre monte.

En synthèse, pour de faibles hauteurs de déversement ($h^ \lesssim 1.5$), les flottants restent bloqués dans tous les seuils. Pour de forts déversements ($h^* > 3$), les relargages sont certains, sauf si la longueur des passes est inférieure à celle des grands troncs et que ces derniers prennent appui sur les côtés de l'évacuateur. Dans ce cas de figure, les incertitudes sont fortes. Plus l'écoulement sur l'ouvrage est important, plus les contraintes hydrodynamiques sur les pièces maîtresses retenant l'accumulation sont fortes et plus il devient probable que l'embâcle soit relargué. La résistance mécanique des très gros troncs reste toutefois parfois suffisante pour survivre à des débits très importants.*

3.5.3 Surcotes liées aux embâcles sur les évacuateurs de crues

En cas de présence d'embâcles, le Guide CFBR (2013) suggère d'estimer la surcote induite en appliquant un taux d'obstruction de 30% (Figure 3.18). La référence originale citée dans le guide date de 1994 et spécifie que cette valeur est arbitraire. Depuis lors, plusieurs travaux se sont intéressés aux surcotes observées en amont de seuils et d'évacuateurs (Tableau 3.3).

Le débit Q [m^3/s] passant sur un ouvrage constitué de N [-] seuils de largeur B_0 [m] à parois verticales peut être estimé par une équation de la forme générale :

$$Q = \mu \cdot N \cdot B_0 \sqrt{2 \cdot g \cdot (h_0 - z_2)^3} \quad (3.12)$$

avec μ le coefficient de seuil [-], g l'accélération de la gravité [9.81 m/s^2] et h_0 la hauteur d'eau [m].

TABLE 3.3: Surcote et perte de débitance des seuils et évacuateurs

Type de seuil	Mesure de protection	Surcote $\frac{\Delta h}{h_0 - z_2}$ [-]	Perte de débitance ΔQ^* [%]	$\frac{V_{BF}}{B_0 h_0^2}$ [-]	Remarque	Source
Seuil mince	Sans	0.05-0.4	7% - 40%	0.3-1	Seuil trapézoïdal avec $B_0^* \approx 1$	PITON et al. (2020)
Seuils profilés libres	Sans	0.0-0.29	0% - 32%	1-68	Relarage pour $h^* > 3$	PFISTER et al. (2020)
Passes multiples	Sans	0.0-0.29	0% - 32%	1-68		PFISTER et al. (2020)
Passes multiples	Têtes de piliers en dépassement	0.02-0.17	3% - 21%	12-522	Forts V_{BF}	PFISTER et al. (2020)
Passes multiples	Râtelier en amont	0.0-0.06	0% - 8%	1-189		PFISTER et al. (2020)
Passes multiples	Sans	0.0-0.3	0% - 33%	2-15		FURLAN (2019)
Passes multiples	Sans	0.05-0.5	7% - 46%	0.4-0.7	Faibles V_{BF}	HARTLIEB (2017)
PK-weir	Sans	0.0-0.2	0% - 24%	0.2-80	$\frac{\Delta h}{h_0} \approx 0.6$ pour de très faibles débits	PFISTER et al. (2013b)

Noter que cette équation fait l'hypothèse que la hauteur d'eau est proche de la hauteur de charge : $h \approx H = h + \frac{u^2}{2g}$ avec u la vitesse de l'écoulement [m/s]. Cette hypothèse reste raisonnable pour des écoulements dont le nombre de Froude est tel que $Fr = \frac{Q}{\sqrt{gh^3b^2}} \lesssim 0.3$ avec une précision de $\pm 5\%$ sur le calcul de la hauteur d'eau².

L'effet des flottants peut être pris en compte à travers un paramètre de perte de débitance ΔQ^* [-] ou à travers un paramètre de surcote relative $\frac{\Delta h}{h_0 - z_2}$ [-] en réarrangeant l'équation sous la forme :

$$Q = (1 - \Delta Q^*) \cdot \mu \cdot N \cdot B_0 \sqrt{2 \cdot g \cdot (h - z_2)^3} = \mu \cdot N \cdot B_0 \sqrt{2 \cdot g \cdot \left(\frac{h - z_2}{1 + \frac{\Delta h}{h_0 - z_2}} \right)^3} \quad (3.13)$$

Notez que dans les deux formes de l'équation, l'effet réducteur du paramètre ajouté est compensé par le remplacement de h_0 par h , la hauteur d'eau en présence d'embâcle [m] et $h > h_0 \Leftrightarrow \frac{\Delta h}{h_0 - z_2} > 0 \Leftrightarrow \Delta Q^* > 0$. La connaissance de ΔQ^* permet de déduire $\frac{\Delta h}{h_0 - z_2}$ et inversement via³ : $(1 - \Delta Q^*) = \sqrt{\left(\frac{1}{1 + \frac{\Delta h}{h_0 - z_2}} \right)^3}$. Il est possible d'utiliser l'un ou l'autre suivant que la question porte sur la réduction de débitance ou sur la surcote liée aux flottants.

Les mesures de protections testées par PFISTER et al. (2020) et BÉNET et al. (2021) correspondent à :

Des têtes de piliers dépassant en amont de l'évacuateur sur une longueur de l'ordre de 25% ou 50% de la hauteur de charge de dimensionnement. La surcote sans cette mesure $\frac{\Delta h}{h_0 - z_2} \in [0.05; 0.29]$ passe à $[0.02; 0.17]$ pour le premier dépassement puis à $[0.02; 0.05]$ pour le second. Maintenir le tapis de flottants en amont de l'évacuateur à une distance de l'ordre de la moitié de la charge de dimensionnement permet donc d'améliorer significativement ses conditions d'alimentation (diminution des surcotes d'un facteur 2 à 4).

2. En faisant une hypothèse de canal rectangulaire, $H = h + \frac{u^2}{2g} = h + \frac{Q^2}{2gh^3B^2} = h \left(1 + \frac{Q^2}{2gh^3B^2} \right) = h \left(1 + \frac{Fr^2}{2} \right) \leq 0.05$ si $Fr \leq 0.3$.

3. A noter que cette conversion est valable pour les lois de seuils. La puissance trois sous la racine carré disparaît pour les lois d'orifices.

Un râtelier formé de pieux verticaux disposés au droit de chaque pilier à une distance en amont de l'évacuateur égale à la moitié de la longueur des passes (correspondant à 58% ou 111% de la charge de dimensionnement, deux longueurs de passe ayant été testées). La première disposition permet de limiter les surcotes à la gamme [0.01; 0.05] et la disposition plus éloignée à la gamme [0.0; 0.06] (pas d'amélioration significative).

En synthèse, les surcotes en amont des seuils et évacuateurs de surface mesurées sur plusieurs campagnes de modélisation physique indépendantes varient généralement dans la gamme [0.05; 0.3] pour des débits évacués significatifs (le double au début du phénomène de surverse). On notera que le paramètre de volume de bois flottant V_{BF} n'est pas impliqué dans l'équation (3.13). L'approche fait donc implicitement l'hypothèse que les apports sont suffisants pour saturer l'ouvrage. Les campagnes d'essais ayant étudié l'effet de V_{BF} sur les surcotes montrent une corrélation positive pour de faibles volumes (PFISTER et al., 2013b,a). Toutefois, une fois le volume suffisant pour former un tapis de flottants occupant l'ensemble de la zone amont à l'ouvrage, l'augmentation du volume de flottants génère une croissance de la surface du tapis de flottants, sans effet significatif sur la débitance de l'ouvrage (BÉNET et al., 2021), en cohérence avec les éléments décrits au §3.3.2.

Chapitre 4

Mesures de protection contre les embâcles

Guillaume PITON¹, Swann BENAKSAS¹, Margaux QUINIOU²

¹ Univ. Grenoble Alpes, INRAE, UR ETNA, 2 rue de la Papéterie, 38402 St-Martin-d'Hères - FRANCE.

² ISL Ingénierie, 15 rue du Maréchal Harispe, 64500 Saint-Jean-de-Luz - FRANCE.

Des mesures d'ordre organisationnel, d'entretien et des mesures structurelles (ouvrages) permettent de limiter les risques liés aux embâcles. SCHMOCKER et WEITBRECHT (2013) proposent un récapitulatif des différentes méthodes pour diminuer l'impact des embâcles sur les structures, dans la Figure (4.1). Ce chapitre présente des éléments sur les mesures physiques, avec plus ou moins de détail. Les mesures d'ordre administratif ne sont pas décrites dans le présent guide.

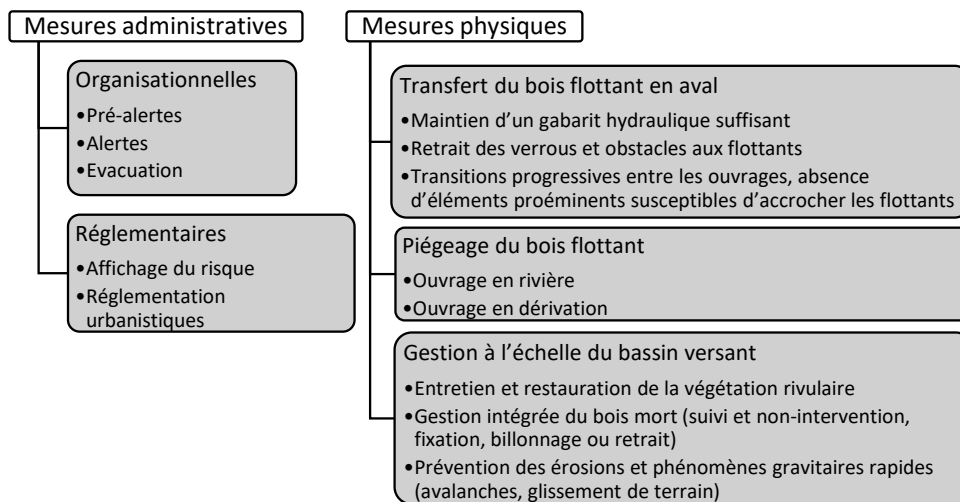


FIGURE 4.1: Récapitulatif des différents types de méthodes employées pour limiter l'impact des bois flottants sur les structures (adapté et traduit de SCHMOCKER et WEITBRECHT, 2013)

4.1 Transfert du bois flottant en aval

Adaptation des ponts *Il est utile de souligner en premier lieu que le bois flottant ne pose pas de problème intrinsèque, c'est au contraire une composante bénéfique des milieux aquatiques et terrestres. C'est donc l'interaction du bois flottant avec certains ouvrages et enjeux qui pose problème. L'adaptation des verrous hydrauliques est donc la solution la plus efficace pour résoudre les problèmes associés aux embâcles. En particulier, quand ces derniers sont concentrés sur un seul ouvrage, un pont avec pile centrale par exemple, son remplacement par un ouvrage transparent aux flottants est la solution la plus sûre et la plus efficace (tel que l'exemple de la Figure 4.2).*



FIGURE 4.2: Pont Mezet sur l'Isère à Moûtiers (Savoie) : l'ouvrage historique avait une pile centrale (photo de gauche), il a été remplacé par un pont à travée unique (photo de droite © Regis BOUCHU/ Actophoto, photo issue de <http://www.osonsbtp.fr/>). Les analyses hydrauliques montraient que l'ouvrage historique permettait le passage de la crue centennale (sans revanche, avec mise en charge de l'ouvrage et en ignorant l'effet de potentiel embâcle). Malgré sa capacité hydraulique théoriquement suffisante, la cartographie du PPR considérait un scénario d'embâcle du pont, de rehausse des lignes d'eau amont et de débordement généralisé dans le centre ancien. La traversée de Moûtiers par l'Isère est équipée de plusieurs ponts mais celui-ci était le seul à être équipé d'une pile centrale et à être en charge pour la crue de référence. Il a donc été décidé de remplacer l'ouvrage par un ouvrage moins sensible aux embâcles. Le coût des travaux a été de l'ordre de 1 000 000 €HT pour ce pont de 24 m de portée, 12 m de large, supportant le passage de convois exceptionnels.

Pont mobile dont la cote de sous poutre peut être surélevée comme sur l'exemple de la Figure (4.3).



FIGURE 4.3: Pont mobile pour permettre le passage de bois flottants (source : GERTSCH, 2019)

Défecteurs au droit des piles de ponts . Ces aménagements sont constitués de piliers ou de voiles implantés à l’amont direct des piles de ponts ou des dalots (Fig. 4.4). Ils visent éventuellement à diminuer la probabilité de formation d’un embâcle au niveau d’une pile de pont (bien que leur efficacité en ce sens soit remise en question, KIM et al., 2016 ; SCHALKO et al., 2019c). Ces aménagements ont vraisemblablement plutôt comme effet de réorienter les bois flottants pendant un certain temps, ensuite ils permettent surtout la formation d’embâcles moins denses et localisés à des endroits moins dommageables que si ils se formaient directement contre les ponts et dalots (LANGE et BEZZOLA, 2006).

Des dispositifs rotatifs ("debris sweeper"), entraînés par le courant, sont décrits dans BRADLEY et al. (2005). Les retours d’expériences de JOHNSON et SHEEDER (2013) montrent que de nombreux exemplaires ont été ruinés par les impacts et accumulations de flottants. Les nouvelles générations, plus robustes, présenteraient moins de problèmes. En présence de bois flottants de forme complexe ou d’un paquet de flottants, ces dispositifs risquent tout de même très probablement de piéger des flottants et une fois une pièce maîtresse arrêtée, le processus de formation d’un amas est engagé.

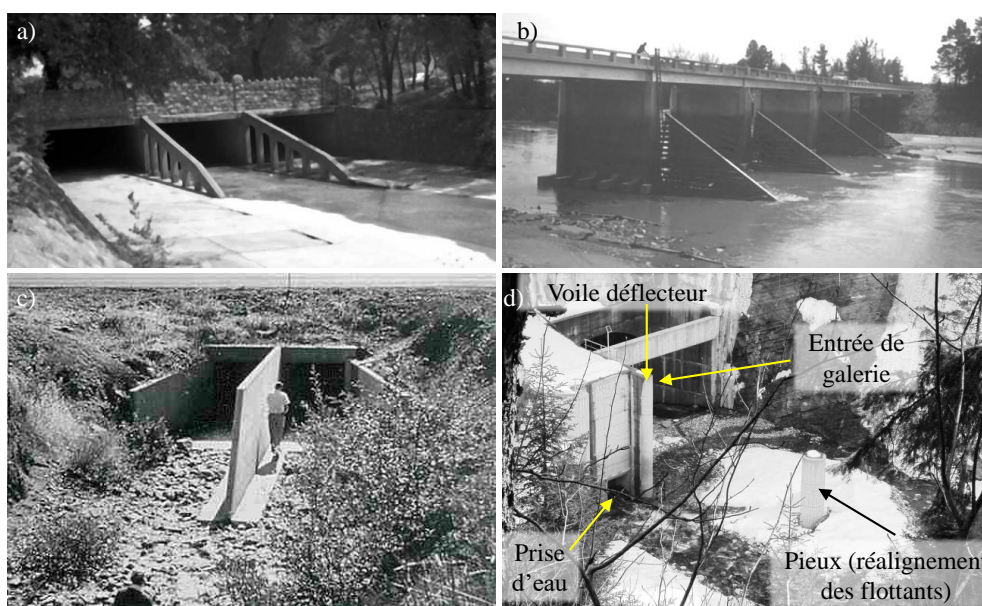


FIGURE 4.4: Défecteurs à bois flottant, images tirées de BRADLEY et al. (2005) sur des ponts (a et b), sur un dalot (c) et de LANGE et BEZZOLA (2006) au droit d’une prise d’eau (d)

Adaptation des seuils et barrages Comme décrit dans le §3.5, le transfert du bois flottant à l’aval des seuils et barrages est souvent souhaitable. Des adaptations des seuils et barrages en ce sens sont possibles de façon analogue à celles identifiées sur les ponts dans les paragraphes précédents : ouvrages mobiles, défecteurs et retrait des piles (Fig. 4.5).



FIGURE 4.5: Adaptation de l’évacuateur de crue du barrage de Palagnedra (Suisse) : a) obstruction généralisée, surverse et contournement de l’ouvrage lors d’apports massifs en flottants en 1978 ; b) nouvelle configuration de l’ouvrage dont les piles ont été découpées (Photos de Ofima tiré de CSB, 2017)

4.2 Piégeage du bois flottant

4.2.1 Ouvrages en rivière

Bien qu'encore faiblement développée en France, la mise en place de structures de rétention pour réduire le risque de blocage des bois flottants en aval est une solution éprouvée dans d'autres pays (Japon, Italie, Suisse). Sur des sites très vulnérables, il peut être justifié de mettre en oeuvre plusieurs structures de rétention en série pour augmenter la probabilité de piéger des flottants et pour séparer le bois des autres débris (COMITI et al., 2016). De nombreuses structures de rétention ont été proposées afin de piéger et retenir les bois flottants dans un secteur donné. Les principales structures de rétention sont décrites dans les sections qui suivent. Les différents types d'ouvrages sont documentés de façon variée, en fonction de la disponibilité de travaux scientifiques décrivant le fonctionnement de ces ouvrages. Dans la plupart des ouvrages, en particulier pour les plus expérimentaux, on manque encore de critères de conception complémentaires basés sur des études paramétriques rigoureuses. Il a néanmoins semblé utile de présenter un large panel de stratégies afin de pouvoir servir d'inspiration aux concepteurs d'ouvrages en rivières : à eux de définir les méthodes à mettre en oeuvre pour affiner la conception à toutes les spécificités du site étudié (conception empirique, étude sur modèle physique, modélisation numérique directe ou détournée). Les ouvrages les plus classiques ont par contre fait l'objet de travaux scientifiques. Dans ce cas, les descriptions fournies dans les sections synthétisent les critères de conception disponibles. Sur les sites complexes ou très sensibles, la mise en oeuvre de modèles physiques permet évidemment une conception plus fine (COUVERT et LEFEBVRE, 1994 ; KOULINSKI et RICHARD, 2008 ; SCHMOCKER et HAGER, 2013).

Avant propos : Évènements à étudier lors de la conception

Nous recommandons d'étudier le mode de fonctionnement des pièges à embâcles selon plusieurs scénarios d'évènements de magnitude variable (Figure 4.6). La terminologie utilisée est celle déjà utilisée dans les études des évacuateurs de crues de barrages qui caractérisent les évènements de projet, de sûreté et de danger (ROYET et al., 2010), déclinée aux barrages écrêteurs (DEROO et al., 2016) ainsi qu'aux ouvrages de correction torrentielle avec l'ajout des évènements de routine qui posent la question de l'entretien (CAMIRÉ et al., 2019).

Évènements de routine Les évènements de routine correspondent aux crues de magnitude suffisamment faible pour ne pas générer d'aléas dans les zones à enjeux. Il est utile d'étudier le mode de fonctionnement de l'ouvrage pour ces derniers afin d'anticiper les modalités et la fréquence de l'entretien courant. Idéalement, l'ouvrage devrait être transparent aux flux solides (bois et sédiments) pour les évènements de routine. L'étude de ces derniers porte donc sur la question de l'initiation du piégeage.

Évènements de projet Pour les évènements de projet, l'ouvrage doit pleinement remplir sa fonction de piégeage, avec une certaine marge de sécurité (revanche).

Évènements de sûreté Les évènements de sûreté sont utilisés pour la conception des organes de sécurité de l'ouvrage. L'étude des évènements de sûreté sur les pièges à embâcles pose notamment la question de la surverse par dessus l'ouvrage. Elle vise à caractériser la revanche disponible avant le relargage probable des flottants (défaillance de la fonction de piégeage).

Évènements de danger Par définition, pour des magnitudes supérieures ou égales à celles des évènements de danger, la stabilité de l'ouvrage n'est plus garantie et sa ruine devient possible. L'évènement de danger est souvent caractérisé par une cote de danger "*au-delà de laquelle l'ouvrage risque de subir des dégâts majeurs pouvant conduire rapidement à la rupture. L'atteinte de cette cote constitue un état-limite ultime pour l'ouvrage*" (ROYET et al., 2010). Son étude permet de sensibiliser les concepteurs et les gestionnaires sur les modalités de ruine des ouvrages. Elle permet souvent de mettre en place de petites adaptations diminuant significativement la probabilité d'un mode de rupture, par exemple via la prévention du contournement par des ailes centrées l'écoulement et bien ancrées dans les berges.

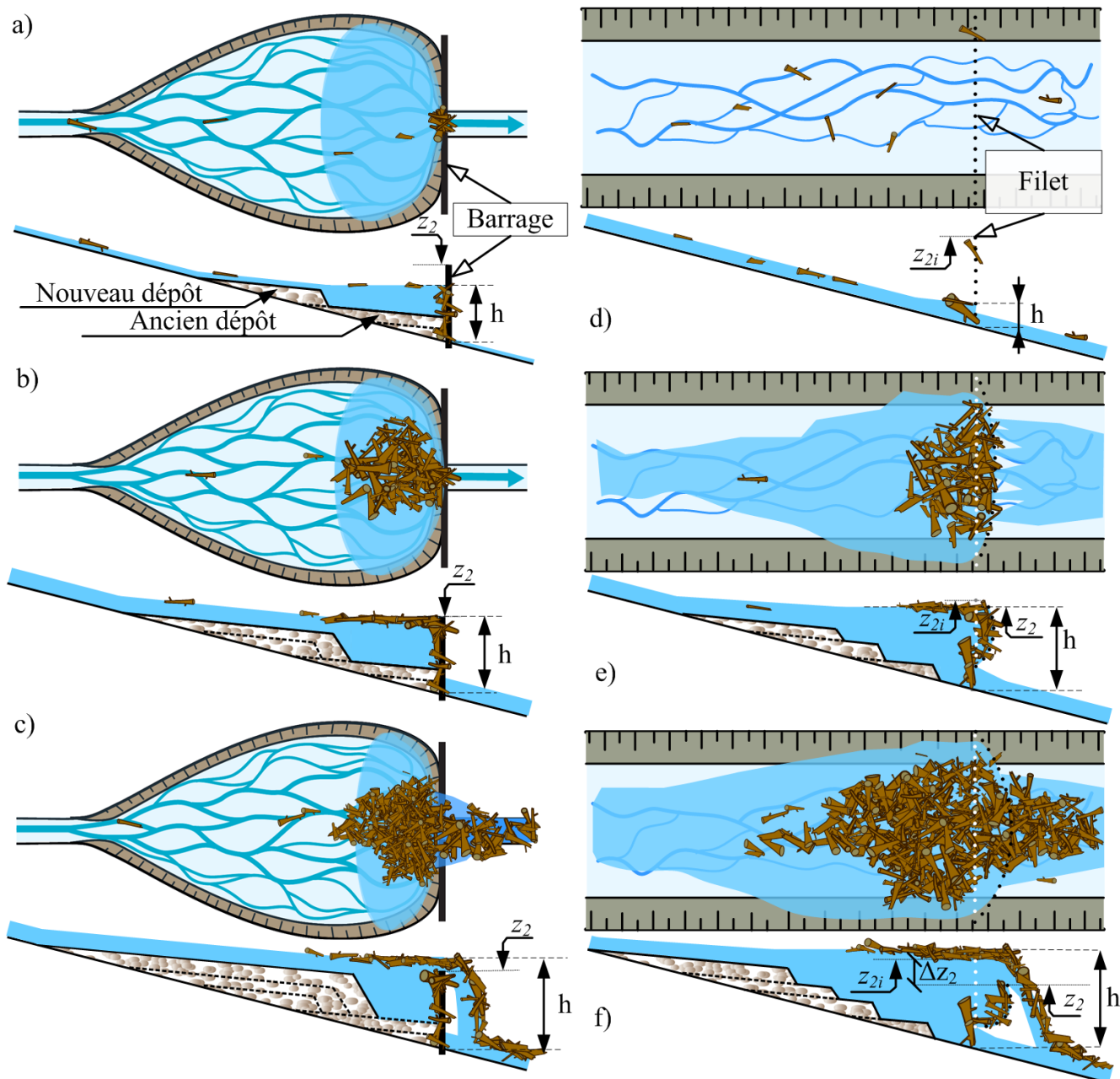


FIGURE 4.6: Définition des paramètres et principaux modes de fonctionnement d'ouvrages de piégeage des flottants : Ouvrage rigide, a) phase initiale de piégeage (Évènement de routine), b) phase de piégeage développé, niveau d'écoulement à la crête de l'ouvrage (Évènement de projet), c) éventuelle phase finale avec surverse et relargage du tapis de flottants (Évènement de sûreté); même phases dans un ouvrage souple : d) phase initiale de piégeage (Évènement de routine), e) phase de piégeage développé, niveau d'écoulement à la crête de l'ouvrage abaissé par le chargement progressif de l'ouvrage (Évènement de projet), f) phase finale de relargage facilitée par l'abaissement de la crête du filet mais retardée par la forte perméabilité de la structure (Évènement de sûreté).

Conception des dispositifs de protection des seuils et évacuateurs de crue

Des dispositifs visant à piéger les flottants dans les retenues des barrages et réservoirs ont été testés.

Râtelier sur barrage / Cage d'écureuil Des ouvrages en béton armé ou métalliques sont régulièrement mis en place en amont d'évacuateurs de crues. Des configurations initiales situées à proximité trop directe du seuil et ne permettant pas d'étaler le tapis de flottants (par exemple celle de la Figure 4.7a) ont été reconstruites plus larges et déportées (même ouvrage sur la Figure 4.7b). HARTLIEB et RUTSCHMANN (2015) fournissent d'autres exemples bien documentés, y compris des modélisations physiques. Les performances de limitation de la rehausse des lignes d'eau indiquées au §3.5.3 ont été testées sur des râteliers similaires à ceux de la Figure 4.7c-d. Le guide du CSB (2017, p. 43) recommande de dimensionner les râteliers de manière à limiter les vitesses d'approche à moins de 1 m/s. Sur des configurations frontales telles que illustrées Figure 4.7c-d, PFISTER et al. (2020) recommandent d'aligner les piliers du râtelier sur la position des piles de l'évacuateur. L'idée générale étant que les flottants passant entre les piliers du râteliers sont correctement alignés pour passer les passes de l'évacuateur.



FIGURE 4.7: (a) Ancien évacuateur de crue avec grand râtelier à Grüntensee et (b) nouveaux piliers de râtelier en amont (© HARTLIEB et RUTSCHMANN, 2015); (c & d) Grand râtelier 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), toutes les images sont tirées du guide CSB (2017)

Siphon / cloisons de partition / paroi d'écumage Cette structure installée en amont d'un seuil retient le bois flottant à une certaine distance. C'est une extension du concept du râtelier avec une porosité nulle ou faible (Figure 4.8). Ce type d'aménagement aura un taux d'interception plus élevé qu'un râtelier et est donc dédié à des sites ou ouvrages plus sensibles. LANGE et BEZZOLA (2006) retiennent comme critère de conception un écartement permettant de limiter la vitesse d'approche à 1.4 m/s, pour éviter l'aspiration de troncs, qui pourraient bloquer le passage. Le niveau inférieur de la paroi du siphon est calé à 1 m sous la crête de l'évacuateur et son niveau supérieur à 0.5 m au dessus du niveau des plus hautes eaux. Ce type d'aménagement peut aussi être adapté sur des seuils ou plages de dépôts. BEZZOLA et al. (2004) retiennent les critères de conception suivants : (i) hauteur d'eau amont minimale de 2 m; vitesse d'écoulement moyenne admissible en amont du siphon de 0,8 m/s et vitesse d'écoulement moyenne admissible dans la section la plus étroite de 1,7 m/s (Figure 4.9). Ces valeurs sont cohérentes avec une approche par le nombre Π/F_D (Eq. 3.4).

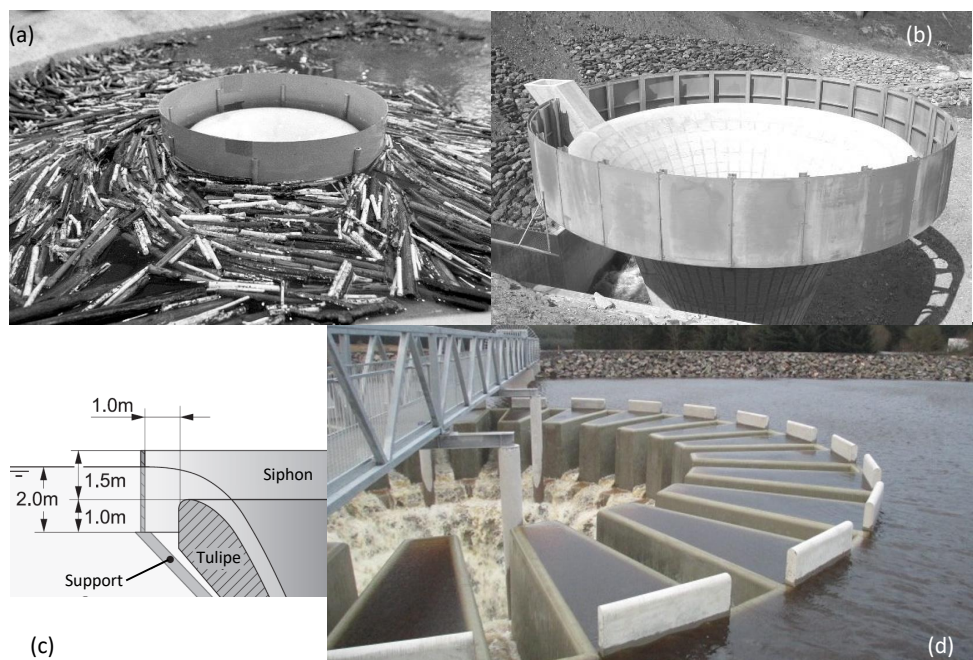


FIGURE 4.8: Exemple de siphons sur des évacuateurs de crues : a) modèle physique d'un siphon sur un évacuateur tulipe et b) ouvrage réel sur la Kelchbach à Naters (Suisse), diamètre d'environ 14 m, c) coupe type (source : LANGE et BEZZOLA, 2006), siphons équipant le PK-weir de Black Esk (Royaume-Unis, source : ICOLD, 2019)

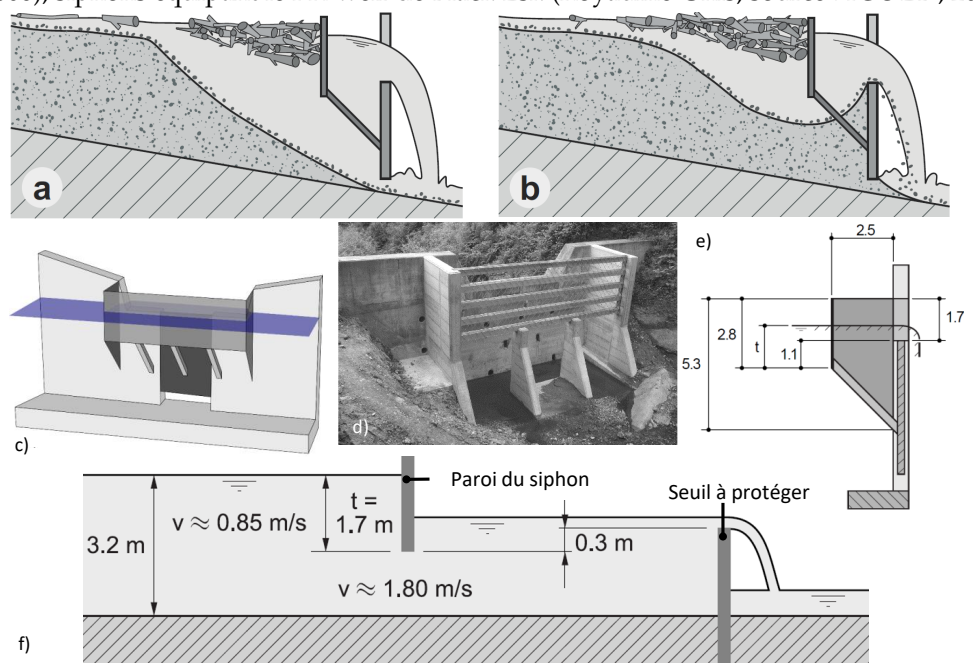


FIGURE 4.9: Siphons équipant des seuils en rivière : a) faciès de dépôt sur ouvrage équipé d'un orifice de fond, b) faciès de dépôt si absence ou obstruction de l'orifice de fond, c) schéma 3D, d) photo d'un ouvrage réel où la paroi du siphon est un filet metalique sur le Bitzighoferbach (Suisse), e) coupe type exemple et f) dimensions retenues pour le siphon équipant le piège à flottant du Gürbe près de Wattenwil (Suisse), toutes les images sont tirées de BEZZOLA et al. (2004) et LANGE et BEZZOLA (2006)

Drome /barrages flottants Ce type de structures (Figure 4.10) peut être utilisé pour retenir ou dévier les flux de bois flottants dans des zones d'écoulement très lent (lac, fleuve). Leur efficacité nécessite de prendre en compte plusieurs facteurs, comme la quantité et le type de bois flottant, les niveaux d'eau maximaux et minimaux, ou encore les régimes de vents qui tendent à influencer les zones d'accumulation préférentielles des tapis de flottants. Le guide du CSB (2017, p. 46–49) fournit un certain nombre de recommandations vis-à-vis de leur usage. Ce type de barrière présente des inconvénients et des limites. Les bois flottants peuvent par exemple passer sous ces barrières flottantes, surtout si le bois a séjourné dans l'eau pendant une longue période, et présente une forte densité. Des dromes équipées de râteliers immergés existent pour palier au problème de contournement par en-dessous (Figure 4.10c–d). Le guide du CSB (2017, p. 75–78) rapporte aussi un exemple de rupture d'une drome en amont d'une prise d'eau en lac (rupture des ancrs qui maintenaient la drome éloignée de l'évacuateur).



FIGURE 4.10: Exemples de barrages flottants : a) boudins flottants (source : ICOLD, 2019) ; b) drome installée en amont du barrage de Sainte-Cécile-d'Andorge (© ISL Ingénierie) ; et drome équipée de râtelier pour éviter les contournements par en-dessous : c) à terre, et d) en place (photos © H. Czery, fournies dans CSB, 2017, p. 48)

Conception des barrages souples

Dans cette sous-section et pour l'ensemble des ouvrages couverts dans ce chapitre, des critères sont normalement fournis pour les trois modes de fonctionnement correspondant aux trois types d'évènements introduits dans la section précédente et illustrés dans la Figure 4.11 pour le cas des barrages souples.

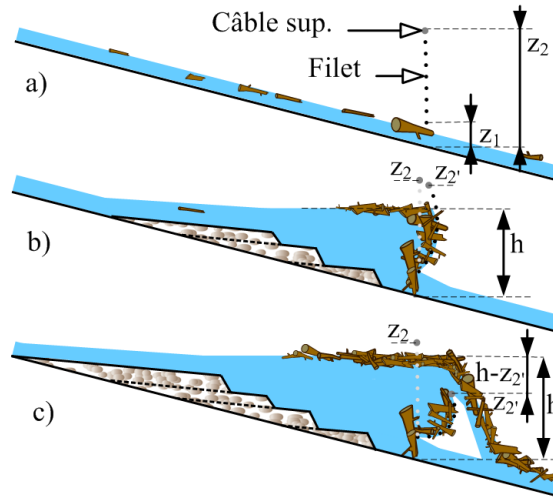


FIGURE 4.11: Représentation schématique des trois phases de fonctionnement d'un barrage souple : (a) initiation du piégeage à la transition entre évènements de routine et évènements de projets; (b) rehausse des lignes d'eau pendant la phase de piégeage total correspondant aux évènements de projet; et (c) relargage, défaillance de la fonction de protection pour des évènements de surtête ou de danger

Hauteur d'ouverture basale En fonction du débit à partir duquel on cherche à initier le piégeage et de la variabilité du diamètre des flottants D_{BF} , il faut étudier l'effet du calage de la cote basse du barrage souple z_1 sur la probabilité de blocage. Cette probabilité de blocage a été étudiée expérimentalement pour des **troncs évoluant individuellement** (PITON et al., 2022). Ces probabilités de blocage individuelles ne sont donc pas assimilables à des taux de piégeage d'un grand nombre de flottants. Une fois le piégeage initié par quelques troncs bloqués, ces derniers forment des obstacles aux autres éléments et le taux de piégeage devient presque total. Il est donc acceptable de dimensionner des ouvrages avec des probabilités de piégeage peu élevées.

Des valeurs de $P_{blockage} \in [10\%; 50\%]$ signifient simplement que, en moyenne, le piégeage débutera après le passage de 2 à 10 flottants. La probabilité de blocage pour des flottants transportés en "paquets" n'a pas été estimée. Selon la littérature sur le phénomène d'embâchement des ponts, il est raisonnable d'estimer que la probabilité de blocage de tels paquets augmente très significativement par rapport aux pièces transportées individuellement (d'un facteur 10 par exemple dans les tests de GSCHNITZER et al., 2017).

Des tests ont été menés sur des pentes de 2%, 4% et 6%. Les résultats montraient que tant que le niveau d'écoulement était inférieur au premier câble du filet, la probabilité de piégeage était nulle ($P_{blockage} = 0$ pour $h < z_1$). Le blocage apparaît ensuite progressivement. Les flottants plus longs se bloquent plus souvent que les courts, de même que les flottants de plus gros diamètre. Afin de généraliser le critère, un nombre adimensionnel a été introduit. Ce dernier est basé sur la hauteur critique d'écoulement h_c estimée selon une hypothèse de section rectangulaire de largeur B_0 ($h_c = \left(\frac{Q}{\sqrt{g \cdot B_0^2}}\right)^{2/3}$), la hauteur d'ouverture basale (z_1) et le diamètre des flottants D_{BF} :

$$z_1^* = \frac{h_c - z_1}{D_{BF}} = \frac{\left(\frac{Q}{\sqrt{g \cdot B_0^2}}\right)^{2/3} - z_1}{D_{BF}} \quad (4.1)$$

Cette formulation permet de rendre le critère indépendant de la pente (Figure 4.12a). Deux régimes ont été mis en évidence : (i) les éventuels flottants dont le diamètre est supérieur à z_1 se bloquent très probablement ; tandis que (ii) les flottants de diamètre inférieur se bloquent un peu moins probablement (Figure 4.12b-c). Un effet de la longueur des flottants est toujours visible : la probabilité de blocage des flottants longs est plus forte comparée à celle des flottants plus courts. La longueur des flottants varie significativement sur le terrain et cette incertitude est incompressible. Dans le cas de barrages souples implantés dans des secteurs de moindre pente où les hauteurs d'écoulement pourraient être très sub-critiques ($Fr \ll 1$), les critères fournis ici ne sont probablement pas applicables et sous-estiment vraisemblablement la probabilité de blocage.

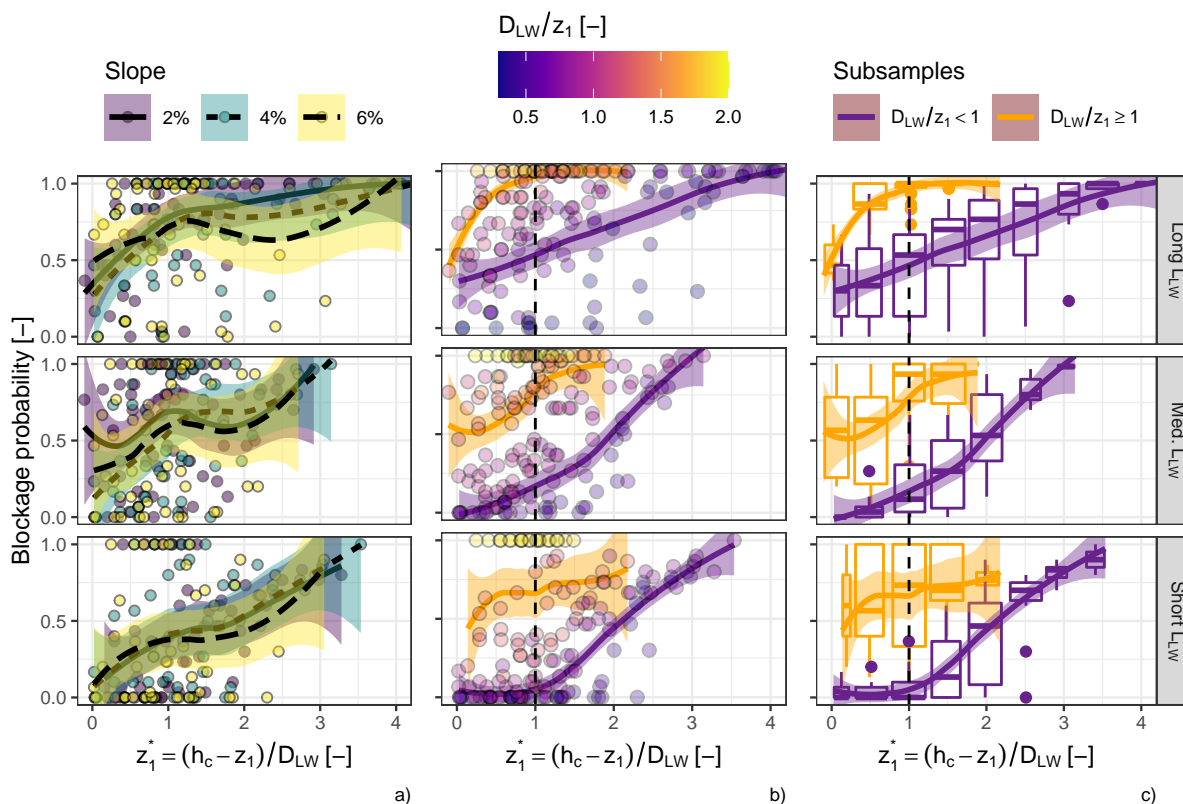


FIGURE 4.12: Analyse synthétique des conditions d'initiation du piégeage étudié via la **Probabilité de blocage individuelle des flottants (pris un par un)**. Chaque ligne correspond à une gamme de longueur de flottants (longueur décroissante du haut vers le bas). Panneau de gauche : démonstration de l'indépendance du critère au paramètre de pente (les trois courbes de tendance se superposent). Panneau central : illustration de l'effet du paramètre secondaire de diamètre relatif D_{BF}/z_1 (les tronc de diamètre plus gros que z_1 ont de fortes probabilités de blocage). Panneau de droite : critère final séparant les gros éléments $D_{BF}/z_1 > 1$ (très probablement bloqués) et les autres $D_{BF}/z_1 < 1$ (bloqués pour des débits plus forts). Les flottants plus longs ont une probabilité supérieure de se bloquer, inversement pour les flottants plus courts. Source : PITON et al. (2022)

En synthèse, on propose de retenir les critères suivants :

- Pour les gros éléments ($D_{BF}/z_1 > 1$), la probabilité de piégeage est de l'ordre de 50% dès $\frac{h_c - z_1}{D_{LW}} = 0$ et devient forte (75%–100%) pour $\frac{h_c - z_1}{D_{LW}} > 1$, ceci d'autant plus que le flottant est long ;
- Pour les autres éléments ($D_{BF}/z_1 < 1$), la probabilité de piégeage augmente aussi toujours avec la longueur des flottants. Elle varie par ailleurs entre 0 et 25% pour $\frac{h_c - z_1}{D_{LW}} = 0$, entre 0 et 50% pour $\frac{h_c - z_1}{D_{LW}} = 1$ et devient forte (75%–100%) pour $\frac{h_c - z_1}{D_{LW}} > 3$.

En tant que critère de conception, nous suggérons de choisir z_1 de manière à ce que la probabilité de piégeage devienne significative pour les débits de crue approchant les premiers dommages et/ou susceptibles de transporter des volumes non négligeables de bois (transition entre les événements de routine et les événement de projet). L'ouverture basale peut être choisie de telle sorte que $z_1^* \approx 1$ sur les rivières où le passage de quelques flottants de longueur moyenne et courte, ainsi que d'une poignée d'éléments plus longs, est acceptable. Ce choix peut être assoupli à $z_1^* \approx 0$ si le site peut accueillir quelques éléments longs. A l'inverse, sur des sites extrêmement sensibles, $z_1^* \approx 2 - 3$ est plutôt recommandé, mais une valeur aussi drastique peut conduire à une très faible ouverture basale et à des efforts d'entretien beaucoup plus lourds.

Estimation des pertes de charges : Définition de la hauteur du barrage Une approche simplificatrice a été retenue par PITON et al. (2022) pour estimer les conditions d'écoulement au droit de barrages souples en approximant la capacité de l'ouvrage par une loi de seuil intégrant un terme adimensionnel de perte de débitance ΔQ^* (on ignore le terme d'inertie puisque la présence des flottants force une condition $Fr < 0.3$) :

$$Q = \mu \cdot B_0 \cdot \sqrt{2g \cdot \left(\frac{h}{1 + \beta}\right)^3} \tag{4.2}$$

$$Q = (1 - \Delta Q^*) \cdot \mu \cdot B_0 \cdot \sqrt{2g \cdot h^3} \tag{4.3}$$

et $\mu = 0.45$ coefficient de seuil qui représente bien les conditions d'écoulement sans flottants dans les essais de PITON et al. (2022).

La connaissance de ΔQ^* permet de déduire la perte de charge relative $\frac{\Delta H}{H_0}$ et inversement via : $(1 - \Delta Q^*) = \sqrt{\left(\frac{1}{1 + \frac{\Delta H}{H_0}}\right)^3}$ (Tableau 4.1). Il est possible d'utiliser l'un ou l'autre suivant que la question porte sur la réduction de débitance (représentée par ΔQ^*) ou sur la surcote liée aux flottants (représentée par $\beta = \frac{\Delta H}{H_0}$).

TABLE 4.1: Exemple de valeurs de perte de charge et de la perte de débitance associée

$\beta = \frac{\Delta H}{H_0}$	ΔQ^*	Commentaire	Source
0	0	Condition d'écoulement sans flottant	
0.25	0.28	Enveloppe basse sur les barrages souples	PITON et al. (2022)
0.5	0.46	Enveloppe supérieure sur les évacuateurs de crue	HARTLIEB (2017)
0.6	0.51	Enveloppe supérieure sur les barrages à fentes et à pertuis	PITON et al. (2020)
1.0	0.65	Valeur moyenne pour les barrages souples	PITON et al. (2022)
1.5	0.75	Enveloppe supérieure pour les râteliers	SCHALKO et al. (2019a)
1.75	0.78	Enveloppe supérieure pour les barrages souples	PITON et al. (2022)

Les mesures menées sur une gamme de pente de 2%–6% montrent qu'une perte de charge relative de $\frac{\Delta H}{H_0} \approx 1.75$ constitue une valeur enveloppe (Fig. 4.13a). La Figure 4.13b illustre l'utilisation de la formulation simplifiée de l'Eq. (4.3) pour quatre valeurs de ΔQ^* (Tableau 4.1). On constate que l'utilisation de $\Delta Q^* = 0.78$ (équivalente à $\frac{\Delta H}{H_0} = 1.75$) constitue bien une courbe enveloppe satisfaisante tandis que la valeur moyenne des hauteurs mesurées est bien représentée par un paramètre $\Delta Q^* = 0.65$ (équivalent à $\frac{\Delta H}{H_0} = 1.0$).

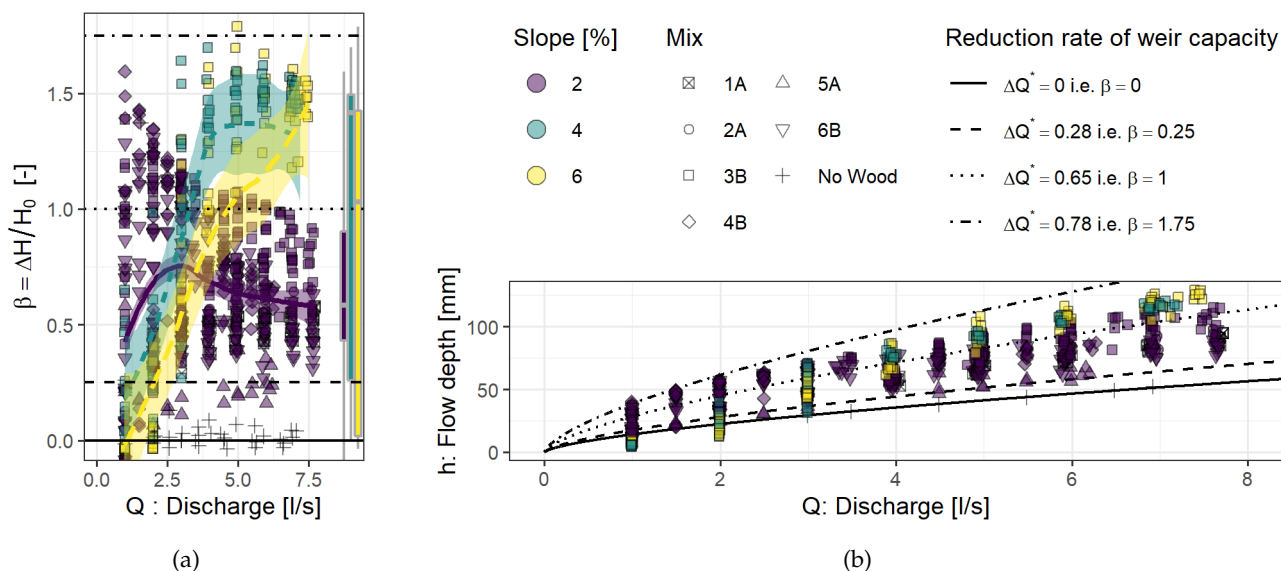


FIGURE 4.13: a) Perte de charge relative $\beta = \frac{\Delta H}{H_0}$ en fonction du débit Q . Les lignes colorées représentent les tendances moyennes pour les différentes valeurs de pente. Les petites boîtes à moustaches sur le côté montrent la distribution associée à chaque pente. La valeur enveloppe de 1.75 apparaît pertinente pour les trois pentes testées. b) Niveau d'écoulement h en fonction du débit Q et estimations théoriques de l'Eq. (4.3). Source : PITON et al. (2022)

Risque de relargage par surverse : Estimation du débit de sûreté L'objectif de cette étape est d'estimer la gamme de débit à partir de laquelle l'ouvrage va vraisemblablement relarguer de façon soudaine les flottants piégés (défaillance de la fonction de piégeage). Il est nécessaire d'estimer la hauteur d'écoulement h pour une large gamme de débit Q .

On calcule ensuite le ratio Π / F_D (voir détails p. 61) et la hauteur de surverse relative $h^* = \frac{h - z_2}{D_{BF}}$ pour l'ensemble de la gamme d'évènements étudiés. La Figure 4.14 illustre les liens entre ces deux variables et les conditions d'apparition de relargages. La taille des points y est proportionnelle à la masse de flottants relarguée. On s'intéresse donc seulement aux points les plus gros. La figure met bien en évidence que pour des conditions d'écoulement lentes ($\Pi / F_D \gg 1$), les hauteurs relatives de relargage restent limitées ($h^* \approx 2$), ce qui est cohérent avec les observations sur les évacuateurs de crues. L'augmentation progressive des hauteurs relatives de relargage apparaît quand les conditions d'écoulements deviennent propices à la formation d'embâcles multi-couches et denses ($\Pi / F_D \approx 1$) et s'aggrave à mesure que Π / F_D diminue, les valeurs restant très dispersées (effet aléatoire).

En synthèse, les valeurs estimées de Π / F_D dictent les valeurs de h^* au delà desquelles le relargage est estimé probable, sur les barrages souples selon les observations de PITON et al. (2022) :

- Pour $\Pi / F_D > 2 - 3$, les relargages ont vraisemblablement lieu dans l'intervalle $h^* \in [2; 3]$;
- Pour $1.5 < \Pi / F_D < 2$, les relargages ont plutôt lieu dans l'intervalle $h^* \in [2; 4]$;
- Pour $\Pi / F_D < 1.5$, les relargages ont lieu dans l'intervalle $h^* \in [4; 9]$, la plupart ayant lieu dans l'intervalle $h^* \in [5; 8]$.

Nous suggérons d'estimer la gamme de débits correspondant à l'atteinte de ces conditions de relargage et de communiquer l'information (éventuellement associée à des périodes de retour) pour indiquer la magnitude des crues générant de potentiels dysfonctionnements de piégeages.

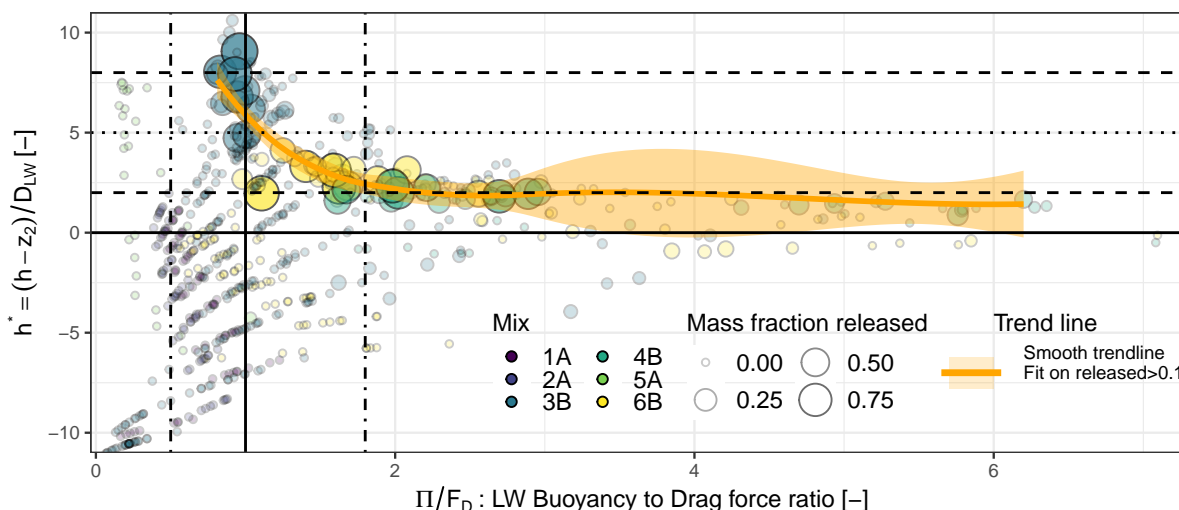


FIGURE 4.14: Conditions d'écoulement (hauteur de surverse relative $h^* = \frac{h-z_2}{D_{LW}}$ et ratio Π/F_D) aboutissant au relargage en aval (points de grande taille). Source : PITON et al. (2022)

Implantation sur fond affouillable (ou non)? RIMBÖCK (2004) recommande d'implanter les barrages souples pare-flottants au droit de seuils (ou sur un fond inaffouillable). L'effet d'obstacle de l'ouvrage et l'accumulation de flottants redirigent les écoulements vers le bas et peuvent affouiller le lit du cours d'eau sur des hauteurs très significatives. SCHALKO et al. (2019a) et SCHALKO et al. (2019c) ont étudié le phénomène sur les râteliers et montrent des affouillements potentiellement équivalents à plusieurs mètres à l'échelle terrain. Ils mettent aussi en évidence que ce dégagement d'une section d'écoulement sous l'ouvrage permet d'abaisser sensiblement de moitié la surcote de ligne d'eau. Si une telle section d'écoulement est dégagée sous un filet, dans certaines conditions il est à craindre que les flottants passent sous l'ouvrage. Sur des sites aux conditions d'écoulement très "fluviales" ($\Pi/F_D \gg 1$), de tels relargages "par en-dessous" sont vraisemblablement moins probables. Le phénomène n'a toutefois pas encore été étudié à notre connaissance. En l'absence de données, nous recommandons, comme RIMBÖCK (2004), de mettre en place ces ouvrages sur des fonds inaffouillables.

Cas de charge Les travaux de PITON et al. (2022) ont confirmé les recommandations de RIMBÖCK (2004) : une hypothèse de chargement hydrostatique est une première approximation pertinente de la charge appliquée au filet. Il est nécessaire de considérer la hauteur totale d'écoulement, y compris la hauteur de surverse par dessus la crête de l'ouvrage.

Mise en place de dissipateurs d'énergie sur les câbles Des essais exploratoires ont montré que l'abaissement soudain du câble supérieur d'un ouvrage subissant une surverse génèrait systématiquement un relargage massif des flottants. Il est donc possible de mettre des freins aux câbles supportant un barrage souple pare-flottants, à condition que leur activation ne génère pas un abaissement z_2 sous le niveau d'écoulement h atteint pour des débits rares. Autrement dit, si il est nécessaire de mettre en place des freins, une revanche supplémentaire sur la cote de crête sera prise vis à vis de l'évènement de projet.

Application au cas du torrent des Glaciers (Savoie) Un exemple d'application des critères présentés ci-dessus est proposé ici sur le Torrent des Glaciers. Au droit du site d'implantation de l'ouvrage, le bassin versant est de 114 km^2 . Les débits de pointe de période de retour 10 ans, 100 ans et 1000 ans sont respectivement $Q_{10} = 47 \text{ m}^3/\text{s}$, $Q_{100} = 102 \text{ m}^3/\text{s}$ et $Q_{1000} = 203 \text{ m}^3/\text{s}$ (ARNAUD et al., 2014). Le diamètre moyen des bois flottant est supposé être de $0,25 \text{ m}$. Le barrage souple est conçu pour être pleinement fonctionnelle pour Q_{100} , le piégeage potentiel nécessitant une opération de maintenance est acceptable pour $Q > Q_{10}$. La structure serait installée dans des gorges dont les

parois latérales sont constituées d'un substratum rocheux solide. Dans ces gorges, le lit est fortement pavé par de gros blocs rocheux et le transport de sédiments est supposé marginal dans ce cas d'étude simplifié. La largeur du chenal est de 15 m et la pente de 5%.

Dans des conditions d'eau pure, la profondeur d'écoulement est approximée par une profondeur d'écoulement critique (ligne continue dans la Fig. 4.15). On suggère initialement de fixer le câble de fond à la profondeur d'écoulement pour Q_{10} : $z_1=1\text{ m} \approx h(Q_{10})$. L'équation (4.1) permet de définir le débit pour lequel le piégeage pourrait commencer ($z_1^*=0\%$, soit $Q=47\text{ m}^3/\text{s}$), devient probable ($z_1^*=1\%$, soit $Q=65\text{ m}^3/\text{s}$) et enfin est certain ($z_1^*=3\%$, soit $Q=109\text{ m}^3/\text{s}$). Comme on peut le voir sur la Fig. 4.15, le piégeage est probable pour un débit compris entre Q_{10} et Q_{100} et est certain au voisinage de Q_{100} . Considérant que ces critères décrivent le piégeage de troncs uniques et isolées et que, dès que quelques une de ces pièces sont piégées, l'efficacité du piégeage devient quasi totale, ces valeurs sont considérées acceptables et valide le choix de fixer le câble de fond à Q_{10} .

La profondeur d'écoulement en présence de bois flottant piégé dans l'ouvrage est calculée en utilisant l'Eq. (4.3) et différentes hypothèses de ΔQ^* . L'hypothèse d'une forte obstruction ($\Delta Q^*=0,78$) conduit à une profondeur d'écoulement de 6,2 m pour Q_{100} . L'utilisation d'une hauteur nette de 6 m fixe le câble supérieur à $z_2=(z_1+6)=7\text{ m}$, c'est-à-dire raisonnablement au-dessus de la profondeur maximale pour la crue de référence du projet de Q_{100} . Pour toute la gamme de débits pouvant impliquer le piégeage de bois flottant ($Q>Q_{10}$) et toutes les hypothèses d'obstructions, l'application de l'Eq. (3.4) montre que $\Pi/F_D < 1$, c'est-à-dire que l'accumulation de bois flottant est probablement dense et multi-couches. Un résultat raisonnable compte tenu de la raideur du site.

En négligeant l'abaissement du câble supérieur (ceci devrait être affiné dans une étape ultérieure lorsque la conception de la structure sera définie), il est possible d'utiliser l'Eq. (3.10) pour calculer la profondeur d'écoulement à laquelle le relargage des bois flottant piégés devient plausible ($h^*=4$), probable ($h^*=6$) et très probable ($h^*=8$). Ces valeurs sont choisies en fonction de la gamme Π/F_D (Fig. 4.14). On peut voir sur la Fig. 4.15 que de telles profondeurs d'écoulement sont atteintes entre 150 et 175 m^3/s , c'est-à-dire bien au-delà de Q_{100} dans le pire des scénarios (forte obstruction), et ne sont pas atteintes pour $Q < Q_{100}$ en cas d'obstruction moyenne ou faible. Cette probabilité de défaillance fonctionnelle est également considérée comme satisfaisante et valide la conception proposée.

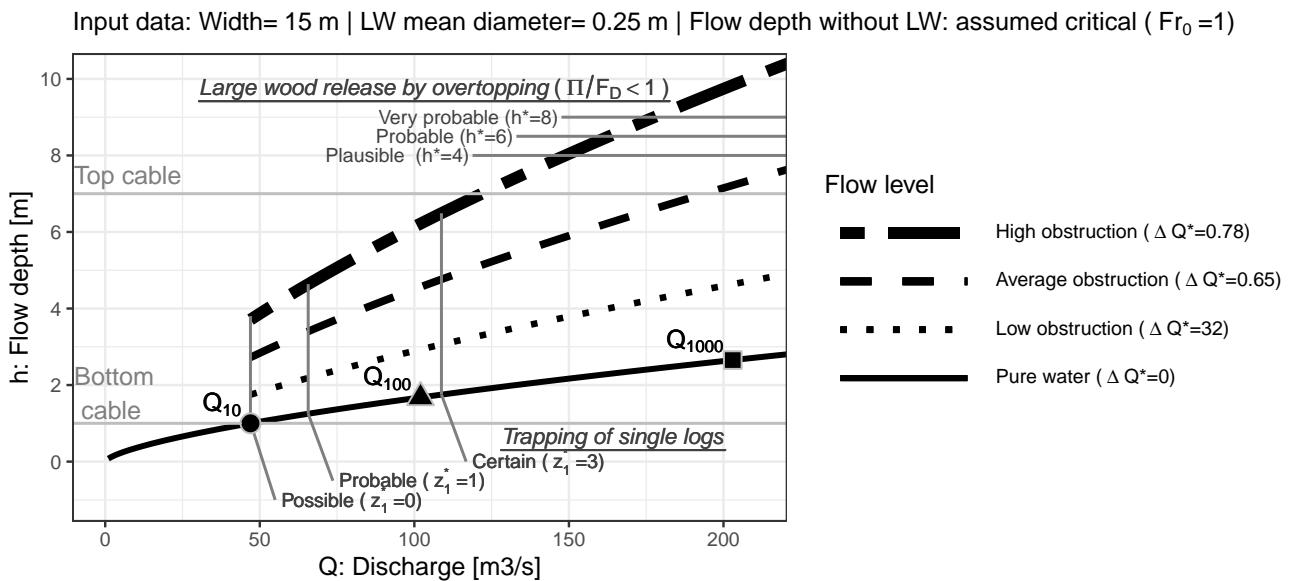


FIGURE 4.15: Courbe stade synthétique - débit illustrant la conception d'une barrière souple pour le piégeage du gros bois sur le Torrent des Glaciers (FR). L'Eq. (4.3) est utilisée avec différentes valeurs de ΔQ^* pour calculer les courbes débit - débit de stade. L'initiation du piégeage est calculée avec l'Eq. (4.1) et des valeurs sélectionnées de z_1^* . Les conditions de libération sont calculées avec l'Eq. (3.10) et les valeurs de h^* sélectionnées après le calcul de Π/F_D à l'aide de l'Eq. (3.4).

Conception des râteliers pare-flottants

Implantation L'implantation la plus classique des râteliers est une implantation transverse orthogonale à l'axe du cours d'eau. Dans le même esprit que les déversoirs classiques, il peut être utile d'implanter l'ouvrage en biais pour en augmenter la section totale, la débitance et ainsi abaisser les lignes d'eau amont. HARTLIEB et RUTSCHMANN (2015, p. 20) montrent par exemple qu'un râtelier disposé à 45° ou 20° par rapport à l'axe des écoulements génère une surcote relative respectivement 20%-25% et ≈50% qu'un râtelier transversal disposé à 90° par rapport aux écoulements (essais menés avec des Nombre de Froude de 0.67 et 0.71). Autre exemple : les tests menés par LAUBER et al. (2016) ont par exemple montré qu'une configuration doublant la longueur du râtelier, portant cette dernière à 80 m (débit de pointe de 120 m³/s, volume de bois flottant de 5 000 m³), permettait d'abaisser la ligne d'eau amont de plus de 3 m. L'accumulation de bois flottant était ainsi moins compacte et mieux répartie dans le bassin de la plage de dépôt (comparer Fig. 4.17a-b et c-d). L'ouvrage a été bâti en 2010 (variante longue). Les pieux font 10 m de haut et la partie latérale de l'ouvrage est constituée d'un barrage souple. Le site a subi une crue forte en 2011 (débit de pointe de 110 m³/s), mais les apports de bois flottants ont toutefois été limités (Fig. 4.17e) : 150 m³, très inférieurs aux 5 000 m³ relevés lors de la crue similaire de 2005.

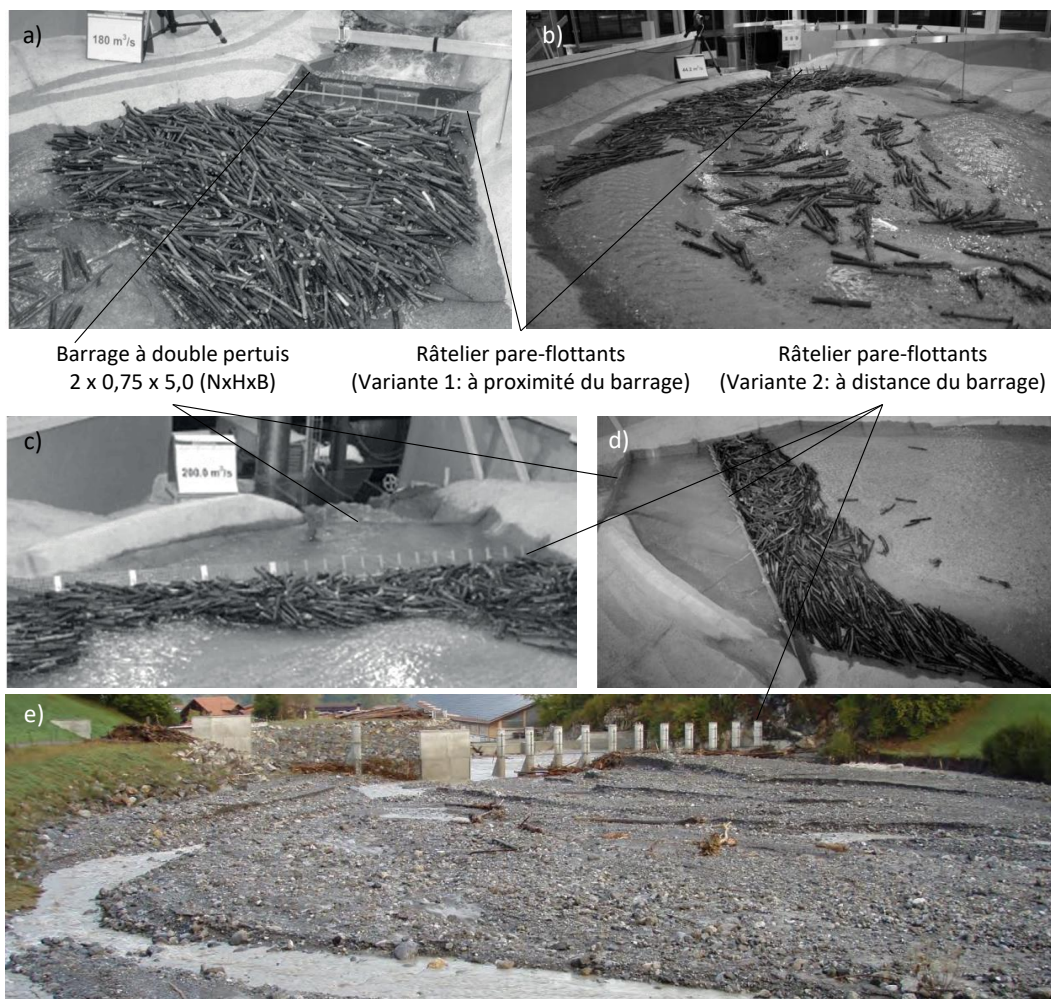


FIGURE 4.16: Accumulations de bois flottants sur le modèle physique de la plage de dépôt sur la Chiene à Kien en Suisse (LAUBER et al., 2016) : (a et b) râtelier court, (c et d) râtelier long, et e) ouvrage réel après la crue de 2011 (débit de pointe : 110 m³/s, apport de bois : 150 m³, apport de charriage : 30 000 m³)

Des configurations en "V" ou en "Λ" peuvent aussi être utilisées dans le même objectif d'augmenter la section débitante et d'abaisser la ligne d'eau (Fig. 4.17a-b). Au contraire des ouvrages en dérivation qu'il faut implanter en extrados des courbes (c.f. par exemple la Fig. 4.34), les ouvrages râteliers sont préférentiellement dans des secteurs plutôt rectilignes du cours d'eau. RIMBÖCK et STROBL (2001) ont toutefois étudié les effets d'une implantation en aval d'une courbe (Fig. 4.17c). Ils montrent ainsi que le taux de piégeage est similaire ou meilleur pour un râtelier avec une forme en "V" ou implanté en biais par rapport à la direction des écoulements, comparé à une implantation transverse.

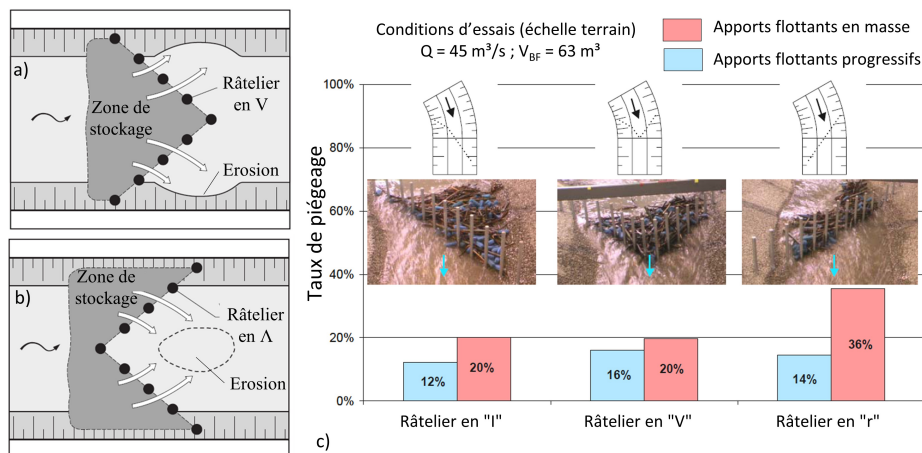


FIGURE 4.17: Illustration des effets de configurations non-rectilignes d'ouvrages augmentant la longueur déversante de façon à abaisser la ligne d'eau : a) râteliers en "V" concentrant les dépôts au centre du chenal et dirigeant les écoulements vers les berges, b) râtelier en "Λ" concentrant les écoulements au centre du chenal et stockant les flottants vers les berges (images tirées de LANGE et BEZZOLA, 2006). c) Effet de l'implantation en aval d'une courbe sur la forme des dépôts et l'efficacité de piégeage : la configuration transverse en "r" montrait un taux de piégeage légèrement meilleur que les autres (RIMBÖCK et STROBL, 2001)

Protections de berges au droit de l'ouvrage La mise en place d'un piège à flottant, de type râtelier ou autre, crée une accumulation de flottants qui va dévier et détourner les écoulements, en particulier vers les berges. Si ces dernières sont érodables, elles doivent être protégées par des aménagements adéquats jusqu'à une cote supérieure aux niveaux des écoulements en crue. Le cas échéant, l'ouvrage est susceptible d'être contourné par érosion latérale et de perdre une bonne partie de sa capacité de piégeage (voir l'exemple de la Fig. 4.18).



FIGURE 4.18: Exemple de râtelier pare-flottant contourné par érosion latérale pendant une crue de faible magnitude ($T \approx 2 \text{ ans?}$) sur la rivière Morobia en Suisse (Source : ©R. Boes - ETHZ). Une partie des flottants piégés sont restés en amont des pieux mais le bassin de l'ouvrage est globalement vide. Quelques blocs situés au centre de la photo laissent penser qu'une protection de hauteur insuffisante était située sur le côté de l'ouvrage. L'écoulement a atteint un niveau proche du haut des pieux (en témoignent les flottants piégés à cette cote) et a attaqué la berge.

Fondation sur radier ou fichage directement dans les alluvions ? La question de mettre en place un radier sous l'ouvrage se pose de manière analogue aux ouvrages souples. Les râteliers peuvent être directement fichés dans les alluvions ou peuvent être fondés sur un seuil, un radier ou un affleurement rocheux prévenant l'affouillement. L'option retenue a un effet non négligeable sur le fonctionnement hydraulique de l'ouvrage (Figure 4.19).

- En présence d'affouillement, SCHALKO et al. (2019a) ont démontré que la perte de charge peut être réduite sensiblement de moitié par rapport au cas avec radier (réduction moyenne de 45%). Les configurations permettant l'affouillement sont donc préférables dans les secteurs où il est important de limiter un maximum les surcotes de lignes d'eau associées à la présence du piège à flottants.
- L'affouillement, en libérant de la section de passage sous l'accumulation de flottant, permet aussi une meilleure continuité sédimentaire. Des dépôts d'une épaisseur sensiblement égale à la perte de charge ΔH sont à prévoir jusqu'à rétablissement d'une pente d'énergie suffisante au transport de la charge grossière jusqu'à l'ouvrage. Ensuite, l'ouvrage permet normalement le passage des matériaux charriés. Au contraire, si l'ouvrage est fondé sur un point dur, la partie basse du râtelier sera probablement assez largement obstruée par des flottants puis dans un second temps par des sédiments. La continuité sédimentaire n'est alors rétablie que beaucoup plus tard, vraisemblablement une fois l'ouvrage très largement comblé de sédiments.

KOULINSKI et RICHARD (2008) montrent ainsi deux exemples où cet effet naturel est utilisé sciemment : dans un cas pour dimensionner un piège à flottants (affouillable) dont la fonction n'est pas de piéger la charge sédimentaire ; et dans un autre cas pour former une plage de dépôt sédimentaire en amont d'un râtelier fondé sur un radier. L'ouvrage ne devant piéger des sédiments que pour les crues les plus fortes, c'est à dire celles qui éroderont aussi les terrasses alluviales situées en amont et peuplées de grands feuillus. On utilise alors la concomitance entre transport de flottants et transport massif de sédiments pour créer un ouvrage très perméable pour les crues de routine (qui transportent peu de flottants), et dont la capacité de piégeage augmente fortement pour les crues de projet qui transportent plus de flottants.

Dans le cas de râteliers affouillables, il faut s'attendre à des affouillements très significatifs (cf. par exemple Figure 4.19b) et le dimensionnement des pieux doit prendre en compte cet élément (KOULINSKI et RICHARD, 2008). SCHALKO et al. (2019c) fournissent des éléments pour quantifier ces affouillements.

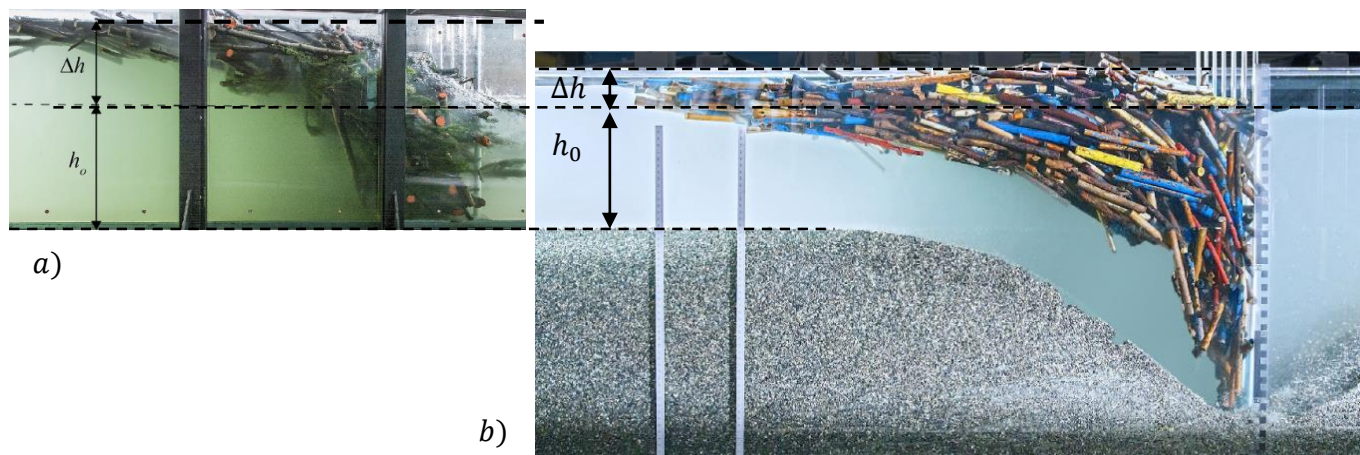


FIGURE 4.19: Illustration de l'effet de la présence d'un radier inaffouillable au droit d'un râtelier : (a) augmentation de la perte de charge, ou de son absence (b) diminution de la perte de charge, affouillement marqué libérant de la section d'écoulement sous l'accumulation et permettant éventuellement le transport par charriage (images tirées de SCHALKO et al., 2019a ; SCHALKO et al., 2019c)

Écartement entre les pieux L'écartement entre les pieux des râteliers peut être défini selon un critère d'ouverture relative (Figure 4.20). La longueur des bois flottants L_{BF} variant dans une large gamme pendant les crues, il faut définir la longueur cible, "de projet", des flottants à piéger. Cette dernière est à adapter au gabarit des ouvrages à protéger en aval (voir §3.4 sur les conditions de blocage des ponts). En synthèse, en considérant qu'au droit d'un ouvrage d'ouverture B , la probabilité de piégeage devient non négligeable pour des flottants de longueur supérieure à $L_{BF} > B$, on peut définir la longueur cible sur cette base. Comme présenté dans la Figure 4.20, la probabilité de blocage **de pièces prises individuellement**¹ devient forte à très forte pour $B_0^* = B_0/L_{BF} < 1/2 - 1/3$. L'écartement des pieux optimal est donc souvent de l'ordre de $B_0 \approx B/3$ avec B la largeur d'ouverture de l'ouvrage à protéger.

En synthèse, en considérant qu'au droit d'un ouvrage d'ouverture B , la probabilité de piégeage devient non négligeable pour des flottants de longueur supérieure à $L_{BF} > B$, la longueur cible à piéger est donc $L_{cible} = B$. Comme présenté dans la Figure 4.20, la probabilité de blocage **de pièces prises individuellement** devient forte à très forte pour $B_0^* = B_0/L_{BF} < 1/2 - 1/3$. La longueur cible à bloquer étant $L_{cible} = B$, l'écartement des pieux optimal est donc souvent de l'ordre de $B_0 \approx B/3$ avec B la largeur d'ouverture de l'ouvrage à protéger.

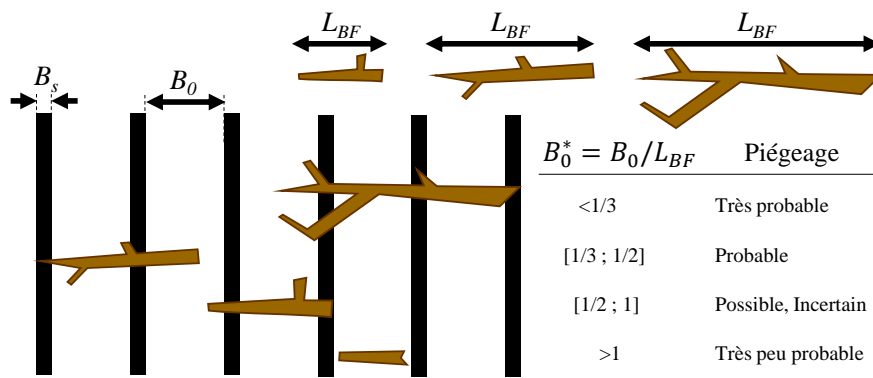


FIGURE 4.20: Critère de définition des écartements entre les pieux des râteliers (synthèse des valeurs proposées par MIZUYAMA et al., 1988; UCHIOGI et al., 1996; SABO DIVISION, 2000; BEZZOLA et al., 2004; WALLERSTEIN et al., 2013)

Les concepteurs prudents peuvent être tentés d'utiliser des écartements plus réduits que le critère fourni. Les retours d'expérience de terrain montrent que les râteliers dont les écartements sont étroits piègent beaucoup de flottants, y compris de petits éléments dont le transport ne menace pas les enjeux aval. Afin de limiter l'effort de maintenance sur ces ouvrages, il est préférable de mettre en place des écartements aussi larges que possible.

Estimation des pertes de charges : Définition de la hauteur des pieux La hauteur du râtelier est à définir selon le niveau de la surface libre pour la crue de projet *y compris la surcote associée à l'ouvrage et à la présence de flottants*. L'évaluation des hauteurs d'eau en amont d'ouvrages formés de pieux ou de barres (éventuellement inclinés) peut être faite via la formule de DI STEFANO et FERRO (2013, 2014) enrichie d'un terme de perte de débitance $(1 - \Delta Q^*)$ de façon analogue à l'approche proposée pour les barrages souples dans la section précédente :

$$Q = (1 - \Delta Q^*) \cdot B_{0b} \cdot 2 \cdot \sqrt{\frac{g \cdot \psi^{3 \cdot c_1}}{c_0^3}} \cdot h^{3/2} \quad (4.4)$$

avec ψ l'indice des vides $= \frac{B_0}{B_0 + B_s}$ [-], B_0 la distance entre les barres [m], B_s la largeur des barres [m], B_{0b} la largeur de l'ouvrage égale à $N \cdot (B_0 + B_s)$ si N est le nombre d'intervalles entre les barres (Figure 4.20), et deux coefficients qui dépendent de l'inclinaison des barres : $c_0 = 0.957 + (\sin \alpha)^{1.833}$ et $c_1 = 1.5(\sin \alpha)^{0.11} - 0.9$ avec α (°) l'angle

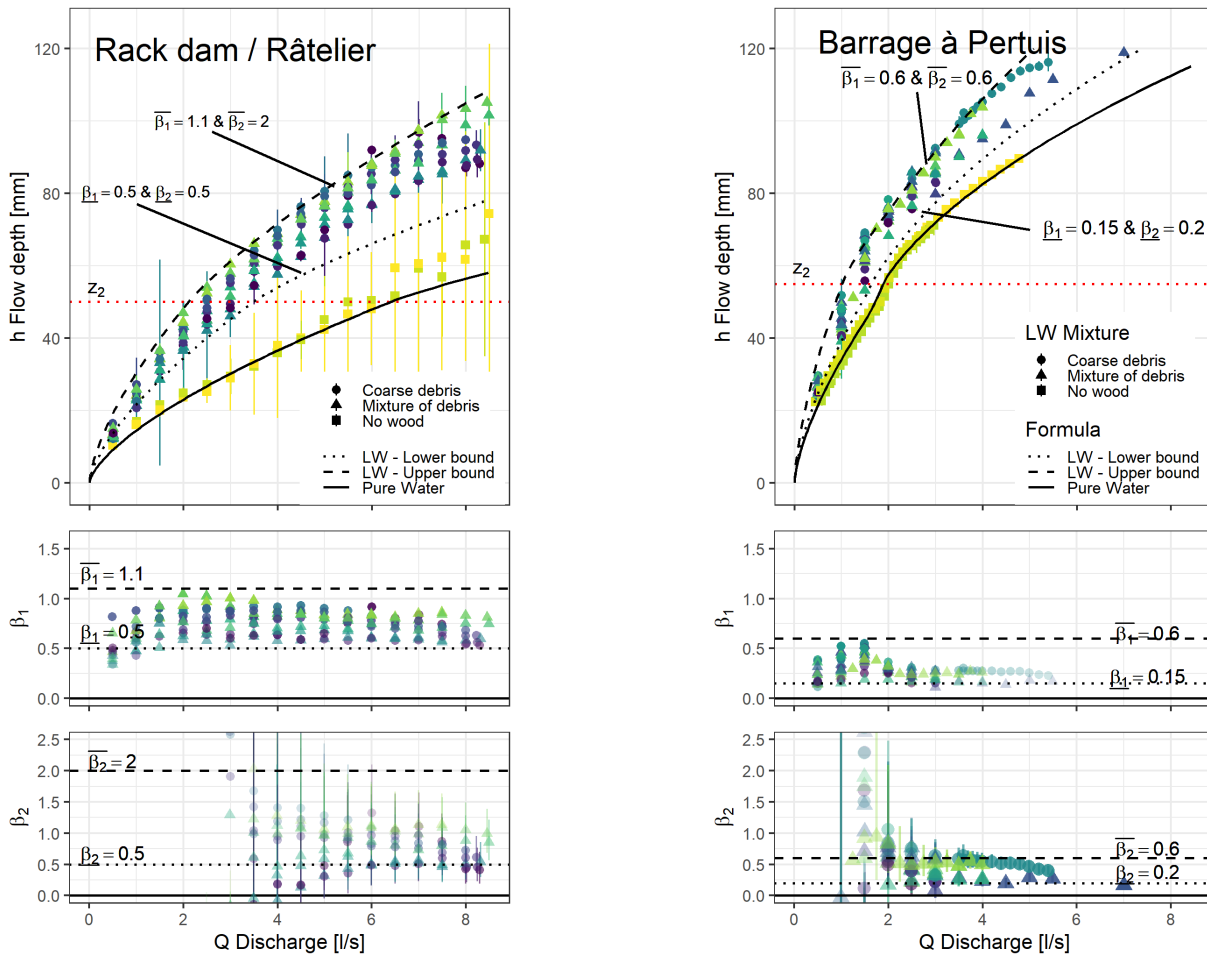
1. Comme décrit précédemment, une fois les premières pièces piégées, la probabilité de blocage des pièces suivantes devient très forte, même pour des pièces courtes ($B_0^* > 1$). Le taux de piégeage qui estime le nombre d'éléments piégés est donc de l'ordre de la probabilité de blocage pour quelques éléments, puis augmente fortement à mesure que l'ouvrage est obstrué par des pièces bloquées.

entre les barres et l'horizontal. Cette formule a été calibrée sur la gamme $\psi \in [0.16; 0.74]$, $h/B_{0b} \in [0.09; 0.71]$, $h_c/B_{0b} \in [0.05; 0.17]$, $\alpha \in [45^\circ; 90^\circ]$ pour des écoulements sans sédiments et sans flottants.

Pour des ouvrages à pieux verticaux ($\alpha = 90^\circ$), l'équation peut être simplifiée :

$$Q = (1 - \Delta Q^*) \cdot 0.52 \cdot \psi^{0.9} \cdot B_{0b} \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot h^{3/2} \tag{4.5}$$

qui a la forme d'une équation de seuil dont le coefficient de seuil serait $0.52 \cdot \psi^{0.9} \in [0.33; 0.47]$ pour, par exemple, $\psi \in [0.6; 0.9]$. En l'absence de flottants, $\Delta Q^* = 0$ et $(1 - \Delta Q^*) = 1$, on revient alors à la formulation originale en eau claire. La Figure 4.21a montre que en présence de flottants, sur un râtelier vertical avec $\psi = 0.67$, les hauteurs d'eau observées peuvent être encadrées en utilisant des valeurs hautes $(1 - \Delta Q^*)=0.33$ (correspondant à $\bar{\beta}_1 = \frac{\Delta H}{H_0} = 1.1$) et basses $(1 - \Delta Q^*)=0.54$ (correspondant à $\underline{\beta}_1 = \frac{\Delta H}{H_0} = 0.5$). Le Tableau 4.1 fournit d'autres valeurs des deux coefficients².



(a) Ouvrage râtelier et performance de l'Equation (4.6) sur les essais en laboratoire d'un râtelier vertical inaffouillable ("rack dam" ou "SABO" dam).

(b) Ouvrage à pertuis et performance de l'Equation (4.9) sur les essais en laboratoire d'un barrage à cinq pertuis ("slot dam").

FIGURE 4.21: Performance des lois hauteur - débit (données tirées de PITON et al., 2020)

2. On rappelle le lien entre perte de charge relative $\frac{\Delta H}{H_0}$ et perte de débitance relative pour les lois de seuils : $(1 - \Delta Q^*) = \sqrt{\left(\frac{1}{1 + \frac{\Delta H}{H_0}}\right)^3}$

Prise en compte du caractère affouillable d'un ouvrage Il est important de noter que les Equations (4.4) et (4.5) sont valables pour des ouvrages inaffouillables. Elles n'ont pas été testées sur des ouvrages affouillables. Toutefois, par analogie avec les résultats de SCHALKO et al. (2019a) qui a testé les deux configurations, il est possible, en première approximation, d'utiliser ces équations corrigées d'un facteur prenant en compte une réduction associée aux affouillements de 45% des hauteurs d'écoulement.

Prise en compte de la surverse par dessus l'ouvrage Les Equations (4.4) et (4.5) s'appliquent tant que le râtelier n'est pas submergé. Quand la cote de la surface libre dépasse le haut des pieux, ces derniers n'obstruent plus la section d'écoulement. Dans ce cas de figure, l'astuce calculatoire est d'estimer le débit total passant à travers l'ouvrage en considérant ce dernier infiniment haut avec ces mêmes équations, puis de retrancher le débit passant par dessus l'ouvrage sur une hauteur de $h - z_2$ avec z_2 niveau de surverse de l'ouvrage. On peut ensuite ajouter le débit passant par dessus l'ouvrage qui suit une loi de seuil classique. Pour un râtelier incliné et considérant une section d'écoulement droite au dessus du râtelier, on obtient alors :

$$Q = (1 - \Delta Q_1^*) \cdot B_{0b} \cdot 2 \cdot \sqrt{\frac{g \cdot \psi^{3 \cdot c_1}}{c_0^3}} \cdot (h^{3/2} - (h - z_2)^{3/2}) + (1 - \Delta Q_2^*) \cdot \mu \cdot B_{0b} \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot (h - z_2)^{3/2} \quad (4.6)$$

Avec μ le coefficient de seuil de la surverse ($\mu = 0.45$ selon les mesures de PITON et al., 2020). Cette équation est simplifiée sous la forme suivante pour le cas vertical :

$$Q = (1 - \Delta Q_1^*) \cdot 0.52 \cdot \psi^{0.9} \cdot B_{0b} \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot (h^{3/2} - (h - z_2)^{3/2}) + (1 - \Delta Q_2^*) \cdot \mu \cdot B_{0b} \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot (h - z_2)^{3/2} \quad (4.7)$$

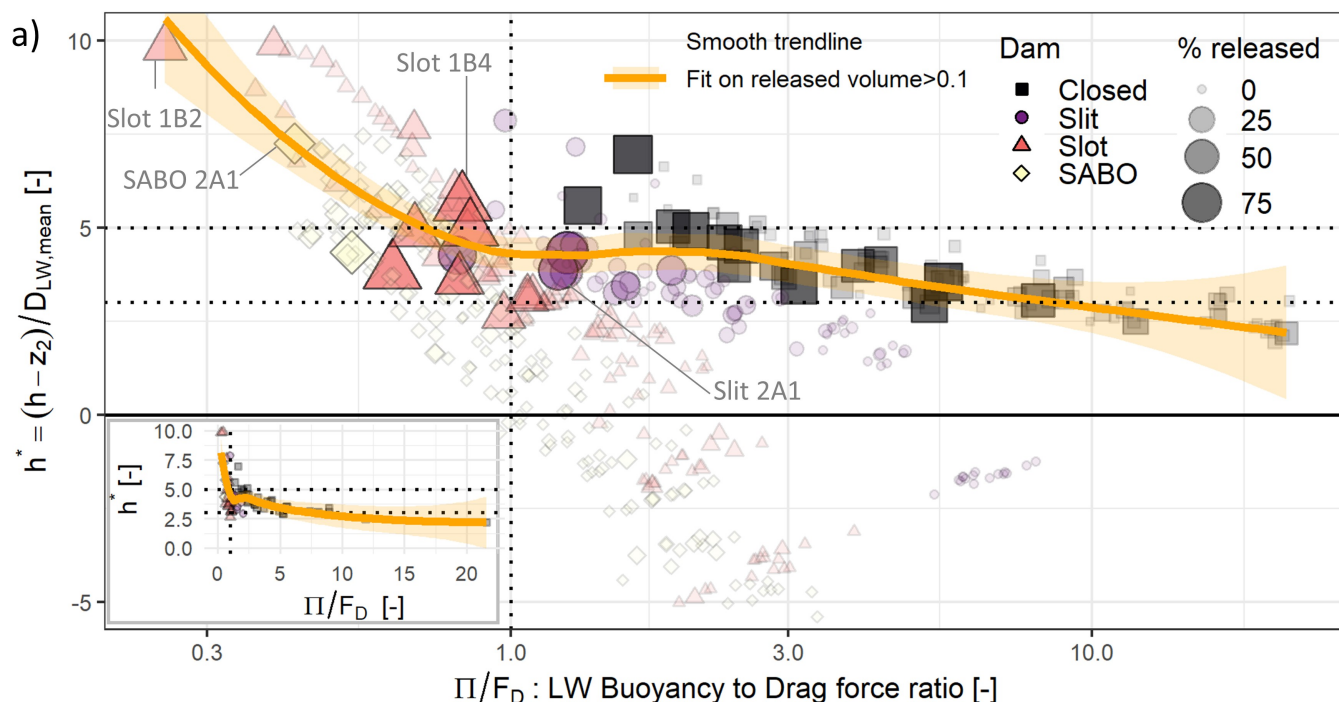
Si la forme de la section d'écoulement au dessus du râtelier est trapézoïdale, le second terme des équations est adapté pour le prendre en compte. Selon les expériences de PITON et al. (2020) présentées dans la Figure 4.21a, $(1 - \Delta Q_2^*)$ peut être encadré entre les valeurs hautes $(1 - \Delta Q_2^*) = 0.19$ (correspondant à $\beta_2 = \frac{\Delta H}{H_0} = 2$) et basses $(1 - \Delta Q_2^*) = 0.54$ (correspondant à $\beta_2 = \frac{\Delta H}{H_0} = 0.5$).

Risque de relargage par surverse : Estimation du débit de sûreté Nous recommandons d'approcher le problème de façon analogue à l'approche proposée pour les barrages souples §4.2.1. Il faut estimer la gamme de variation de la hauteur de surverse $h - z_2$ et du nombre adimensionnel Π / F_D selon plusieurs hypothèses de perte de charge et pour une large gamme de débits supérieurs au débit de projet.

La Figure 4.22 montre l'ensemble des résultats observés sur des ouvrages rigides par PITON et al. (2020). En synthèse, les valeurs estimées de Π / F_D dictent les valeurs de h^* au delà desquelles le relargage est estimé probable, sur les ouvrages rigides, selon les observations de PITON et al. (2020) :

- Pour $\Pi / F_D > 3$, les relargages ont vraisemblablement lieu dans l'intervalle $h^* \in [1.5; 3]$;
- Pour $1 < \Pi / F_D < 3$, les relargages ont plutôt lieu dans l'intervalle $h^* \in [3; 5]$;
- Pour $\Pi / F_D < 1$, les relargages ont lieu dans l'intervalle $h^* \in [4; 9]$, la plupart ayant lieu dans l'intervalle $h^* \in [4; 8]$.

Nous suggérons d'estimer la gamme de débits correspondant à l'atteinte de ces conditions de relargage et de communiquer l'information (éventuellement associée à des périodes de retour) pour indiquer la magnitude des crues générant de potentiels dysfonctionnements de piégeages.



b) Slot 1B2

c) SABO 2A1

d) Slot 1B4

e) Slit 2A1

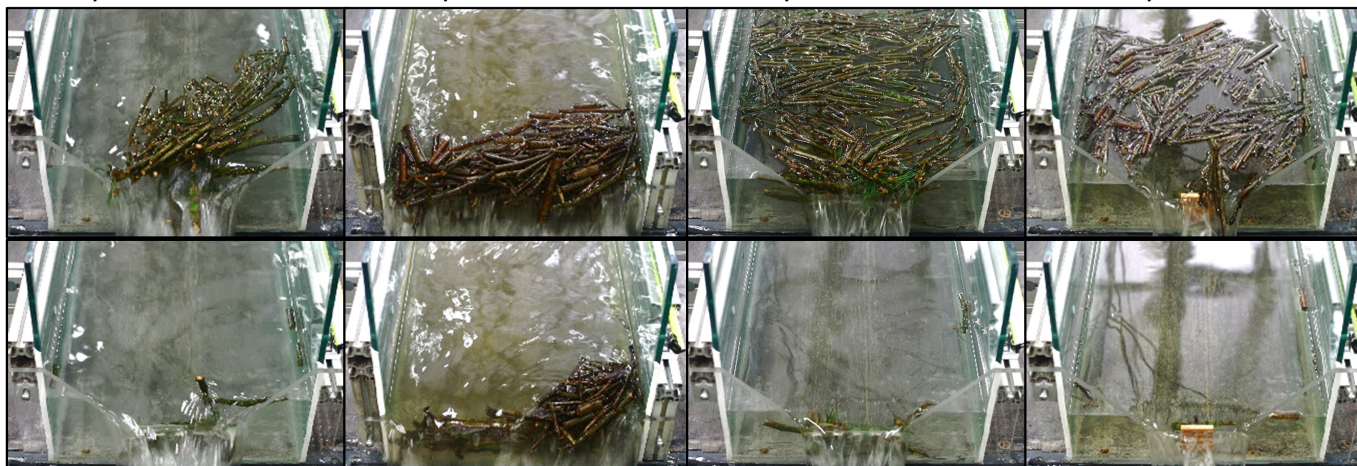


FIGURE 4.22: a) Conditions d'écoulement (hauteur de surverse relative $h^* = \frac{h-z_2}{D_{BF}}$ et ratio Π/F_D) observées sur des ouvrages rigides (barrage plein = "Closed dam", barrage à fente = "Slit dam", barrage à pertuis = "Slot dam" et râtelier vertical = "SABO dam") par PITON et al. (2020). La taille des points y est proportionnelle à la masse de flottants relarguée. On s'intéresse donc seulement aux points les plus gros. Les images b)-e) représentent l'état des accumulations juste avant relagage (photos du haut) et juste après relagage (photos du bas), soit 5 à 15 secondes après. Les valeurs de h^* et Π/F_D de ces cas sont reportées sur le diagramme (a). On constate que les accumulations soumises à des Π/F_D plus faibles sont plus denses, alors qu'un tapis de flottants perdure pour des valeurs Π/F_D proches et supérieures à 1.

Application au cas de la Brague à Biot (Alpes-Maritimes) En guise de synthèse, une application de dimensionnement d'un râtelier sur la Brague à Biot est présenté ci-dessous (la production de flottants de ce bassin versant a été documentée dans le rapport de PITON et al., 2018, et elle est résumée dans l'encadré de la page 29) :

- **Contexte** Il est proposé d'installer un piège à embâcles à Biot à l'amont des zones urbanisées de la basse vallée de la Brague. A l'endroit choisi, l'absence d'enjeux permet une certaine acceptabilité d'une éventuelle sur-inondation associée à la présence de l'ouvrage tant que la ligne d'eau n'atteint pas la route présente en rive droite (perchée sur le versant au-dessus du lit majeur). La crue de projet pour laquelle le piège doit fonctionner est prise égale à celle de 2015 (débit de pointe de $240 \text{ m}^3/\text{s}$), et la crue de sûreté pour laquelle on considère qu'un relargage est acceptable est prise de période de retour 500 ans (débit de pointe : $336 \text{ m}^3/\text{s}$). De multiples ponts équipent le cours de la rivière en aval mais l'ouvrage formant le verrou hydraulique le plus critique est constitué par les buses de l'autoroute A8 qui sont nombreuses mais présentent un diamètre faible ($B = 3 \text{ m}$).
- **Approches suivies dans cet exemple** Deux approches sont proposées : **1)** La largeur et la hauteur des pieux sont fixés arbitrairement. Il faut alors estimer d'après ces dimensions, la plage des débits pour lesquels il va y avoir surverse par dessus le râtelier, puis la plage de débits pour lesquels il y aura un relargage probable des flottants. Ces valeurs de débits seront à comparer avec les débits de projet et de sûreté. Alternativement, **2)** on peut chercher les dimensions optimales qui répondent au cahier des charges (largeur et hauteur du râtelier).
- **Hypothèses** La section en travers a été subdivisée en 3 sous-sections (Figure 4.23) : le lit mineur (sous-section "a"), le lit majeur en rive gauche ("b") et le lit majeur en rive droite ("c"). Les débits vont être calculés dans chaque sous-section pour différentes hauteurs d'eau, puis vont être sommés pour avoir une relation hauteur-débit finale sur la section. En première approche, la capacité hydraulique des sections est estimée via les lois hauteur - débit de râteliers ou de seuils. On fait donc l'hypothèse d'une coupure hydraulique au droit de l'ouvrage, hypothèse qu'il faudra vérifier a posteriori avec des données de modélisation 1D ou 2D.
 - 1)** Selon la première approche, les pieux sont placés perpendiculairement à l'axe du lit mineur et majeur, ceux en lit majeur sont rehaussés de 30 cm par rapport à ceux dans le lit mineur afin de concentrer le flux dans le lit mineur et d'éviter le contournement de l'ouvrage. Les pieux sont de largeur $B_s = 30 \text{ cm}$, de hauteur $z = 3 \text{ m}$ par rapport au fond de la rivière et d'espacement $B_0 = 2 \text{ m}$ afin de protéger l'ouvrage à l'aval d'envergure $B = 3 \text{ m}$ (écartement $B_0 = 2/3 \cdot B$ recommandé plus tôt dans la section).
 - 2)** Selon la seconde approche, l'ouvrage est redimensionné pour répondre aux attentes des débits de projet, de sûreté et à la ligne d'eau maximale souhaitée (route rive droite). Il est implanté en biais selon un angle à définir afin d'augmenter sa section débitante. La largeur et l'espacement des pieux sont conservés, les paramètres à faire varier sont la hauteur des pieux z_2 , et l'angle entre l'axe du râtelier et l'axe du cours d'eau. La majorité du débit est concentré dans le lit mineur, l'implantation en biais est donc uniquement utilisée dans cette sous-section. Les valeurs optimales de hauteur et d'angle sont estimées par itérations. Avant qu'il y ait surverse, l'Eq. (4.5) permet de calculer le débit en fonction de la hauteur d'eau en prenant en compte la perte de charge induite par l'accumulation de flottants ; après qu'il y ait surverse, l'Eq. (4.7) est utilisée. La perte de débitance de l'Eq. (4.5) et du premier terme de l'Eq. (4.7), correspondant au flux à travers le râtelier, a été fixée à $\Delta Q_1^* = 0.46$ pour la valeur basse et à $\Delta Q_1^* = 0.67$ pour la valeur haute. La perte de débitance du deuxième terme de l'Eq. (4.7), correspondant au flux passant au dessus du râtelier, a été fixée à $\Delta Q_2^* = 0.46$ pour la valeur basse et à $\Delta Q_2^* = 0.81$ pour la valeur haute. La hauteur de surverse relative h^* (Figure 4.22) a été estimée après avoir calculé $\Pi = F_a/F_d$ (ratio entre la poussée d'Archimède et la force de traînée, décrit dans la section 3.3.2) : $h^* = [4 - 8]$. Le diamètre moyen des flottants est estimé à $D_{BF} = 0,2 \text{ m}$.
- **Résolution** Compte tenu des incertitudes sur la débitance et sur la hauteur de surverse relative, il faut tracer une courbe enveloppe qui couvre la plage de débits la plus étendue : la valeur basse de la hauteur de surverse relative sera associée à la débitance basse, et inversement (Fig. 4.24 et 4.25). Il est également intéressant de comparer cette courbe enveloppe avec la courbe de fonctionnement lorsqu'il n'y a pas de flottants (perte de débitance nulle). Il est important de ne pas oublier qu'une fois le relarge atteint, le terme de perte de débitance ΔQ_2^* doit être pris égal à 0, les flottants n'étant plus présents au-dessus des pieux.

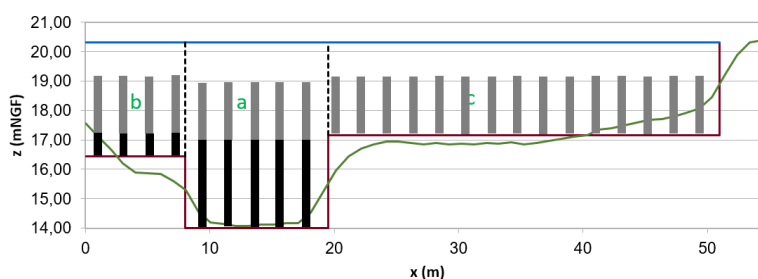


FIGURE 4.23: Profil en travers schématique du piège à embâcles : topographie réelle (courbe verte), découpage en sections équivalentes (courbes marrons), les pieux en noir représentent la variante 1) ; les pieux gris représentent la variante 2)

De plus, d'après les observations, il y a peu de production de bois flottant pour des crues d'occurrences inférieures à 10 ans, les calculs de débits avec pertes de charges associés à la présence de flottants n'ont donc peu de sens pour des débits inférieurs à la crue décennale.

Approche 1) Dans la première approche, il n'y a pas de pieux en rive droite (sous-section "c") car la côte de la berge droite est au-dessus du niveau des pieux malgré le réhaussement de 30 cm : ainsi il faut considérer uniquement le deuxième terme de l'Eq. (4.7) avec $\Delta Q_2^* = 0$ et on considère un coefficient de seuil équivalent $\mu = 0,45$ (si plus de données sont disponibles, d'autres méthodes de calculs de débits plus adaptées sont conseillées).

Approche 2) Dans la seconde approche, en rehaussant les pieux, la rive droite (sous-section "c") ne se trouve plus au-dessus de l'ouvrage, des pieux y sont alors installés. En implantant les pieux en biais par rapport à l'axe du lit mineur, cela revient à augmenter la longueur de l'ouvrage : il faut donc modifier le terme B_{0b} dans les Eq. (4.5) et (4.7). Les valeurs de hauteurs et d'angles seront optimisées par itérations pour que (i) la surverse ait lieu après avoir atteint le débit de projet ; (ii) que le relargage ait lieu plutôt au-dessus du débit de sûreté ; et (iii) que la ligne d'eau n'atteigne pas la route rive droite.

L'application des Eq. (4.5) et (4.7) pour plusieurs hauteurs d'eau et dans chaque sous-section permet, en sommant les débits obtenus, d'obtenir les graphiques des Fig. 4.24 et 4.25.

- **Résultats : Approche 1)** La Figure 4.24 permet de déduire la plage de débits pour lesquels il y aura surverse et la plage de débits pour lesquels il y aura un potentiel relargage : la surverse est atteinte lorsque la ligne d'eau dépasse la hauteur des pieux (ici pour $Z > 17$ mNGF), la courbe enveloppe des valeurs basses et hautes atteint cette valeur pour la plage de débits $Q_{surverse} = [90 - 110] \text{ m}^3/\text{s}$ (équivalent à $[Q_5 - Q_{10}]$) ; le relargage est atteint lorsque la ligne d'eau dépasse la hauteur des pieux + la hauteur de surverse relative h^* multipliée par le diamètre moyen des bois flottants $D_{BF} = 0,2 \text{ m}$, la plage de débits obtenue est $Q_{relargage} = [100 - 340] \text{ m}^3/\text{s}$ (équivalent à $[Q_{10} - Q_{2015}]$).

Le débit de projet pour lequel le piège à embâcle ne devrait pas surverser a été fixé égal au débit de la crue de 2015, c'est à dire $Q_{projet} = 240 \text{ m}^3/\text{s}$. D'après les calculs réalisés, il y aurait surverse à partir de $Q_{surverse} = [90 - 110] \text{ m}^3/\text{s}$: le piège est donc largement sous-dimensionné. Le débit de sûreté à partir duquel le piège à embâcle pourrait relarguer a été fixé égal au débit d'occurrence 500 ans, c'est à dire $Q_{surete} = 336 \text{ m}^3/\text{s}$. D'après les calculs réalisés, il y aurait relargage à partir de $Q_{relargage} = [100 - 340] \text{ m}^3/\text{s}$: cela confirme encore que le piège est largement sous-dimensionné et génère un potentiel sur-aléa en pouvant relarguer soudainement une partie des flottants piégés pour des crues de magnitude intermédiaire.

Approche 2) Une fois les paramètres de hauteur et d'angle de pieux optimisés, on peut observer sur la Figure 4.25 que la plage de débits pour laquelle il y a surverse est $Q_{surverse} = [225 - 390] \text{ m}^3/\text{s}$, la plage de débits pour laquelle il y a relargage est $Q_{relargage} > 300 \text{ m}^3/\text{s}$ et la route rive droite est atteinte pour des débits supérieurs à $Q_{routeRD} > 365 \text{ m}^3/\text{s}$ (soit pour un débit d'occurrence entre 500 et 1000 ans). Ces dimensions semblent être un bon compromis permettant des respecter les conditions de débits et de lignes d'eau voulues.

Cette application synthétique doit être affinée à l'aide de modélisations et d'études plus détaillées, elle a un but

pédagogique pour montrer un usage potentiel du jeu d'équations présenté dans ce rapport.

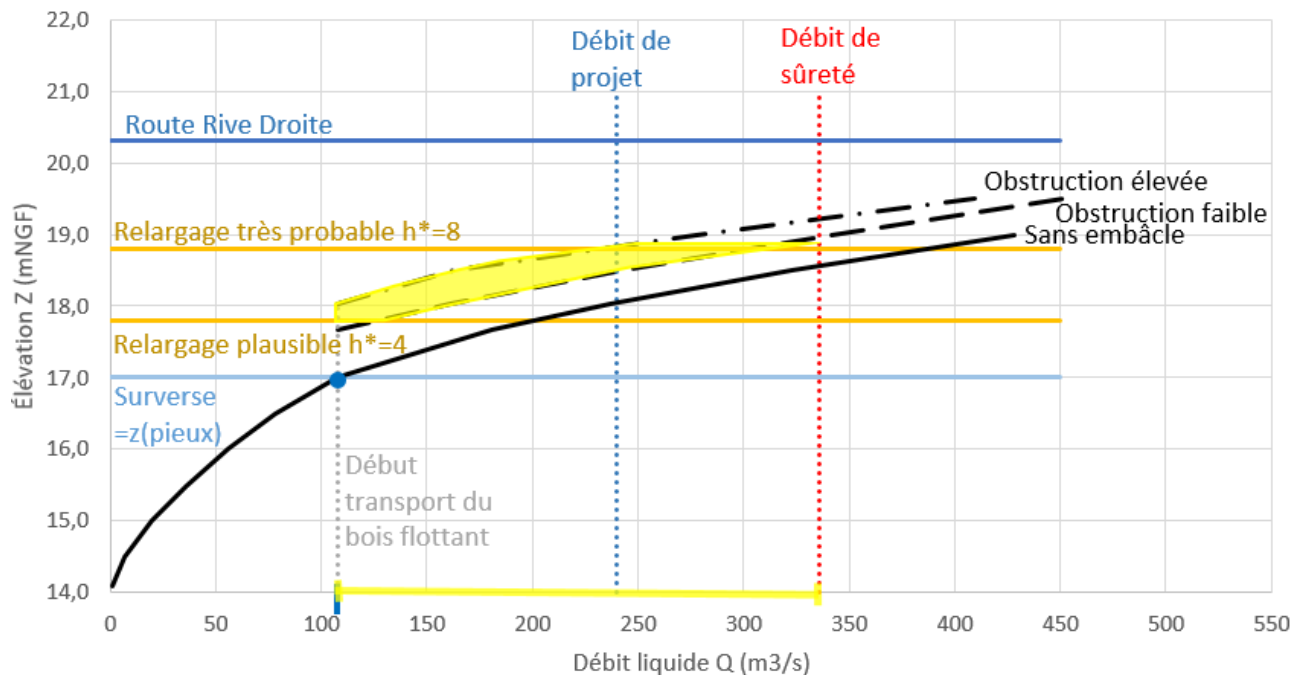


FIGURE 4.24: Courbes de fonctionnement du piège à embâcles pour des pieux de 3m dans le lit mineur et perpendiculaire à l'écoulement. Le polygone jaune correspond aux conditions d'écoulement générant un potentiel relargage des flottants au dessus de l'ouvrage.

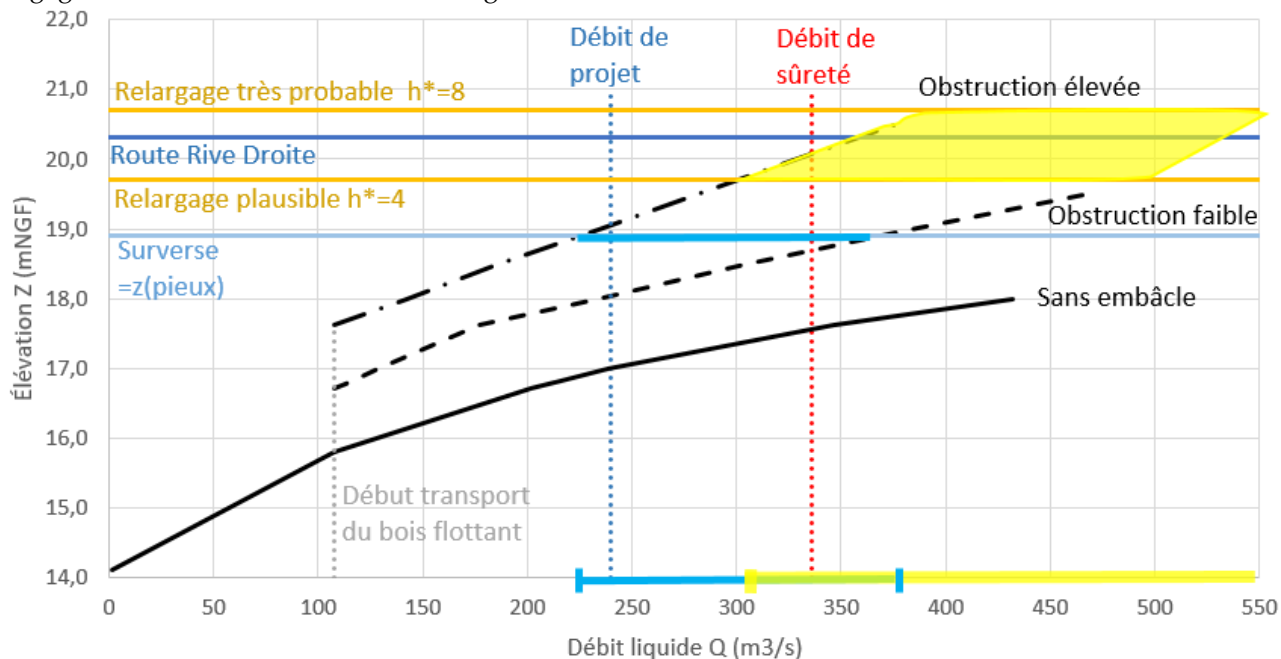


FIGURE 4.25: Courbes de fonctionnement du piège à embâcles pour des pieux de 4,9 m dans le lit mineur et en biais à 63° par rapport à l'axe du lit mineur. Le polygone jaune correspond aux conditions d'écoulement générant un potentiel relargage des flottants au dessus de l'ouvrage.

Conception des barrages à pertuis de type plage de dépôt

Des ouvrages visant à piéger les sédiments, appelés plages de dépôts en France et dépotoirs en Suisse, sont beaucoup utilisés sur les torrents des Alpes et des Pyrénées. Les barrages filtrants fermant les plages de dépôt jouent aussi un rôle plus ou moins volontaire de piège à flottants (BEZZOLA et al., 2004; LANGE et BEZZOLA, 2006). Ils forment aussi généralement un obstacle majeur à la continuité piscicole (mais la plupart de ces ouvrages équipent des cours d'eau à sec hors des crues). Ces barrages filtrants sont souvent des ouvrages verticaux équipés de pertuis ou de fente, éventuellement barrés de poutres métalliques. La présence de flottants a très régulièrement tendance à boucher les ouvertures de ces ouvrages et à générer un dépôt chronique de la charge sédimentaire (CARLADOUS et al., 2021). Ceci est parfois souhaité, faute de capacité de transport sédimentaire en aval. Dans d'autres cas, une continuité sédimentaire est souhaitable pour les événements de routine. Les barrages à pertuis ne sont pas bien adaptés à ce genre de fonctionnement et il faut alors préférer des ouvrages de type Autrichien (voir §4.2.1).

Le rapport de PITON et al. (2019c, en français) et l'article PITON et al. (2020) étudient en détail ces interactions. Ils montrent qu'en fonction de la perméabilité de l'ouvrage, les interactions entre flottants et barrage filtrant changent :

- Les ouvrages très peu perméables (ouvrages seulement équipés de barbacanes ou de fente fermée par une grille) fonctionnent de manière assez similaire à des seuils pleins ou des évacuateurs de crues de barrages réservoirs. La partie filtrante de l'ouvrage, de relativement faible section, est rapidement obstruée par les flottants (Figure 4.26). Le remous liquide formé en amont est alors si marqué que les vitesses d'approche sont normalement faibles et les accumulations d'embâcles prennent la forme de tapis de flottants. Des relargages de flottants sont possibles dans des conditions assez similaires à celles relevées sur les évacuateurs de crues (§3.5).
- Au contraire, les ouvrages très perméables (nombreux pertuis, ouvrages équipés de grilles inclinées dits "Autrichiens") fonctionnent de façon similaire aux râteliers. Des accumulations multi-couches s'y forment et les relargages éventuels apparaissent pour des hauteurs de surverse très supérieures.

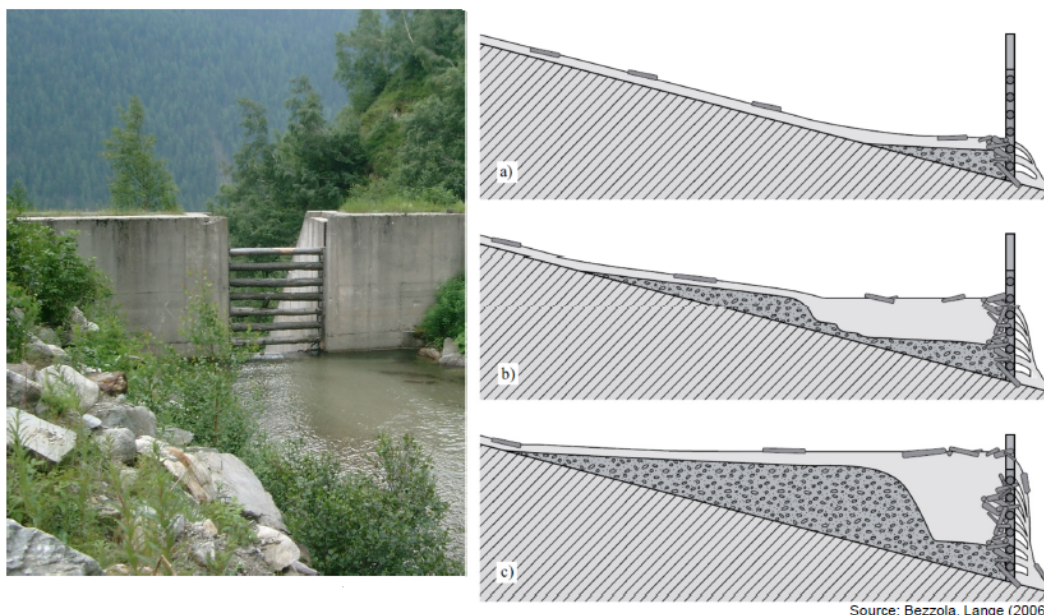


FIGURE 4.26: Barrage filtrant équipant une plage de dépôt (photo de gauche) et phases d'obstruction de l'ouvrage et effet du taux d'obstruction et du niveau d'écoulement sur le faciès de dépôt des matériaux charriés par le torrent (source : LANGE et BEZZOLA, 2006)

Probabilité d'embâcle des pertuis La probabilité d'embâcle des pertuis est estimée de la même façon que les intervalles entre les pieux des râteliers (Fig. 4.20). En présence de blocs rocheux, un critère équivalent existe pour les sédiments (PITON et RECKING, 2015).

Estimation des pertes de charges : Définition de la hauteur du barrage La capacité de débitance des pertuis peut être estimée via la formule de Grande Orifice (LENCASTRE, 1983, p. 318) :

$$Q = (1 - \Delta Q^*) \cdot \mu \cdot B_0 \cdot \frac{2}{3} \sqrt{2 \cdot g} (h^{3/2} - (h - z_1)^{3/2}) \quad (4.8)$$

avec B_0 and z_1 la largeur et la hauteur du pertuis (m) et μ le coefficient de pertuis (-), pris égal à 0.68 dans les conditions équivalentes à PITON et al. (2016), à savoir : $h/h_0 \in [1;7]$, $B_0/h_0 \in [1.7;7]$, $h/e \in [0.05;0.47]$ avec e épaisseur de la parois.

Dans le cas d'un ouvrage surmonté d'un seuil de largeur B_{0b} et équipé d'un nombre i de pertuis dont le niveau bas z_0 est éventuellement variable, la formule générale est :

$$Q = \sum_i \left((1 - \Delta Q^*) \cdot \mu_1 \cdot B_{0,i} \cdot \frac{2}{3} \sqrt{2 \cdot g} \left((h - z_{0,i})^{3/2} - (h - z_{1,i} - z_{0,i})^{3/2} \right) \right) + (1 - \Delta Q_2^*) \cdot \mu_2 \cdot B_{0b} \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot (h - z_2)^3} \quad (4.9)$$

A noter que PITON et al. (2020) ont démontré que le coefficient d'orifice des pertuis augmentait quand plusieurs orifices étaient situés à proximité les uns des autres par rapport à la valeur retenue pour un seul orifice isolé. Dans le cas de 5 orifices en parallèles, séparés d'une largeur équivalente à leur largeur d'ouverture, $\mu_1=0.72$ était le meilleur ajustement comme montré dans la Figure 4.21b. La même approche peut être utilisée pour calculer la capacité de râteliers verticaux aux piliers épais ($\mu_1=0.81$ avec 11 intervalles séparés de piliers moitiés moins épais que la largeur des intervalles). Il semble toutefois préférable d'utiliser l'Eq. (4.6) qui intègre naturellement la modification de μ via l'indice des vides ψ .

Comme démontré dans la Figure 4.21b, l'effet de la présence des flottants peut être encadré :

- **Sur les pertuis** par des termes $(1 - \Delta Q_1^*)$ entre les valeurs hautes $(1 - \overline{\Delta Q_2^*})=0.51$ (correspondant à $\overline{\beta_2} = \frac{\Delta H}{H_0} = 0.6$) et basses $(1 - \underline{\Delta Q_2^*})=0.81$ (correspondant à $\underline{\beta_2} = \frac{\Delta H}{H_0} = 0.15$).
- **Sur le seuil supérieur** par des termes $(1 - \Delta Q_1^*)$ entre les valeurs hautes $(1 - \overline{\Delta Q_2^*})=0.51$ (correspondant à $\overline{\beta_2} = \frac{\Delta H}{H_0} = 0.6$) et basses $(1 - \underline{\Delta Q_2^*})=0.76$ (correspondant à $\underline{\beta_2} = \frac{\Delta H}{H_0} = 0.2$).

Risque de relargage par surverse : Estimation du débit de sûreté Les conditions de relargages sur les ouvrages à pertuis sont estimées via le double critère $h^* & \Pi/F_D$ de la même manière que sur les râteliers (voir détails section précédente, §4.2.1). Dans la mesure où les ouvrages à pertuis ont souvent un indice des vides significativement plus faibles que les râteliers, à débit similaires, les hauteurs d'écoulement sont plus fortes (Fig. 4.21), les vitesses d'écoulement sont donc plus faibles, générant des accumulations moins compactes et légèrement plus faciles à relarguer.

Conception de pièges "lourds" de type Autrichien

Les barrages dits de type "Autrichien" sont communs en Autriche (BERGMEISTER et al., 2009) mais aussi dans les Alpes Italiennes (CERATO et COALI, 1997). Ils sont spécifiquement utilisés pour piéger les flottants et les gros blocs tout en maintenant une certaine capacité de transit de la charge sédimentaire fine et graveleuse. Ces ouvrages sont équipés de grilles inclinées, généralement avec plusieurs angles d'inclinaison (Fig.4.27). La partie basse est en général sub-horizontale et la partie intermédiaire a un angle souvent compris entre 45° et 60°. Les barres de la grille sont positionnées dans l'axe longitudinal (et non transversal), permettant aux flottants de glisser le long de l'ouvrage (D'AGOSTINO et al., 2000). Comme démontré par les essais sur modèle physique présentés dans le rapport (SEDALP, 2015, Annexe 5.1), l'inclinaison de la grille et l'axe des barres permettent de réduire l'embâclement de l'ouvrage en comparaison avec une grille verticale avec des barreaux aux axes horizontaux (transversaux). La partie basale sub-horizontale reste ainsi en général assez largement libre et non obstruée, permettant une continuité sédimentaire très supérieure aux barrages à pertuis et grilles verticales qui ont tendance à être chroniquement obstrués par des flottants (CARLADOUS et al., 2021). Un auto-curage partiel émerge sur ces ouvrages grâce à ce dégagement naturel de la section hydraulique au fond de l'ouvrage (SEDALP, 2015, p. 40). D'après les essais de ISHIKAWA et MIZUYAMA (1988), cet effet d'auto-curage est d'autant plus efficace que la partie basale sub-horizontale est longue. Cette information nous a été confirmée par des collègues Autrichiens.

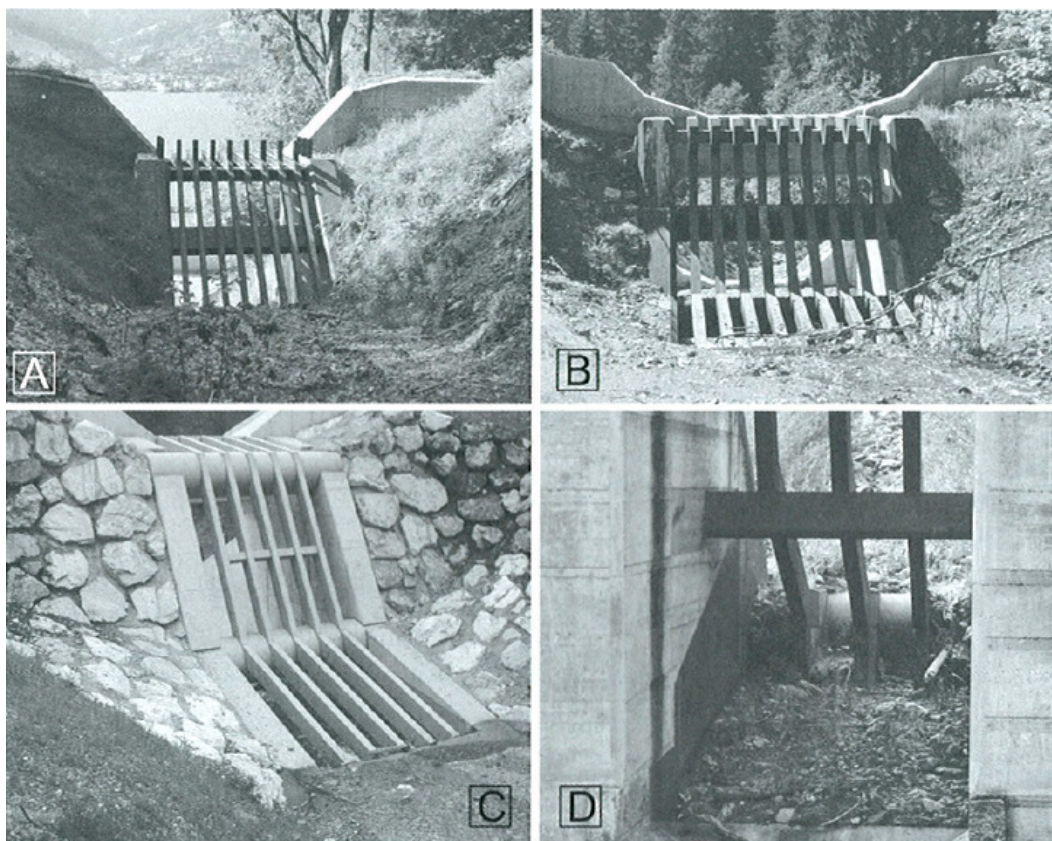


FIGURE 4.27: Photos de pièges à embâcles de type Autrichien (Source : BERGMEISTER et al., 2009, p. 42)

Ecartement des grilles L'écartement entre les grilles étant généralement très petit devant la longueur des flottants, leur blocage est assuré. Les essais menés par (SEDALP, 2015, Annexe 5.1) montre que l'auto-curage est significativement diminué si l'écartement entre les barres est de l'ordre du D_{90} des sédiments, en comparaison d'un écartement de $1.4 \cdot D_{90}$.

Estimation des pertes de charges : Définition de la hauteur du barrage Des essais sur modèle physique ont été réalisés au laboratoire hydraulique du centre INRAE de Grenoble. Trois configurations ont été testées (Fig. 4.28). Le protocole de test a été le même que pour les essais réalisés par PITON et al. (2020) sur des barrages à pertuis, à fente et sur des râteliers. Les essais ont ainsi été menés sans transport solide. La capacité hydraulique d’ouvrages de type Autrichien peut être estimée via la généralisation de l’Eq. (4.6) proposée pour les râteliers inclinés surmontés d’un seuil en considérant que chaque partie inclinée est une grille indépendante. En considérant un ouvrage équipé de J grilles inclinées aux angles α_j différents et dont les niveaux de bases et supérieurs sont respectivement notés $z_{1,j}$ et $z_{2,j}$, il est possible de calculer la capacité totale de l’ouvrage suivant (le premier terme permet l’estimation du débit passant par les différentes parties de la grille, le second terme le débit passant par dessus le seuil surmontant les grilles) :

$$Q = \sum_{j=1}^J \left[(1 - \Delta Q_1^*) \cdot B_0 \cdot 2 \cdot \sqrt{\frac{g \cdot \psi^{3 \cdot c_{1,j}}}{c_{0,j}^3}} \cdot \left((h - z_{1,j})^{3/2} - (h - z_{2,j})^{3/2} \right) \right] + (1 - \Delta Q_2^*) \cdot \mu \cdot B_{0b} \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot (h - z_{2,J})^{3/2} \quad (4.10)$$

On rappelle que suivant DI STEFANO et FERRO (2014), $c_{0,j} = 0.957 + (\sin \alpha_j)^{1.833}$ et $c_{1,j} = 1.5(\sin \alpha_j)^{0.11} - 0.9$ avec α_j (°) l’angle entre les barres et l’horizontal.

En l’absence de bois flottant, $\Delta Q^* = 0$ et l’Eq. (4.10) fournit une estimation satisfaisante des hauteurs d’eau mesurées sur modèle physique (carrés jaunes et lignes continues de la Fig. 4.29). La présence de bois flottant rehausse naturellement les lignes d’eau en créant des pertes de charge. La Fig. 4.29 indique les valeurs de surcote relative encadrant les mesures. On rappelle que la perte de débitance ΔQ^* équivalente peut être estimée par l’équation $\Delta Q^* = 1 - (1 + \beta)^{-3/2}$.

On peut noter que les valeurs hautes et basses de surcote relative sont similaires pour les configurations moins perméables (Fig. 4.28b & c : $\beta_1 = 0.15 - 1$), tandis qu’elles sont légèrement plus fortes pour la configuration la plus ouverte (Fig. 4.28a : $\beta_1 = 0.45 - 1.25$). L’explication du phénomène est directement associée à des vitesses d’écoulement plus élevées à proximité de la grille de la configuration la plus perméable permettant l’aspiration des flottants sous la surface de l’eau. A contrario, la plus faible perméabilité des deux autres configurations générerait une hauteur d’eau plus importante, même sans bois flottant, et limitait ou prévenait la formation d’embâcles denses. Comme le montre la Fig. 4.30, il semble possible d’anticiper ces deux régimes de fonctionnement en estimant le ratio $\Pi / F_D(h_0)$ calculé en ignorant les pertes de charges associées aux flottants, i.e. avec la hauteur d’eau h_0 estimée avec $\beta = \Delta Q^* = 0$. Ce calcul vise à anticiper si à l’arrivée des premiers flottants, ces derniers sont susceptibles d’être aspirés et de venir se plaquer contre la grille, ou si au contraire l’ouvrage est peu perméable et plutôt propice à la formation d’un tapis de flottants dans le bassin amont. Dans la Fig. 4.30, les pertes de charges relatives augmentent quand $\Pi / F_D(h_0)$ diminue, c’est à dire pour des embâcles plus compacts et denses et dans des conditions permettant l’aspiration des flottants sous la surface et leur plaquage contre la grille.

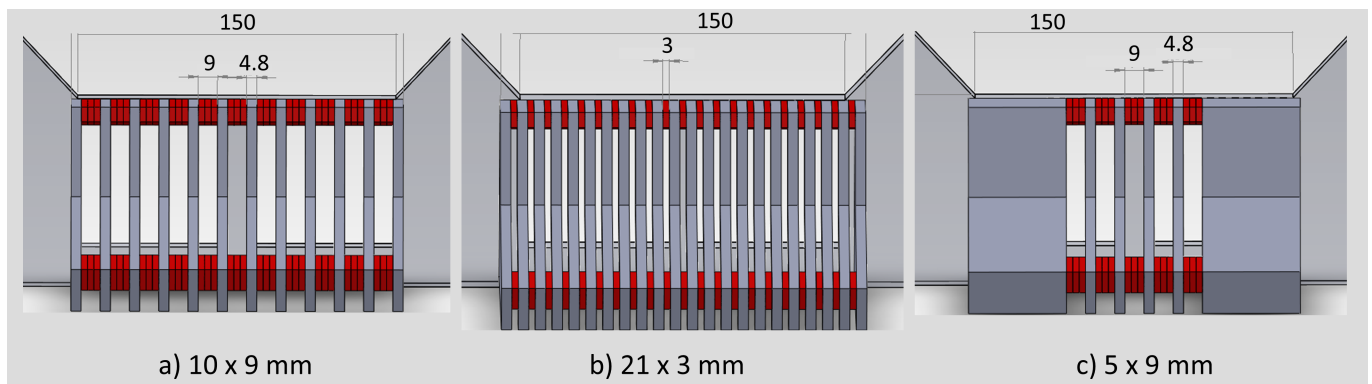


FIGURE 4.28: Vue d’amont des configurations testées sur modèle physique : a) 10 ouvertures de 9 mm de large, b) 21 ouverture de 3 mm de large, c) 5 ouvertures de 9 mm de large.

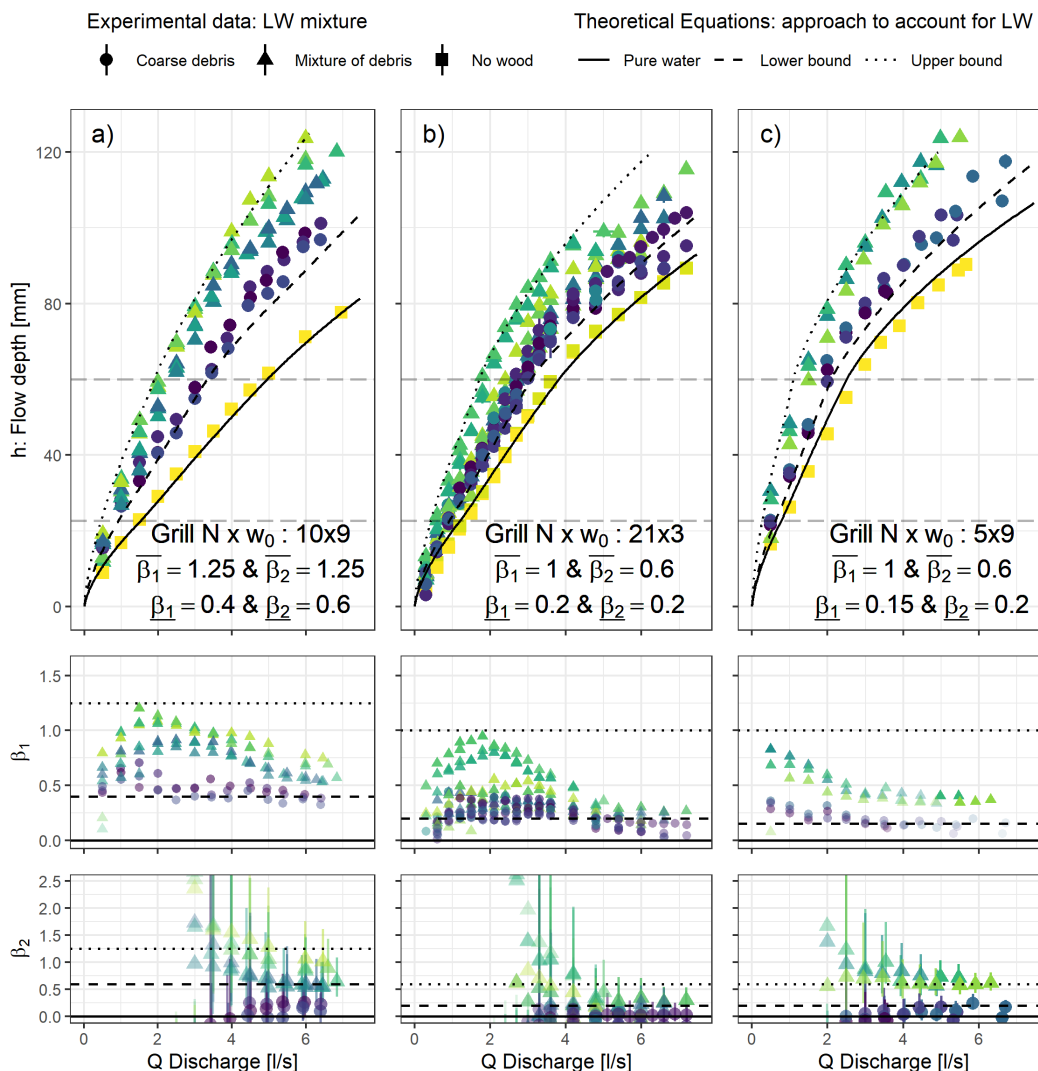


FIGURE 4.29: Performance de l'Eq. 4.10 sur des essais menés sur les configurations illustrées dans la Fig. 4.28 (panneaux supérieurs), évolution du coefficient de perte de charge au droit des grilles β_1 (panneaux centraux) et évolution du coefficient de perte de charge au droit du seuil β_2 : a) 10 ouvertures de 9 mm de large, b) 21 ouverture de 3 mm de large, c) 5 ouvertures de 9 mm de large.

L'estimation du fonctionnement d'un tel ouvrage implique donc plusieurs calculs :

1. Estimation de la hauteur d'eau sans flottants h_0 (Eq. 4.10 avec $\Delta Q^* = 0$),
2. Estimation du ratio $\Pi/F_D(h_0)$ sans flottants (Eq. 3.4),
 - Si $\Pi/F_D(h_0) < 1$, on fait l'hypothèse que les embâcles formés seront denses ($\beta_1 = 0.45 - 1.25$, $\beta_2 = 0.6 - 1.25$),
 - Si $\Pi/F_D(h_0) > 1$, on fait l'hypothèse que les embâcles formés seront plutôt des tapis de flottants ($\beta_1 = 0.15 - 1$, $\beta_2 = 0.2 - 0.6$),
3. Estimation des hauteurs d'eau avec flottants (Eq. 4.10 avec $\Delta Q^* > 0$),
4. Calcul des éventuels risques de relargages (Eq. 3.10, voir § suivant pour les valeurs critiques).

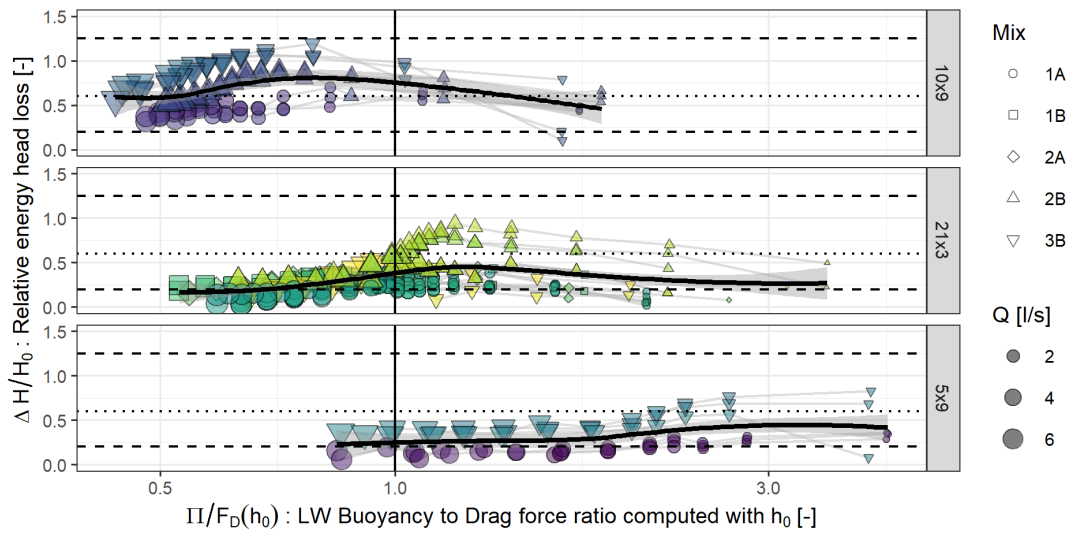


FIGURE 4.30: Perte de charge relative $\Delta H/H_0$ en fonction du ratio de la poussée d’Archimède sur la force de trainée $\Pi/F_D(h_0)$, calculée en ignorant les pertes de charges associées aux flottants, i.e. avec la hauteur d’eau h_0 estimée avec $\beta = \Delta Q^* = 0$. Évidence de perte de charge relative qui augmente quand $\Pi/F_D(h_0)$ diminue, c’est à dire pour des embâcles plus denses et multi-couches.

Risque de relargage par surverse : Estimation du débit de sûreté Les essais en laboratoire ont montré que les relargages avaient lieu dans la gamme de variation de la hauteur de surverse adimensionnelle $h^* = \frac{h-z_2}{D_{BF}} \in [3; 10]$ (Fig. 4.31). Au contraire des essais sur les barrages souples, sur les râteliers et ouvrages à pertuis ou à fente, il n’a pas été détecté de variation des conditions de relargage avec le ratio Π/F_D : le phénomène est assez aléatoire et des relargages sont observés pour des h^* faibles comme forts, que Π/F_D soit <1 ou >1 .

Comme pour les autres ouvrages, nous suggérons d’estimer la gamme de débits correspondant à l’atteinte de ces conditions de relargage et de communiquer l’information (éventuellement associée à des périodes de retour) pour indiquer la magnitude des crues générant de potentiels dysfonctionnements de piéages.

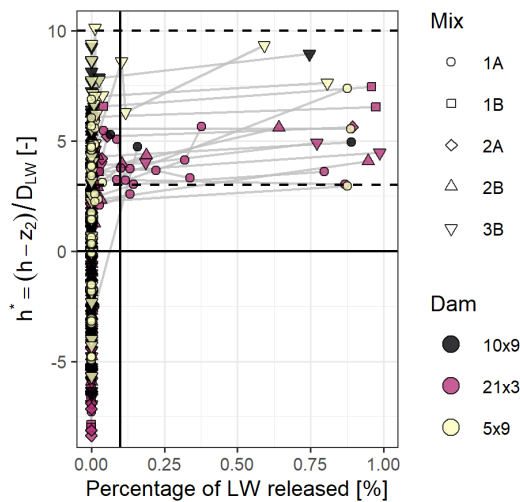


FIGURE 4.31: a) Conditions d’écoulement (hauteur de surverse relative $h^* = \frac{h-z_2}{D_{BF}}$ et ratio de flottants relargués. Les relargages ont lieu dans la gamme $h^* = [3; 10]$.

4.2.2 Ouvrages expérimentaux : piégeage diffus

Ce type de dispositif vise à faciliter un piégeage diffus. Il est composé de pieux disposés de façon éparse comme sur la Figure 4.32 ou latérale (en épi) comme illustré sur la Figure 4.33, ils ont une efficacité de piégeage moins forte que les barrages transversaux montrés plus haut mais génèrent des surcotes de ligne d'eau très limitées. Ils s'inspirent en fait du phénomène naturel de formation de dépôt contre les arbres et les îles. Leur intégration paysagère peut interpeller les potentiels utilisateurs.



FIGURE 4.32: Exemple des pieux disposés en rivière pour du piégeage diffus (source : GERTSCH, 2019)



FIGURE 4.33: Exemple de grille en épi (source : GERTSCH, 2019)

4.2.3 Ouvrage en dérivation

L'idée est de rediriger les bois flottants en lit majeur et de les empêcher de revenir dans le lit mineur. La séparation des bois flottants de l'écoulement de la rivière est réalisée naturellement par les courants secondaires induits par une courbe de la rivière, qui dirigent les flottants vers les berges. Un débordement franc en lit majeur est nécessaire. Ce type d'ouvrage n'est donc pas adapté aux cours d'eau divagants ou aux configurations torrentielles où la hauteur d'eau n'est pas significativement supérieure au diamètre des flottants. Le principe de cette solution est présenté dans la Figure 4.34 et illustré par l'ouvrage réel de la Figure 4.35. Les bois flottants sont piégés dans le lit majeur par un râtelier. Les avantages et l'efficacité de cette structure de rétention ont été vérifiés par des expériences en modèles réduits (SCHMOCKER et WEITBRECHT, 2013).

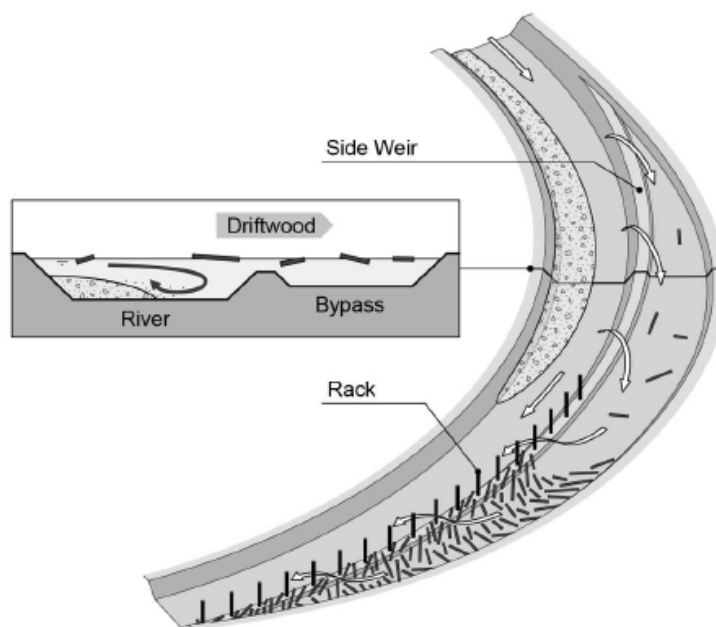


FIGURE 4.34: Principe de fonctionnement d'un piège en dérivation (SCHMOCKER et WEITBRECHT, 2013)



FIGURE 4.35: Image et infographie de l'ouvrage construit (source : GERTSCH, 2019)

4.3 Gestion à l'échelle du bassin versant

4.3.1 Entretien et restauration de la végétation rivulaire

L'entretien et la restauration de la végétation rivulaire est une composante de la gestion des embâcles. Des guides pratiques fournissent des recommandations pour l'élaboration et l'implémentation des Plans Pluri-annuel d'Entretien (BOYER, 1998, 2008). Ce sujet dépasse la portée du présent guide. Cet entretien se concentre historiquement sur le retrait du bois mort, sur l'abattage des arbres menaçants et instables, et sur l'élagage ou le recépage des sujets ligneux menaçant de tomber du fait de leur grande taille, de leur position sur la berge, ou de leur état phytosanitaire. Il ne faut toutefois pas se faire d'illusion quant à l'efficacité de ce mode de gestion : il ne permet de traiter qu'une source partielle des bois flottants.

Puisque les cours d'eau sont généralement bordés de corridors boisés, les érosions de berges et de versants touchent nécessairement la végétation rivulaire, quel que soit l'état du milieu (végétation pionnière, mature, sénescence). Une conséquence naturelle de cette activité morphogène est donc que des quantités importantes de bois flottants sont recrutés par les écoulements. Les berges boisées des cours d'eau et les glissements de terrain sont ainsi les principaux pourvoyeurs de bois flottants (Chap. 1). *Le transport de quantités significatives de bois flottants est ainsi quasi systématiquement observé pendant les crues morphogènes des cours d'eau.*

On note une croyance tenace que les bois flottants sont issus d'arbres morts présents, avant la crue, dans le lit des cours d'eau. Or, il est prouvé que la grande majorité des flottants formant les embâcles pendant les crues majeures sont issus d'arbres sains (Chap. 1). Un indice évident de ce phénomène est l'élargissement des lits des cours d'eau torrentiels lors des épisodes de crues majeures, élargissement qui implique le recrutement par les flots de nombreuses zones boisées. La présence de flottants lors des crues majeures est ainsi inévitable. Il faut apprendre à vivre avec, tel que souligné dans les sections précédentes, éviter de construire des ouvrages sensibles et remplacer ou protéger les existants.

4.3.2 Gestion intégrée du bois mort

Cette partie retranscrit un protocole de gestion du bois flottant et des embâcles en rivière. Il est destiné aux gestionnaires de l'entretien de la ripisylve et du bois mort. Ce protocole s'appuie sur les règles établies dans le guide de WOHL et al. (2019) intitulé : *"Managing for large wood and beaver dams in stream corridors"* (Gestion du bois flottant et des barrages de castors dans les corridors fluviaux). Le principal objectif de ce guide est de proposer des méthodes permettant d'identifier les tronçons de rivière pour lesquels la présence de bois flottant maximise les effets bénéfiques sur l'environnement, tout en minimisant les dommages potentiels (environnementaux ou structuraux). Il propose d'identifier ces portions de rivière par des observations sur le terrain organisées suivant des *"check lists"* simples. Les observations visent à déterminer la meilleure solution pour limiter les impacts négatifs, parfois par du retrait, du billonnage, de la surveillance, par des structures de rétention pour piéger les bois flottants, voire parfois par la réintroduction du bois dans la rivière. WOHL et al. (2019) soulignent le fait que la réintroduction de bois flottant dans la rivière est plus efficace si les règles suivantes sont appliquées :

- Il est plus simple, moins coûteux et plus efficace de réhabiliter par la présence de bois flottants des tronçons de rivière partiellement dégradés, et d'étendre ensuite la longueur des tronçons non dégradés, que de tenter de réhabiliter directement des tronçons très dégradés ;
- Il est souvent peu efficace de réintroduire du bois dans des tronçons de rivière dont la probabilité de recruter plus de bois par la suite est faible ;
- Il est essentiel de considérer l'environnement de la rivière avant toute décision d'action, afin de prendre en compte, par exemple, les organismes attirés par la présence de bois flottant ;
- La réintroduction de bois dans une rivière doit être cohérente avec la morphologie du cours d'eau, l'hydraulique de la zone, ainsi que la présence d'enjeux vulnérables riverains.

4.3.3 Identification des tronçons maximisant les effets bénéfiques sur l'environnement

Le but est ici d'identifier les tronçons de rivière pour lesquels la présence de bois flottants va avoir un effet bénéfique maximal sur l'environnement, et dont les effets négatifs seront minimales. Ce protocole a pour objectif de créer des règles relativement simples, peu coûteuses et basées sur des observations sur le terrain, afin de constituer des aides à la décision pour les gestionnaires de bassins.

Scénario de conservation des bois flottants

Une première liste de questions simples permet tout d'abord d'évaluer les dommages potentiels qui pourraient justifier de retirer des bois flottants, un embâcle ou un barrage de castors. Cette étape (Niveau 1) se base soit sur les observations et les connaissances du terrain, soit sur une analyse du Modèle Numérique de Terrain (MNT) et des données SIG, qui permettent d'identifier les zones à risques, qui nécessitent une intervention prioritaire. En fonction de la réponse à ces questions, d'autres étapes sont envisagées :

- Une analyse de la stabilité de l'embâcle pour la rétention de bois (Niveau 2);
- Une analyse en utilisant des aides à la décision (Niveau 2);
- Une phase de conception pour la réintroduction de bois flottant ou de castors dans la rivière.

Ces différentes étapes sont résumées dans la Figure 4.36.

Les tronçons à risques des cours d'eau peuvent être identifiés grâce à des retours d'expérience concernant le bassin versant ou des analyses de données SIG. Une fois ces tronçons identifiés, les checklists de terrain fournies dans les Figures 4.37 et 4.38 peuvent être utilisées pour évaluer rapidement la situation dans la zone d'étude. Le risque représenté par le bois flottant peut être déterminé en évaluant le danger imminent qu'il représente concernant la sécurité publique, des propriétés et infrastructures, et les questions réglementaires (obligation légale). Ces outils d'aide à la décision peuvent être utilisés pour déterminer de façon plus objective les bénéfices et risques associés à un amas de bois flottant. Dans le cas où ce dernier constitue un danger imminent, il peut être justifié de le retirer entièrement ou partiellement de la rivière, ou de le modifier par exemple par billonnage dans le cadre d'un plan de gestion. Ce plan de gestion peut par exemple préconiser de :

- Contrôler/surveiller l'évolution de l'embâcle;
- Étêter ou élaguer des arbres sur les berges;
- Déplacer/retirer quelques éléments de bois flottant de l'accumulation;
- Retirer une partie de l'accumulation;
- Stabiliser l'embâcle, par exemple par câblage ou par des pieux;
- Installer des structures de rétention en aval des zones de recrutement de bois;
- Mettre en place une signalisation pour prévenir de la présence de l'embâcle et alerter les usagers de la rivière;
- Empêcher la circulation des usagers sur ce tronçon de rivière.

Quel que soit le mode de gestion employé, des opérations de sensibilisation des riverains et des élus à la perception du bois mort en rivière doivent être déployées afin que les choix retenus soient expliqués et puissent être compris (à défaut d'être acceptés ou encouragés).

Les checklists de Niveau 1 fournissent une évaluation relativement simple et rapide des potentiels dangers causés par la présence d'un embâcle ou d'un barrage de castors, et fournissent des conseils pour évaluer au mieux la situation. Après avoir rempli une checklist de Niveau 1, si l'embâcle n'est pas considéré comme représentant un danger imminent, le gestionnaire de bassin peut procéder à la checklist de niveau 2, qui permet d'analyser la situation de façon plus détaillée.

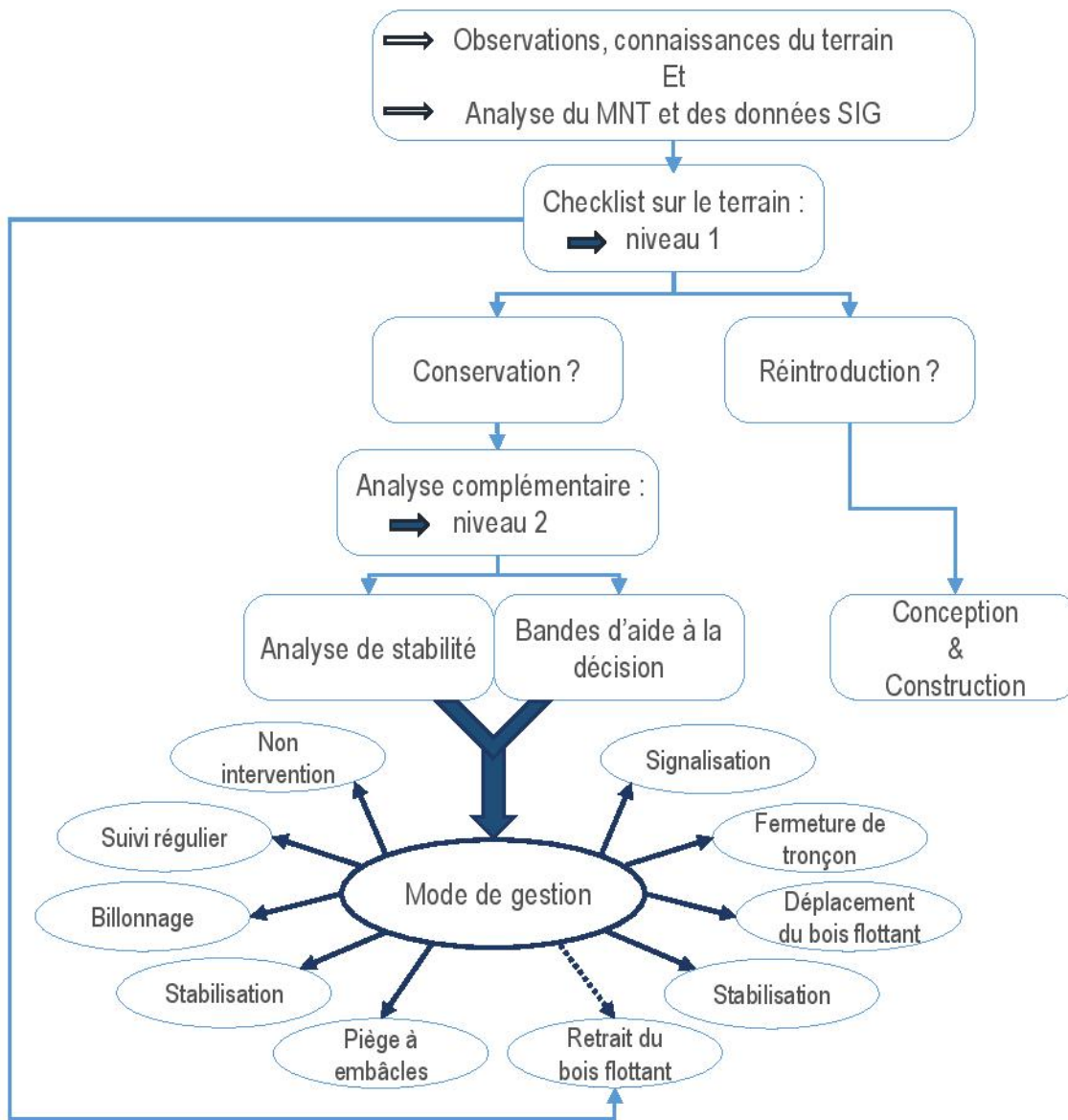


FIGURE 4.36: Schéma du processus à choix multiples pour évaluer les embâcles. Les points d'interrogations indiquent de potentiels scénarios alternatifs (schéma tiré et traduit de WOHL et al., 2019)

Scénario de réintroduction de bois

Une check list est aussi fournie pour aider à la décision d'opération de réintroduction de bois flottant (Figure 4.38).

<u>Checklist de Niveau 1 : Première évaluation de la conservation de bois flottants individuels ou d'embâcles</u>	
<p>1) <u>Danger imminent pour la sécurité publique</u></p> <p>a) Est-ce qu'un accident impliquant du bois dans la rivière a été relevé ?</p> <ul style="list-style-type: none"> • Si oui → retirez le bois • Si non → continuez en considérant pour l'instant la conservation du bois dans/proche de la rivière <p>b) Est-ce que l'embâcle présente des interstices suffisants pour potentiellement piéger les usagers naviguant à des fins récréatives ? Peut-il complètement bloquer une section de rivière dans un endroit et à une période connus pour être beaucoup utilisés à des fins récréatives ?</p> <ul style="list-style-type: none"> • Si oui → retirez le bois • Si non → continuez en considérant pour l'instant la conservation du bois dans/proche de la rivière <p>2) <u>Danger imminent pour les propriétés et infrastructures</u></p> <p>a) Du bois a-t-il déjà endommagé un établissement ou une structure privée ou publique ?</p> <ul style="list-style-type: none"> • Si oui et qu'il n'existe pas d'autres alternatives de gestions viables → retirez le bois • Si non et que d'autres alternatives de gestions peuvent être viables → continuez en considérant pour l'instant la conservation du bois dans/proche de la rivière 	<p>b) Est-ce que le bois pourrait potentiellement causer (ou augmenter l'ampleur) des dégâts sur un établissement ou une structure privée ou publique, qui pourraient mener à son dysfonctionnement ?</p> <ul style="list-style-type: none"> • Si oui et qu'il n'existe pas d'autres alternatives de gestions viables → retirez le bois • Si non et que d'autres alternatives de gestions peuvent être viables → continuez en considérant pour l'instant la conservation du bois dans/proche de la rivière <p>3) <u>Législation</u></p> <p>Etes-vous pour une quelconque raison, contraint légalement de retirer le bois de la rivière ?</p> <ul style="list-style-type: none"> • Si oui → retirez le bois • Si non → continuez en considérant pour l'instant la conservation du bois dans/proche de la rivière <p>4) <u>Synthèse</u></p> <p>Si la réponse à toutes les questions précédentes est 'Non' → laissez le bois dans la rivière</p> <p>Si vos réponses sont différentes selon les questions précédentes, ou si elles nécessitent plus de qualifications → continuez l'analyse et conservez le bois dans la rivière pour le moment.</p>

FIGURE 4.37: Première checklist : traitement du bois flottant (issue de WOHL et al., 2019)

<u>Checklist de Niveau 1 : Première évaluation concernant la possible réintroduction de bois</u>	
<p>1) <u>Danger pour la sécurité publique</u></p> <p>a) La présence d'un embâcle présenterait-elle un danger pour les usagers de la rivière ?</p> <ul style="list-style-type: none"> • Si oui → considérez soit de chercher un autre site de réintroduction, soit d'évaluer d'autres options pour minimiser le danger • Si non → continuez en considérant une possible réintroduction du bois <p>2) <u>Danger pour les propriétés et infrastructures</u></p> <p>a) L'embâcle pourrait-il endommager un établissement ou une structure privée ou publique ?</p> <ul style="list-style-type: none"> • Si oui → considérez soit de chercher un autre site de réintroduction, soit d'évaluer d'autres options pour minimiser le danger • Si non → continuez en considérant une possible réintroduction du bois 	<p>3) <u>Législation</u></p> <p>Etes-vous pour une quelconque raison, contraint légalement d'empêcher la présence de bois dans la rivière ?</p> <ul style="list-style-type: none"> • Si oui → ne considérez pas d'autres sites de réintroduction • Si non → continuez en considérant une possible réintroduction du bois <p>4) <u>Synthèse</u></p> <p>Si la réponse à toutes les questions précédentes est 'Non' → réintroduisez du bois dans la rivière</p> <p>Si vos réponses sont différentes selon les questions précédentes, ou si elles nécessitent plus de qualifications → considérez une réintroduction de bois tout en analysant plusieurs options afin de minimiser les potentiels dégâts/dangers.</p>

FIGURE 4.38: Deuxième checklist : réintroduction de bois mort en rivière (issue de WOHL et al., 2019)

4.3.4 Analyse de Niveau 2 en utilisant des aides à la décision

Afin d'affiner le jugement, des outils d'aide à la décision ont été développés entre autres par un groupe d'ingénieurs en génie civil et hydraulique, des écologues, des géomorphologues, et de spécialistes des sports d'eaux vives. Ces outils sont destinés à accompagner l'évaluation du bois directement sur le terrain, en fournissant une analyse plus détaillée que les checklists de Niveau 1. Ils compilent des critères portant sur les milieux aquatiques et rivulaires, les usagers de la rivière, ses habitants et infrastructures. Des scores variables doivent être assignés à chaque critère (de 1 à 3). Les critères sont par ailleurs pondérés avec des poids suggérés par les créateurs mais modifiables par le décisionnaire. L'utilisation de ces outils peut ainsi être ajustée pour refléter au mieux les caractéristiques de la zone d'étude. L'ensemble de ces critères sont enfin agrégés, ici encore pondérés par l'utilisateur, pour obtenir une note finale permettant d'aider à la décision (Figure 4.47). Les différents critères sont rassemblés sous forme de volets associés aux aspects principaux des effets du bois flottant. Les paragraphes qui suivent présentent synthétiquement ces volets.

Milieux aquatiques Le volet "A" porte sur les potentielles altérations que le retrait du bois flottant peut avoir sur les écosystèmes aquatiques associés (Figure 4.39). La première ligne est destinée à aider l'utilisateur à déterminer si la qualité d'habitat risque fortement d'être altérée suite au retrait du bois de la rivière (=score élevé), ou si ce retrait ne va avoir que des conséquences négligeables sur cet habitat (=score faible). La deuxième ligne analyse les différents types d'habitats que l'embâcle peut engendrer. Un habitat aquatique diversifié présente une diversité des profondeurs d'eau, des vitesses d'écoulement, de la granulométrie, des caractéristiques du lit de la rivière. L'importance de l'habitat associé à la présence de bois flottant prend en compte l'abondance ou non de bois flottant sur le tronçon en question, le besoin de cet habitat pour des espèces clés. Par exemple, si le bois mort crée la seule mouille sur un tronçon, il est hautement probable que son retrait entraîne une réduction des habitats, son score devra donc être élevé (=3). Si le bois flottant ne crée pas de mouille ou seulement de taille négligeable, alors son intérêt est faible, et son score devra l'être aussi (1). Un embâcle qui crée un habitat pour une espèce en danger devra recevoir un score élevé (=3). La dernière ligne analyse si l'habitat engendré par la présence d'un embâcle va probablement exister sur une courte période (< 5 ans), ou sur une période plus longue (5 à 100 ans et plus). Si un embâcle a de fortes chances de résister pendant une longue période, alors l'altération de l'habitat aquatique liée à son retrait va être élevée. Ce dernier critère dépend directement de la mobilité des éléments de bois mort formant l'embâcle, sujet abordé dans les chapitres précédents.

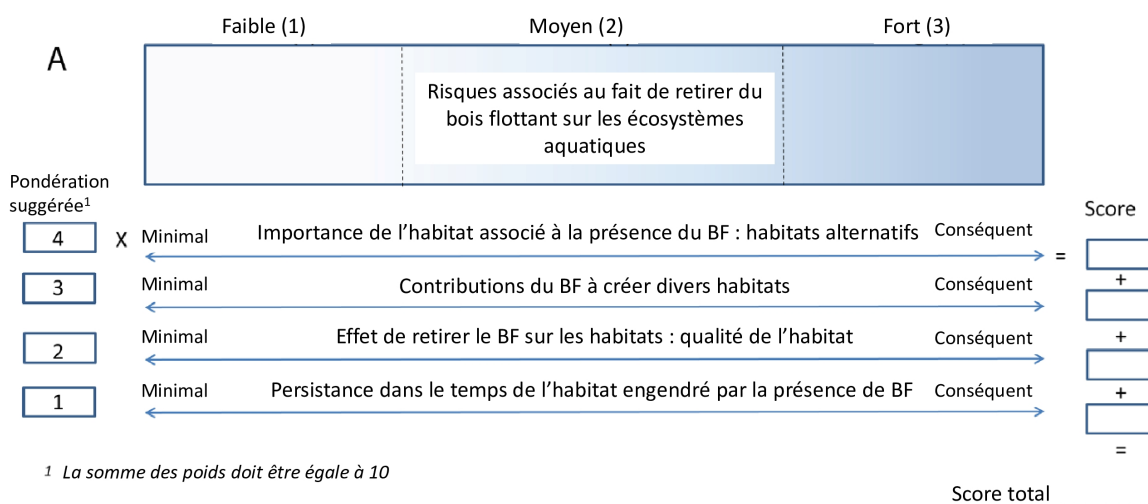


FIGURE 4.39: Volet "A" sur les critères associés aux écosystèmes aquatiques

Milieux terrestres Le volet "B" comporte les mêmes paramètres, mais ils sont appliqués aux écosystèmes des berges et du lit majeur (Figure 4.40). Lorsqu'un embâcle s'étend sur toute la largeur du chenal et une partie du lit majeur, les volets (A) et (B) doivent être utilisés pour évaluer correctement l'impact possible de l'embâcle sur l'ensemble de son environnement.

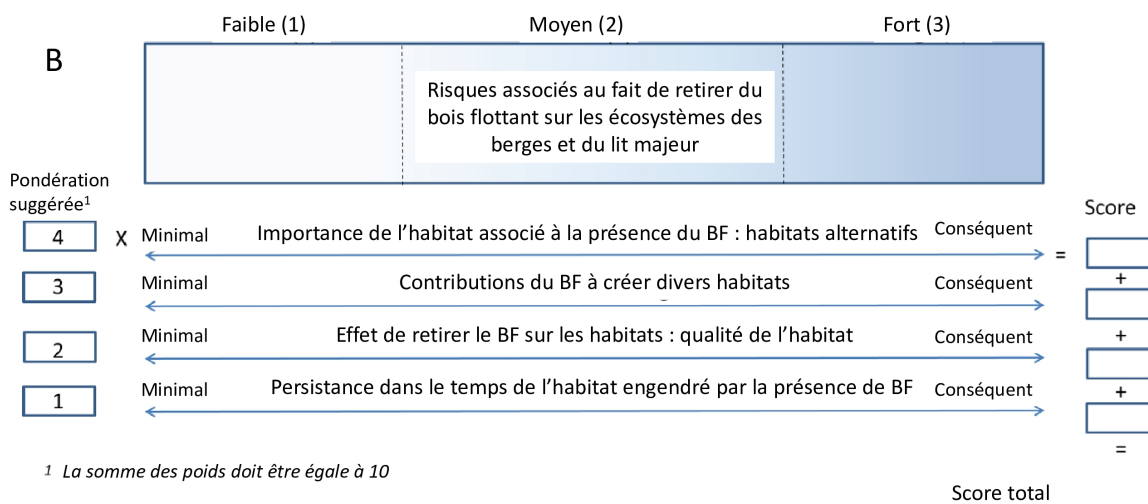


FIGURE 4.40: Volet "B" sur les critères associés aux écosystèmes rivulaires

Activités de loisirs (sports d'eau vive et pêche) Les volets "C" et "D" (Figures 4.41 et 4.42) portent sur les impacts potentiels des embâcles sur les activités de loisir attachées aux cours d'eau (par exemple les sports d'eau vive ou la pêche). Concernant la pêche, les embâcles ont un rôle ambivalent puisqu'ils constituent à la fois un risque d'accrochage et de perte du matériel de pêche, mais ils favorisent aussi le maintien et la régénération de populations piscicoles plus abondantes, et peuvent donc avoir un impact positif sur la pratique de la pêche. Le volet "C" analyse les caractéristiques de l'embâcle, comme par exemple sa localisation, ou sa taille. Cet impact ne va pas dépendre de l'activité pratiquée ou des caractéristiques du cours d'eau. Au contraire, le volet "D" considère l'impact de l'embâcle selon les caractéristiques de l'activité et du cours d'eau, et non plus des propriétés de l'embâcle en lui-même. Cette distinction permet plus de flexibilité pour maintenir un embâcle ayant un score élevé dû à ses caractéristiques (Volet "C"), mais dont la visibilité ou les capacités de l'utilisateur réduisent les risques à un niveau acceptable. La première ligne du volet "C" traite de la localisation du flottant : par exemple selon les caractéristiques de l'embâcle, une accumulation de bois flottant dans une zone à fort courant, ou dans l'extrados du cours d'eau va avoir plus d'impact et va représenter plus de risque pour l'utilisateur qu'un embâcle dans une zone de courant faible ou en lit majeur. L'orientation du bois mort dans le lit peut agir comme un filtre et est traitée dans la 2ème ligne du volet "C". La 3ème ligne donne un score sur le potentiel d'accrochage, qui dépend de la forme et la présence de branches. Enfin, la présence ou non de câbles d'ancrage exposés peut être un facteur de risque aggravant pour l'utilisateur, une note est attribuée à ce risque en 4ème ligne du volet "C".

La facilité d'accès sur le tronçon va permettre dans un premier temps de caractériser le risque pour l'utilisateur, si le tronçon est inaccessible à toutes personnes, le risque associé (et donc le score de la 1ère ligne de la Figure 4.42) sera faible. En outre, un embâcle va engendrer plus de risques s'il se forme dans un ruisseau étroit ou un torrent avec un fort courant et une forte pente, que sur des segments de rivière plus larges, avec une vitesse d'écoulement plus faible (2ème ligne de la Figure 4.42). Le fait qu'un embâcle soit facilement visible ou non va être le principal facteur déterminant le risque que cette accumulation de bois flottant représente pour le pratiquant de sport d'eaux vives. Ce risque dépend aussi de l'activité pratiquée par l'utilisateur et donc de la capacité à éviter l'embâcle : une personne flottant dans une bouée aura par exemple plus de difficultés à l'éviter qu'un kayakiste (3ème ligne de la Figure 4.42). Quelle que soit l'activité pratiquée et le niveau d'expérience de l'utilisateur, la signalisation de la présence

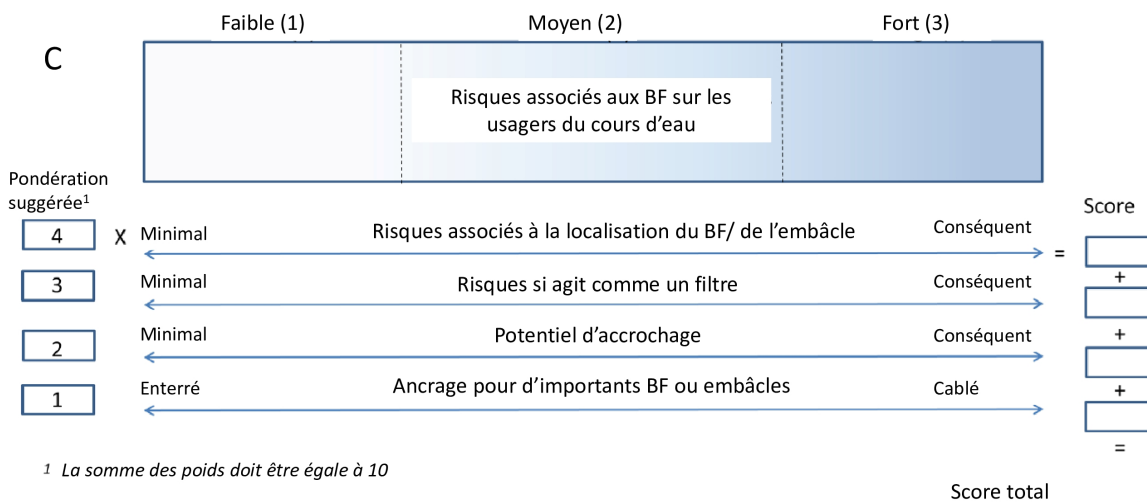


FIGURE 4.41: Volet "C" sur les critères associés aux sports d'eaux vives (critères concernant l'embâcle)

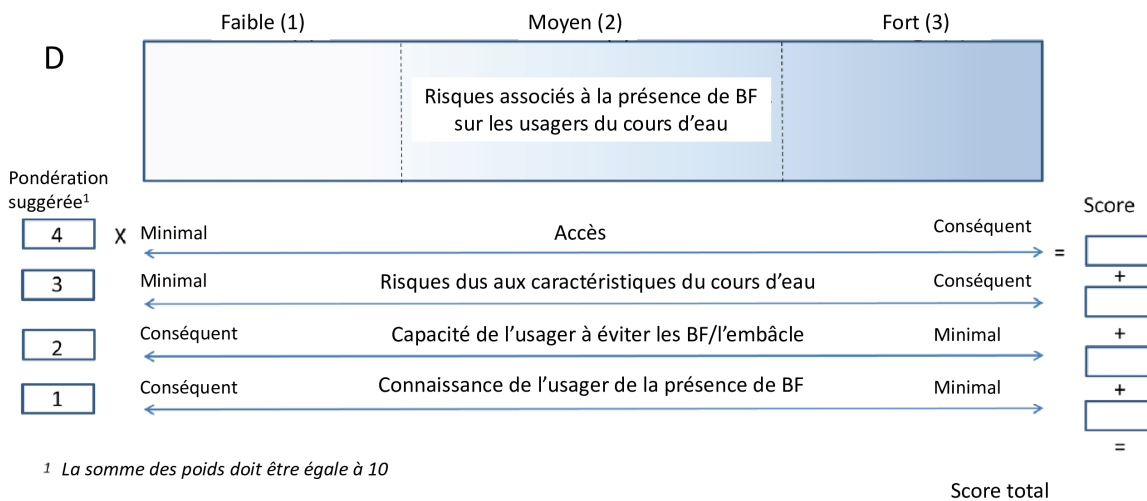


FIGURE 4.42: Volet "D" sur les critères associés aux sports d'eaux vives (critères concernant les usagers)

d'un embâcle réduit le danger, alors que l'apparition soudaine d'une accumulation de bois en rivière augmente fortement les risques sur l'utilisateur (4ème ligne de la Figure 4.42).

Risques d'inondation locaux et distants Le volet "E" permet d'évaluer les risques concernant les potentiels coûts et autres conséquences sur les infrastructures et les propriétés privées, en considérant les caractéristiques du cours d'eau et de son lit majeur (Figure 4.43). La construction d'infrastructures et le développement des zones urbaines en lit majeur parfois proches du lit mineur, tend à augmenter les potentiels sinistres lors d'une inondation du lit majeur ou de changements concernant l'écoulement du cours d'eau. Il est donc primordial d'accorder une importance particulière à l'empiètement des zones urbaines sur les zones de possible formation d'un embâcle sur l'évaluation du risque (1ère ligne de la Figure 4.43). Cette analyse nécessite également de bien comprendre les paramètres physiques qui contrôlent une crue ou une inondation. Le degré de blocage du chenal, d'obstruction à l'écoulement et la réduction de section du cours d'eau engendrés par un embâcle doivent donc être considérés (2ème ligne de la Figure 4.43). L'obstruction du cours d'eau implique nécessairement une augmentation de la ru-

gosité, et est caractérisée par le coefficient de Manning. Un score lui est associé (3ème ligne de la Figure 4.43) afin de souligner l'importance du changement de rugosité induit par l'embâcle.

Remarque : La surélévation de ligne d'eau induite par les embâcles peut être bénéfique dans une logique de réduction de l'aléa à l'échelle du bassin versant lorsque les débordements précoces sont générés sur des zones à faibles enjeux (têtes de bassins versants par exemple), en mobilisant les zones d'expansion de crue et leurs fonctions de rétention/laminage des crues débordantes (cela valorise en même temps le développement des fonctions de type "zones humides"). Ceci ne reste valable que pour des crues de faible ampleur et dans la mesure où les embâcles ne risquent pas de dévaler à court terme sur des zones à enjeux en aval.

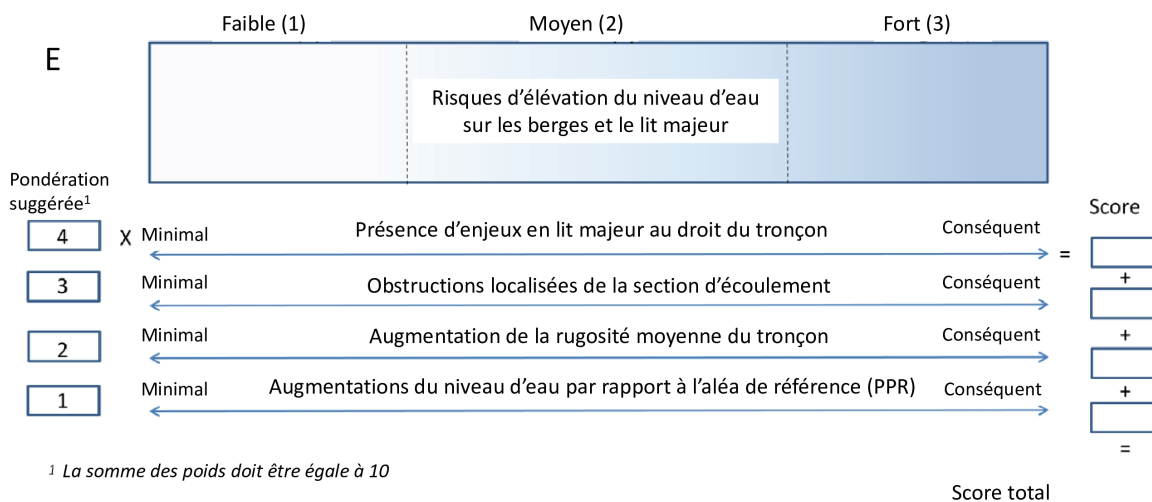


FIGURE 4.43: Volet "E" sur les critères associés aux **risques inondations locaux**

Un embâcle qui génère de faibles risques à sa localisation actuelle peut néanmoins engendrer des risques plus importants si une partie significative de l'embâcle ou même l'embâcle entier est transporté en aval, jusqu'à atteindre une zone où il pourrait alors exacerber l'ampleur d'une inondation ou d'une crue, et ainsi menacer un bâtiment ou une infrastructure, c'est l'objet du volet "F" (Figure 4.44). Ce volet est prévu pour estimer qualitativement la probabilité d'un embâcle à être transporté ou du moins déplacé en aval, sans faire référence aux conditions spécifiques en aval. Ce dernier point est traité dans le volet "G" (Figure 4.45).

Une fois que des bois flottants ou une accumulation de flottants sont transportés en aval, leur potentiel à engendrer des risques dépend du type de structures hydrauliques et d'infrastructures que ces éléments rencontrent (Figure 4.45). Plus la distance entre le bois flottant et les infrastructures vulnérables en aval est grande, plus il est probable que ce bois flottant se dépose à un moment sur sa route, ce qui augmente les chances qu'il se stabilise à nouveau, ou qu'il puisse être retiré de la rivière.

La probabilité que du bois flottant endommage des structures hydrauliques est extrêmement variable. La capacité d'une structure à laisser passer plus ou moins facilement le bois flottant va dépendre des dimensions des ouvertures comparées aux dimensions des bois flottants, de l'écartement des piles de ponts par exemple, de leur forme et orientation, mais aussi de la présence éventuelle de solutions techniques ou structurelles pour limiter l'impact des bois flottants sur la structure. La présence éventuelle de solutions techniques ou structurelles pour limiter l'impact des bois flottants sur la structure, mais aussi la variation de la géométrie du cours d'eau en approche de la structure (un resserrement brutal augmente les risques d'embâcles).

Il existe en effet de nombreuses solutions techniques pour limiter l'impact des bois flottants sur une structure, comme vu précédemment. Toutefois, évaluer la vulnérabilité d'une structure et l'efficacité d'une solution requière des connaissances approfondies à la fois sur la structure en elle-même, mais aussi sur les caractéristiques hydrauliques de son environnement. Comme développé précédemment, le développement de zones urbaines proches du

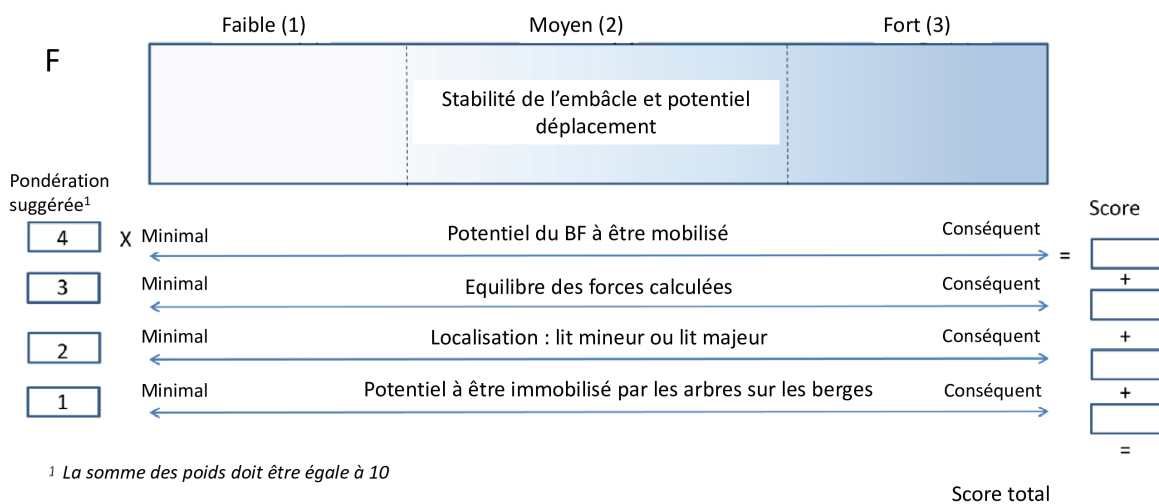


FIGURE 4.44: Volet "F" sur les critères associés à la **stabilité et à la remobilisation de l'embâcle**

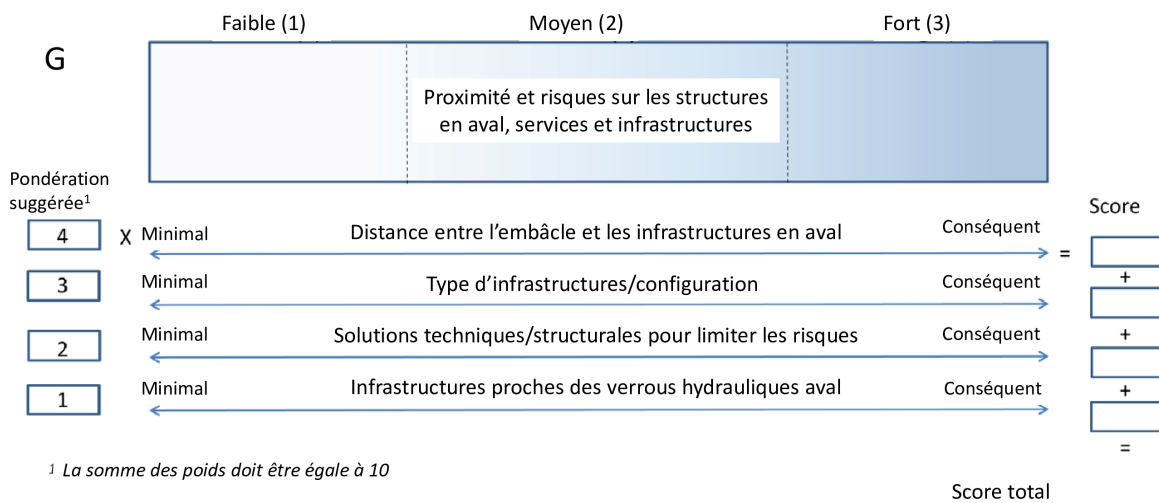


FIGURE 4.45: Volet "G" sur les critères associés aux **enjeux à protéger en aval**

lit mineur tend à augmenter les risques lors d'une inondation ou d'une crue. Le volet "E" (Figure 4.43) se concentre sur l'occupation du sol en lit majeur, plus particulièrement au voisinage d'un embâcle, sans considérer les potentiels effets en aval. Par conséquent, le volet "E" requière l'évaluation des potentielles conséquences d'une réduction de la capacité du chenal.

Effets morphologiques Comme vu précédemment, les embâcles sont largement reconnus par la communauté scientifique pour leur capacité à créer une diversité d'habitats et engendrer des modifications d'un cours d'eau qui favorisent les écosystèmes aquatiques. Toutefois, les modifications dynamiques d'un cours d'eau sont généralement inacceptables pour les rivières contraintes par des zones urbaines. Dans ce cas, il est donc important d'évaluer le potentiel d'un embâcle à engendrer des modifications du lit mineur qui entreraient en conflit avec des propriétés privées adjacentes et des objectifs de gestion du lit majeur. C'est l'objet du volet "H" (Figure 4.46).

Les potentielles conséquences de la présence d'un embâcle incluent l'accélération de l'érosion des berges en conséquence de l'augmentation des vitesses d'écoulement, de l'accumulation de bois flottant, de surcote en amont

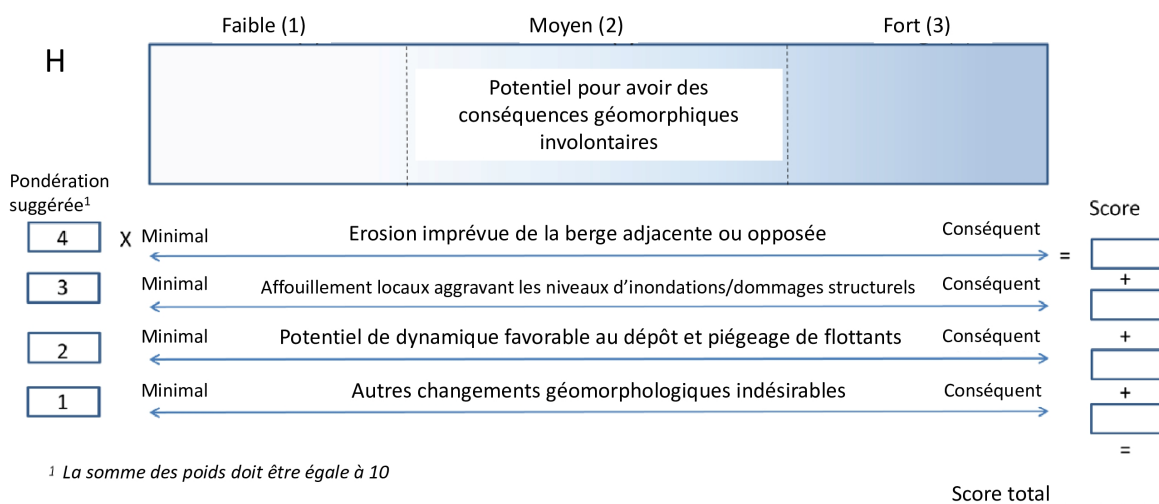


FIGURE 4.46: Volet "H" sur les critères associés aux effets géomorphologiques de l'embâcle

et de l'altération de la capacité de transport sédimentaire qui affectent les processus d'affouillement et de dépôt. De telles conséquences peuvent être difficiles à prédire, même pour des géomorphologues ou des ingénieurs spécialisés dans le domaine fluvial. Ainsi, les potentielles conséquences géomorphologiques sont mieux évaluées par une équipe d'experts interdisciplinaire, ayant de l'expérience dans la gestion des bois flottants et des embâcles. Le volet "I" agrège les résultats des volets (A) à (H), pour créer une évaluation d'ensemble du risque à garder ou retirer le bois flottant présent dans la rivière (Figure 4.47). Si un score moyen à élevé est obtenu pour les volets (A) et (B) et un score bas pour les volets (C) à (H), la meilleure solution semble être la non intervention des gestionnaires, avec un simple contrôle, une stabilisation de l'embâcle, ou la mise en place de panneaux de signalisation. Au contraire, un score bas pour les volets (A) et (B), accompagné d'un score moyen à élevé pour les autres volets, suggère plutôt de retirer le bois flottant, de fermer un segment de rivière aux activités, ou de déplacer l'embâcle. Le score agrégé peut être utilisé pour comparer les risques d'un embâcle selon les écosystèmes, les activités humaines sur le cours d'eau, les infrastructures publiques, et la sécurité. Les scores peuvent également être utilisés pour comparer les risques liés à un embâcle selon sa localisation dans le cours d'eau par exemple, dans le but, en premier lieu, d'aider à la priorisation des différents secteurs à traiter. En effet, dans l'absolu, la note agrégée d'un site donné n'a probablement pas grande signification et dépendra notamment des pondérations appliquées par l'utilisateur. L'application de la méthode à plusieurs secteurs différents suivant les mêmes pondérations et indicateurs utilisés pour renseigner les critères peut par contre permettre de *comparer* ces derniers même si le bois flottant présent dans les différents secteurs peut avoir des effets sur différents usages du cours d'eau (enjeux en lit majeur, infrastructures et réseaux, loisirs).

Remarques

Le présent guide fournit une simple traduction du protocole tel que proposé par WOHL et al. (2019). Ces outils d'aides à la décision présentent l'intérêt de rappeler l'ensemble des critères qui devraient guider la gestion des bois flottants et des embâcles. Ils permettent de se questionner et de quantifier les effets du bois mort dans le corridor fluvial sur les milieux aquatiques et terrestres, l'hydromorphologie et les risques pour les usagers et infrastructures. Cependant, une lecture attentive des critères montre que plusieurs d'entre eux sont difficiles à estimer, même avec une étude approfondie, ce qui laisse place à beaucoup de subjectivité. De plus, peu d'informations sont données par les auteurs originaux quant au choix de la note à appliquer pour chaque critère. Par exemple, les lignes 3 et 4 de la Figure 4.43 nous demandent de noter les effets du bois mort sur la rugosité et sur l'augmentation du niveau d'eau : sans outils de modélisation et une étude poussée, il semble difficile de remplir cette évaluation. Le praticien choisira alors une note entre 1 et 3, qui se basera sur son expérience sur le sujet.

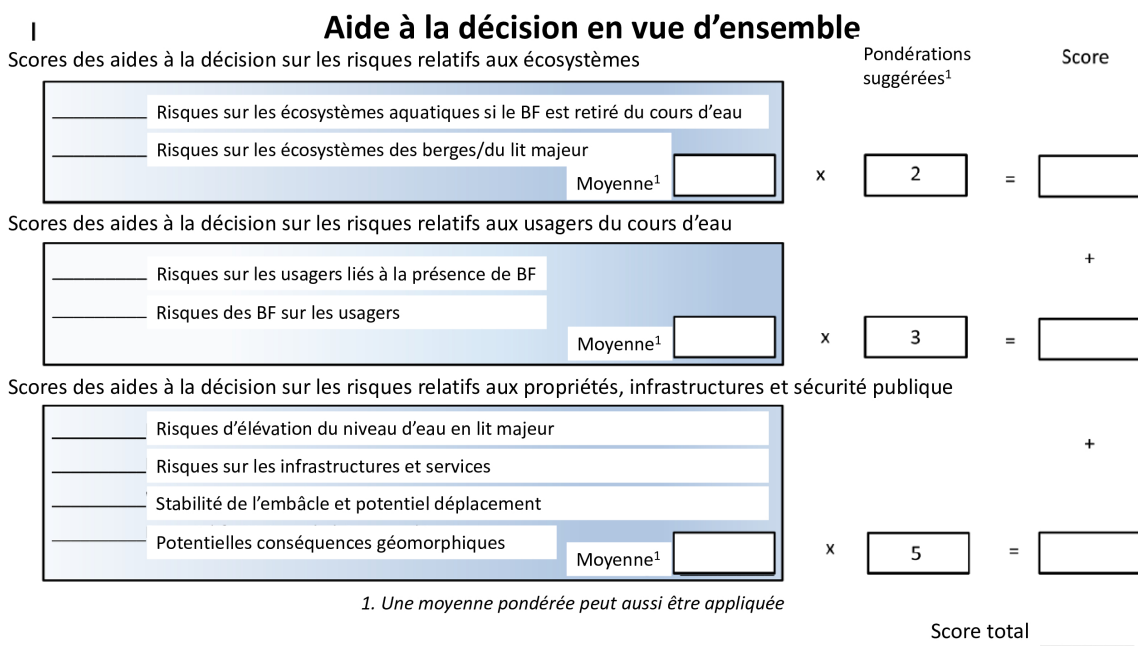


FIGURE 4.47: Aides à la décision pour évaluer les risques potentiels d'un embâcle sur différents composants de l'écosystème d'un cours d'eau, en fonction de si le bois flottant est retiré ou laissé dans la rivière. Ces aides sont présentées dans le guide WOHL et al. (2019) et sont traduites par ISL Ingénierie. Pour aider à la décision, les pondérations suggérées à droite sur chaque ligne doivent être multipliées par un des nombres en haut (1,2 ou 3 selon l'importance du risque) pour obtenir un score pour chaque ligne. Ces scores sont ensuite sommés pour créer le score total de chaque aide à la décision. D'autres pondérations sont également possibles, elles sont adaptables à la situation étudiée ou aux objectifs spécifiques.

Il faut donc garder en tête que ces outils permettent avant tout d'apporter de la transparence et de "lisser" la subjectivité à travers une multitude de critères et une pondération finale. Ils rendent également possible la remise en question et la discussion de chaque ligne par les différents praticiens, permettant d'arriver à une note finale relative, qui sera à comparer avec d'autres tronçons ou embâcles.

Ce protocole d'aide à la décision, intéressant en théorie, est testé courant 2022 par l'INRAE de Grenoble grâce à des financements de l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse. Un rapport comportant des exemples d'application et des recommandations dans l'évaluation des critères sera diffusé à la suite de ce travail.

Remarques conclusives

Le chapitre 1 fait d'abord la synthèse des méthodes d'estimation de la fourniture en flottants. En complément de formules empiriques simples, la mobilisation des données de l'Inventaire Forestier Français (IFN) a permis de fournir des ordres de grandeurs des densités de peuplement forestier dans les ripisylves du territoire métropolitain. Leur croisement avec les analyses géomorphologiques des zones de divagation des cours d'eau permet l'estimation de la production de flottants. Les données de l'IFN ont aussi permis de fournir des équations simples reliant hauteur totale des arbres et diamètre des troncs. L'analyse de données LiDAR permet déjà de caractériser les hauteurs de la canopée et de détecter les arbres. Via ces approches simples, il est possible de caractériser la longueur et le diamètre des flottants.

Le chapitre 2 aborde les effets environnementaux de la présence du bois flottant en rivière. Cet aspect du bois flottant est celui qui a historiquement attiré le plus d'attention, en particulier par les spécialistes des ressources halieutiques. Nous ne rappelons que les principaux résultats. Ce chapitre semblait toutefois important à intégrer afin d'équilibrer le reste du rapport qui est très orienté sur la question des risques induits par les interactions entre flottants et ouvrages hydrauliques. Soulignons simplement que les spécialistes des milieux aquatiques et terrestres sont unanimes : retirer le bois mort dégrade l'environnement, maintenir sa présence, voire l'encourager, restaure de nombreux processus naturels et cercles vertueux du point de vue écologique.

On retrouve dans le chapitre 3 des éléments sur l'analyse du transport de flottants. Elle est longtemps restée l'apanage des modèles physiques. Si l'utilisation de modèles numériques hydrauliques est standard dans la majorité des études hydrauliques, l'intégration des flottants était très empirique dans les rares études qui abordaient la question. Des modèles numériques calculant le transport de flottants explicitement existent pourtant depuis environ une décennie. Leur domaine d'application était limité à des travaux de recherches jusqu'à récemment. Les premières études d'ingénierie intégrant des modélisations numériques explicites du transport de flottants émergent en France. Ces outils sont vraisemblablement voués à se démocratiser dans les années à venir. Le Chapitre 3 aborde ensuite la question des interactions entre les flottants et les ponts, puis celles avec les barrages et seuils. On y rappelle l'état des connaissances sur les mécanismes et types de formation d'embâcles. On y donne aussi des méthodes simples permettant de répondre aux deux questions principales qui intéressent les gestionnaires et concepteurs de ces structures : quelle est la probabilité de formation d'un embâcle ? Et quelle serait alors la surcote de niveau induite ?

Le Chapitre 4 compile finalement des recommandations vis à vis de la gestion du risque d'embâcle. On aborde rapidement la solution la plus efficace : le retrait ou l'adaptation des verrous hydrauliques bloquant le passage du bois flottant. La thématique des différentes mesures permettant le piégeage du bois flottant est ensuite plus longuement développée, fournissant des recommandations détaillées pour la conception des ouvrages les plus classiques. Le dernier mode de gestion concerne plutôt la gestion à l'échelle du bassin versant, notamment par l'entretien. La préparation de ce guide a été l'occasion de traduire le protocole d'aide à la décision proposé par WOHL et al. (2019) pour guider la gestion du bois flottant.

Ce guide vise à fournir un aperçu de l'état des connaissances actuelles sur la question des sources, du transport et du dépôt du bois flottant. Il tente de fournir autant d'éléments que possible de la connaissance disponible vis à vis des interactions entre bois flottant et ouvrages. Nous espérons qu'il aidera la conception d'ouvrages plus transparents et résilients, mais aussi à mener des analyses et diagnostics plus fins d'un processus naturel complexe et peu observé.

Bibliographie

- ABBE, T. B. et D. R. MONTGOMERY (mar. 2003). "Patterns and processes of wood debris accumulation in the Queets river basin, Washington". en. *Geomorphology* 51.1-3, p. 81-107. ISSN : 0169555X. DOI : 10.1016/S0169-555X(02)00326-4.
- ABBE, T. B., D. R. MONTGOMERY et C. PETROFF (1997). "Design of stable in-channel wood debris structures for bank protection and habitat restoration: an example from the Cowlitz River, WA". *Proceedings of the Conference on Management Disturbed by Channel Incision, University of Mississippi, Oxford, USA*. T. 16.
- ADDY, S. et M. E. WILKINSON (2019). "Representing natural and artificial in-channel large wood in numerical hydraulic and hydrological models". *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water* 6.6, e1389. DOI : 10.1002/wat2.1389.
- ADIS, J. et W. J. JUNK (avr. 2002). "Terrestrial invertebrates inhabiting lowland river floodplains of Central Amazonia and Central Europe: a review: Terrestrial invertebrates of floodplains". en. *Freshwater Biology* 47.4, p. 711-731. ISSN : 00465070. DOI : 10.1046/j.1365-2427.2002.00892.x.
- AE-RMC (2016). *Délimiter l'espace de bon fonctionnement des cours d'eau*. Rapp. tech. Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse. URL : <https://www.eaurmc.fr/upload/docs/application/pdf/2017-05/2016-guide-ebf-cours-d-eau-hdef.pdf>.
- AERMC (2019). *Les rivières en tresses - éléments de connaissance*. Rapp. tech. Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse, p. 118. URL : https://www.eaurmc.fr/jcms/pro_96083/fr/guide-riviere-en-tresses.
- ARGILIER, C., B. AUGEARD, J. BAUDOIN, P. BEAUDELAIN POULAIN, G. BEAUJEU, J. BELLIER, F. BENHASSEN, D. BOLZAN, S. BOULIGAND, X. BOURRAIN, G. BOURGUETOU, E. BREUGNOT, J. CHATELAIN, C. CHAUVIN, O. COULON, S. COUPRIE, C. COURTIN, P. DANIS, J. DAUPHIN, M. DE BASQUIAT, F. DELMAS, S. DEMBSKI, G. DEMORTIER, A. DERACO, C. DIANOUX, E. DUBOIS, J. GAUTIER, B. GENIN, O. GRAS, J. GRESSER, S. GRIVEL, C. HALKETT, G. HIELARD, F. HISSEL, S. JOURDAN, K. KREUTZENBERGER, C. LAPLACE-TREYTURE, M. LE LOARER, A. LEQUIEN, C. LESNIAK, A. LHOSTE, S. LUCET, P. MANGEOT, J. MATTE, G. MEDEREL, G. MELUN, O. MONNIER, A. MOULLAMA, J. MOY, L. NAVARRO, M. NICHELATTI, M. NICOLAI, A. PELLET, B. PELLET, D. PONT, C. REILHES, S. REY, Y. REYJOL, M. RHONE, N. ROSET, S. SCHAAN, E. SEIGNEUR, F. SIBIEN, S. STOFFEK, S. TELLIER, B. TERRIER, C. TIXIER, P. USSEGLIO et A. VIVIER (2016). *Guide technique relatif à l'évaluation de l'état des eaux de surface continentales (cours d'eau, canaux, plans d'eau)*. Rapp. tech. Irstea, p. 106. URL : <https://hal.inrae.fr/hal-02603509>.
- ARNAUD, P., Y. AUBERT, D. ORGANDE, P. CANTET, C. FOUCHIER et N. FOLTON (avr. 2014). "Estimation de l'aléa hydrométéorologique par une méthode par simulation : la méthode SHYREG : présentation – performances – bases de données". *La Houille Blanche* 2. Publisher: EDP Sciences, p. 20-26. DOI : 10.1051/1hb/2014012.
- ARSÉNIO, P., P. M. RODRÍGUEZ-GONZÁLEZ, I. BERNEZ, F. S. DIAS, M. N. BUGALHO et S. DUFOUR (2020). "Riparian vegetation restoration: Does social perception reflect ecological value?" *River Research and Applications* 36.6, p. 907-920. DOI : 10.1002/rra.3514.
- BALLINGER, A., R. M. NALLY et P. S. LAKE (2009). "Decay state and inundation history control assemblage structure of log-dwelling invertebrates in floodplain forests". en. *River Research and Applications*, n/a-n/a. ISSN : 15351459, 15351467. DOI : 10.1002/rra.1254. URL : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/rra.1254> (visité le 12/01/2022).
- BÉNÉT, L., G. DE CESARE et M. PFISTER (2021). "Reservoir level rise under extreme driftwood blockage at ogee crest". *Journal of Hydraulic Engineering* 147.1, p. 04020086. DOI : 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001818.
- BERGMEISTER, K., J. SUDA, J. HÜBL et F. RUDOLF-MIKLAU (2009). *Schutzbauwerke gegen Wildbachgefahren: Grundlagen, Entwurf und Bemessung, Beispiele*. Ernst & Sohn. DOI : 10.1002/9783433600283.
- BEZZOLA, G. R., H. SIGG et D. LANGE (2004). "Driftwood retention works in Switzerland [Schwemmholzrückhalt in der Schweiz]". *INTERPRAEVENT Conference Proceedings*. T. VII. (in German), p. 29-40. URL : http://www.interpraevent.at/palm-cms/upload_files/Publikationen/Tagungsbeitraege/2004_3_VII-29.pdf.
- BOCCHIOLA, D., M. C. RULLI et R. ROSSO (2006). "Transport of large woody debris in the presence of obstacles". *Geomorphology* 76.1-2, p. 166-178. DOI : 10.1016/j.geomorph.2005.08.016.

- BOULTON, A. J. et L. N. LLOYD (juin 1992). "Flooding frequency and invertebrate emergence from dry floodplain sediments of the river murray, Australia". en. *Regulated Rivers: Research & Management* 7.2, p. 137-151. ISSN : 08869375, 10991646. DOI : 10.1002/rrr.3450070203.
- BOYER, M. (1998). *Bassin Rhône Méditerranée Corse - Guide Technique n° 1 - La Gestion des Boisements de Rivières - Fascicule 1: Dynamique et Fonctions de la Ripisylve*. Rapp. tech. Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse, p. 45.
- (2008). *Plan d'Entretien des Cours d'Eau - Cahier Méthodologique*. Rapp. tech. République et Canton de Genève, p. 85.
- BRADLEY, J. B., D. L. RICHARDS et C. D. BAHNER (2005). *Debris control structures: Evaluation and countermeasures*. Rapp. tech. FHWA-IF-04-016. U.S. Dept. of Transportation, Federal Highway Administration. URL : <https://www.fhwa.dot.gov/engineering/hydraulics/pubs/04016/hec09.pdf>.
- BROOKS, A. P., T. ABBE, T. COHEN, N. MARSH, S. MIKA, A. BOULTON, T. BRODERICK, D. BORG et I. RUTHERFURD (2006). *Design guideline for the reintroduction of wood into Australian streams*. Land & Water Australia, Canberra. URL : <https://reefcatchments.com.au/files/2013/02/Design-Guideline-for-the-reintroduction-of-wood-into-Australian-streams1.pdf> (visité le 15/03/2022).
- BRUNNER, G. W. (2008). *HEC-RAS river analysis system: hydraulic reference manual*. US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources.
- BUJOCZEK, L., J. SZEWCZYK et M. BUJOCZEK (2018). "Deadwood volume in strictly protected, natural, and primeval forests in Poland". *European Journal of Forest Research* 137.4, p. 401-418. DOI : 10.1007/s10342-018-1124-1.
- BÜTLER, R., T. LACHAT, D. KRAUS et L. LARRIEU (2020). *Guide de poche des dendromicrohabitats. Description et seuils de grandeur pour leur inventaire*. français (disponible en Allemand, anglais, espagnol). Birmensdorf, Suisse : Institut fédéral de recherches WSL, p. 59. URL : <https://www.wsl.ch/fr/publications/guide-de-poche-des-dendromicrohabitats-description-et-seuils-de-grandeur-pour-leur-inventaire.html> (visité le 28/03/2022).
- CAMIRÉ, G. F., G. PITON et S. SCHWINDT (2019). "Hydrogeomorphology and steep creek hazard mitigation lexicon: French, English and German". *International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment*, p. 589-596. DOI : 10.25676/11124/173167.
- CARLADOUS, S., G. PITON, D. KUSS, G. CHARVET, R. PAULHE, M. MOREL et Y. QUEFFÉLÉAN (2021). "Chap. 13: French Experience with Open Check Dams: Inventory and Lessons Learnt Through Adaptive Management". *Check Dam Construction for Sustainable Watershed Management and Planning*. Wiley Online Library.
- CATEAU, E., L. LARRIEU, D. VALLAURI, J.-M. SAVOIE, J. TOUROULT et H. BRUSTEL (jan. 2015). "Ancienneté et maturité : deux qualités complémentaires d'un écosystème forestier". fr. *Comptes Rendus Biologies* 338.1, p. 58-73. ISSN : 16310691. DOI : 10.1016/j.crvi.2014.10.004. (Visité le 26/01/2022).
- CERATO, M. et R. COALI (1997). "Open Check Dams in the Italian Alps". *Structural engineering international* 7.2, p. 89-91. DOI : 10.2749/101686697780495157.
- CFBR (2013). *Recommandations pour le dimensionnement des évacuateurs de crues de barrages [Dam spillway design guidelines]*. Français et English. Sous la dir. de {GROUPE DE TRAVAIL DIMENSIONNEMENT DES ÉVACUATEURS DE CRUES DE BARRAGES}. Comité Français des Barrages et Réservoirs. 328 p. ISBN : 979-10-96371-00-6. URL : http://www.barrages-cfbr.eu/IMG/pdf/recommandations_cfbr_2013_evc.pdf (visité le 22/10/2019).
- CISLAGHI, A., E. RIGON, M. A. LENZI et G. B. BISCHETTI (2018). "A probabilistic multidimensional approach to quantify large wood recruitment from hillslopes in mountainous-forested catchments". *Geomorphology* 306, p. 108-127. ISSN : 0169555X. DOI : 10.1016/j.geomorph.2018.01.009.
- COMITI, F., A. LUCÍA et D. RICKENMANN (2016). "Large wood recruitment and transport during large floods: A review". *Geomorphology* 269, p. 17. ISSN : 0169555X. DOI : 10.1016/j.geomorph.2016.06.016.
- COMITI, F. (2012). "How natural are Alpine mountain rivers? Evidence from the Italian Alps". *Earth Surface Processes and Landforms* 37.7, p. 693-707. DOI : 10.1002/esp.2267.
- COMITI, F., V. D'AGOSTINO, M. MOSER, M. A. LENZI, F. BETTELLA, A. DELL'AGNESE, E. RIGON, S. GIUS et B. MAZZORANA (2012). "Preventing wood-related hazards in mountain basins: from wood load estimation to designing retention structures". *INTERPRAEVENT Conference Proceedings*, p. 651-662.
- COUVERT, B. et B. LEFEBVRE (1994). "Contribution de modèles physiques à l'étude du charriage torrentiel". *La Houille Blanche* 3.3, p. 81-90. DOI : 10.1051/1hb/1994046.
- CSB (2017). *Bois flottant aux évacuateurs de crues des barrages*. Comité Suisse des Barrages, p. 82. URL : http://www.swissdams.ch/it/publications/publications-csb/20190515_STK_Schwemmholz_Schlussbericht_FR_Final.pdf.
- D'AGOSTINO, V. (2013). "Assessment of past torrential events through historical sources". *Advances in Global Change Research*. T. 47 : *Dating Torrential Processes on Fans and Cones*. Sous la dir. de M. SCHNEUWLY-BOLLSCHWEILER, M. STOFFEL et F. RUDOLF-MIKLAU. Springer Netherlands. Chap. 8, p. 131-146. DOI : 10.1007/978-94-007-4336-6.
- D'AGOSTINO, V., M. DEGETTO et M. RIGHETTI (2000). "Experimental investigation on open check dam for coarse woody debris control". *Dynamics of water and sediments in mountain basins*. T. 20. Quaderni di Idronomia Montana. Bios, pp. 201-212. URL : http://intra.tesaf.unipd.it/people/dagostino/Pubblicazioni/P43_2000.pdf (visité le 30/12/2020).

- DE CICCIO, P. N., E. PARIS, L. SOLARI et V. RUIZ-VILLANUEVA (2020). "Bridge pier shape influence on wood accumulation: Outcomes from flume experiments and numerical modelling". *Journal of Flood Risk Management*. ISSN : 1753-318X, 1753-318X. DOI : 10.1111/jfr3.12599.
- DE CICCIO, P. N., E. PARIS, V. RUIZ-VILLANUEVA, L. SOLARI et M. STOFFEL (2018). "In-channel wood-related hazards at bridges: A review". *River Research and Applications* 34.7, p. 617-628. ISSN : 15351459. DOI : 10.1002/rra.3300.
- DELEUZE, C, F MORNEAU, J. RENAUD, Y VIVIEN, M RIVOIRE, P. SANTENOISE, F LONGUETAUD, F MOTHE, J. HERVÉ et P VALLET (2014). "Estimer le volume total d'un arbre, quelles que soient l'essence, la taille, la sylviculture, la station". *Rendez-vous Techniques ONF*, p. 22-32. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01143797>.
- DEROO, L., P. ROYET et C. POULARD (nov. 2016). "Sûreté et efficacité des barrages écrêteurs de crue". *Colloque CFBR " Sûreté des barrages et enjeux "*. Sûreté des barrages et enjeux. Colloque CFBR " Sûreté des barrages et enjeux ", Chambéry, FRA, 23- /11/2016 - 24/11/2016. Chambéry, France : CFBR, p. 203-221. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01467467>.
- DI STEFANO, C. et V. FERRO (août 2013). "Experimental Study of the Stage-Discharge Relationship for an Upstream Inclined Grid with Longitudinal Bars". en. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 139.8, p. 691-695. ISSN : 0733-9437, 1943-4774. DOI : 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000598.
- (2014). "Closure to Experimental Study of the Stage-Discharge Relationship for an Upstream Inclined Grid with Longitudinal Bars by C. Di Stefano and V. Ferro". *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 0.0, p. 07014028-1. DOI : 10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000762.
- DIEHL, T. H. (1997). *Potential drift accumulation at bridges*. FHWA-RD-97-028. U.S. Dept. of Transportation, Federal Highway Administration, p. 52. URL : <http://tn.water.usgs.gov/publications/FHWA-RD-97-028/FHWA-RD-97-028.pdf>.
- DURAND, S. (2018). *20000 ans : ou la grande histoire de la nature*. Éditions Actes Sud.
- EYSN, L., M. HOLLAUS, E. LINDBERG, F. BERGER, J.-M. MONNET, M. DALPONTE, M. KOBAL, M. PELLEGRINI, E. LINGUA, D. MONGUS et al. (2015). "A benchmark of lidar-based single tree detection methods using heterogeneous forest data from the alpine space". *Forests* 6.5, p. 1721-1747. DOI : 10.3390/f6051721.
- FESQUET, F. (1997). "Un corps quasi-militaire dans l'aménagement du territoire : le corps forestier et le reboisement des montagnes méditerranéennes en France et en Italie aux XIX et XX èmes siècles". PhD Thesis. Université Paul Valéry, Montpellier III.
- FURLAN, P. (2019). "Blocking probability of large wood and resulting head increase at ogee crest spillways". eng. Thèse N 9040. Thèse de doct. EPFL (Lausanne) et IST (Lisboa). 160 p. DOI : 10.5075/EPFL-THESIS-9040. URL : <https://infoscience.epfl.ch/record/264198>.
- GASSER, E., M. SCHWARZ, A. SIMON, P. PERONA, C. PHILLIPS, J. HÜBL et L. DORREN (2019). "A review of modeling the effects of vegetation on large wood recruitment processes in mountain catchments". *Earth-Science Reviews* 194, p. 350-373. ISSN : 00128252. DOI : 10.1016/j.earscirev.2019.04.013.
- GERTSCH, E. (2019). "Le bois flottant dans les rivières suisses - Pratiques de gestion". Séminaire "Le bois flottant dans les rivières urbaines ? Quels risques ? Quelles connaissances ? Quelles pratiques de gestion ?" (Séminaire de restitution du projet BOIFIMU). Campus LyonTech la Doua, Villeurbanne, FRA.
- GHAFFARIAN, H., D. LOPEZ, E. MIGNOT, H. PIÉGAY et N. RIVIERE (2020a). "Dynamics of floating objects at high particulate Reynolds numbers". *Physical Review Fluids* 5.5. DOI : 10.1103/PhysRevFluids.5.054307. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03025166>.
- GHAFFARIAN, H., H. PIÉGAY, D. LOPEZ, N. RIVIÈRE, B. MACVICAR, A. ANTONIO et E. MIGNOT (2020b). "Video-monitoring of wood discharge: first inter-basin comparison and recommendations to install video cameras". *Earth Surface Processes and Landforms* 45.10, p. 2219-2234. DOI : 10.1002/esp.4875.
- GIBLING, M. et N. DAVIES (2012). "Palaeozoic landscapes shaped by plant evolution". *Nature Geoscience* 5.2, p. 99-105. DOI : 10.1038/ngeo1376.
- GODTLAND, K et E TESAKER (1994). "Clogging of spillways by trash". *Proceedings of 18th ICOLD Congress, Q*, p. 543-557.
- GSCHNITZER, T., B. GEMS, B. MAZZORANA et M. AUFLEGER (2017). "Towards a robust assessment of bridge clogging processes in flood risk management". *Geomorphology* 279, p. 128-140. ISSN : 0169555X. DOI : 10.1016/j.geomorph.2016.11.002.
- GUERNE, S. (juin 2020). *Du bois mort pour une rivière vivante, comment convaincre de son utilité, comment mettre en œuvre? Exemple de valorisation du bois mort dans la renaturation des cours d'eau jurassiens*. (Réseaux Rivières TV). URL : https://www.youtube.com/watch?v=-m78D_WvJUY&list=PL3X59NnQo7KAjcliqMafcm6dIynlrt8zQ&index=12 (visité le 15/03/2022).
- GURNELL, A. (2013). "9.11 Wood in Fluvial Systems". *Treatise on Geomorphology*. Elsevier, p. 163-188. ISBN : 978-0-08-088522-3. DOI : 10.1016/B978-0-12-374739-6.00236-0. URL : <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780123747396002360>.
- GURNELL, A., H. PIÉGAY, F. SWANSON et S. GREGORY (2002). "Large wood and fluvial processes". *Freshwater Biology* 47.4, p. 601-619. DOI : 10.1046/j.1365-2427.2002.00916.x.
- GURNELL, A., J. ENGLAND et L. BURGESS-GAMBLE (2019). "Trees and wood: working with natural river processes: Trees and Wood". *Water and Environment Journal* 33.3, p. 342-352. ISSN : 17476585. DOI : 10.1111/wej.12426.

- GUTZAT, F. et C. F. DORMANN (août 2018). "Decaying trees improve nesting opportunities for cavity-nesting birds in temperate and boreal forests: A meta-analysis and implications for retention forestry". en. *Ecology and Evolution* 8.16, p. 8616-8626. ISSN : 2045-7758, 2045-7758.
- GUÉRIN, S. (juin 2020). *Webinaire Réseau Rivière TV LIVE#8 : Du bois mort pour une rivière vivante ! Application au bassin versant de l'Yzeron* (69). (Réseaux Rivières TV). URL : https://www.youtube.com/watch?v=-m78D_WvJUY&list=PL3X59NnQo7KAjcliqMAfcm6dIynlrtd index=12 (visité le 15/03/2022).
- HAEHNEL, R. B. et S. F. DALY (2004). "Maximum impact force of woody debris on floodplain structures". *Journal of Hydraulic Engineering* 130.2, p. 112-120. DOI : 10.1061/(ASCE)0733-9429(2004)130:2(112).
- HALL, M. (2005). *Earth Repair: A Transatlantic History of Environmental Restoration*. University of Virginia Press.
- HARMON, M., J. FRANKLIN, F. SWANSON, P. SOLLINS, S. GREGORY, J. LATTIN, N. ANDERSON, S. CLINE, N. AUMEN, J. SEDELL, G. LIENKAEMPER, K. CROMACK et K. CUMMINS (1986). "Ecology of Coarse Woody Debris in Temperate Ecosystems". en. *Advances in Ecological Research*. T. 15. Elsevier, p. 133-302. ISBN : 978-0-12-013915-6. DOI : 10.1016/S0065-2504(08)60121-X.
- HARTLIEB, A. (2012). "Large scale hydraulic model tests for floating debris jams at spillways." *Water infinitely deformable but still limited. Proc. of the 2nd IAHR European Congress, Topic-Damage* (C18:1-6).
- HARTLIEB, A. (2017). "Decisive Parameters for Backwater Effects Caused by Floating Debris Jams". *Open Journal of Fluid Dynamics* 07.4, p. 475-484. ISSN : 2165-3852, 2165-3860. DOI : 10.4236/ojfd.2017.74032.
- HARTLIEB, A. et P. RUTSCHMANN (2015). *Schwemmh Holz in Fließgewässern – Gefahren und Lösungsmöglichkeiten. (Zugl. Habilitation)*. 133. Lehrstuhl für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt, Technische Universität München, p. 171. URL : <https://www.bgu.tum.de/fileadmin/w00blj/wb/Publikationen/Berichtshefte/Band133.pdf>.
- HARVEY, G. L., A. J. HENSHAW, C. PARKER et C. D. SAYER (2018). "Re-introduction of structurally complex wood jams promotes channel and habitat recovery from overwidening: Implications for river conservation". *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 28.2, p. 395-407. ISSN : 10527613. DOI : 10.1002/aqc.2824.
- ICOLD (2019). *Blockage of reservoir spillways, intakes and bottom outlets by floating debris*. Bulletin 176. International Commission On Large Dams, p. 50.
- ISHIKAWA, Y. (1994). "Production and Flow Down of Floating Logs at Streams and Disasters [in Japanese]". *Water Science* 38.1, p. 51-77. DOI : 10.20820/suirikagaku.38.1_51.
- ISHIKAWA, Y. et T. MIZUYAMA (1988). "An Experimental study of permeable sediment control dams as a countermeasure against floating logs". *6th Congress Asian and Pacific Regional Division - IAHR*, p. 723-730.
- JOHNSON, P. A. et S. A. SHEEDER (avr. 2013). "Controlling Debris at Bridges". *Geophysical Monograph Series*. Sous la dir. d'A. SIMON, S. J. BENNETT et J. M. CASTRO. Washington, D. C. : American Geophysical Union, p. 385-397. DOI : 10.1029/2010GM000975.
- JUNK, W. J. (1997). "General Aspects of Floodplain Ecology with Special Reference to Amazonian Floodplains". *The Central Amazon Floodplain*. Sous la dir. de M. M. CALDWELL, G. HELDMAIER, O. L. LANGE, H. A. MOONEY, E.-D. SCHULZE, U. SOMMER et W. J. JUNK. T. 126. Series Title: Ecological Studies. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, p. 3-20. ISBN : 978-3-642-08214-6 978-3-662-03416-3. DOI : 10.1007/978-3-662-03416-3_1.
- KIM, S.-J., D.-J. JUNG, J.-G. KANG, H.-K. YEO et J.-T. KIM (2016). "A study on the comparison and analysis of debris reduction system on small bridge". *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society* 17.3, p. 31-41. DOI : 10.5762/KAIS.2016.17.3.31.
- KIMURA, I. et K. KITAZONO (2019). "Effects of the driftwood Richardson number and applicability of a 3D-2D model to heavy wood jamming around obstacles". *Environmental Fluid Mechanics*, p. 1-23. DOI : 10.1007/s10652-019-09709-6.
- KOULINSKI, V. et P. RICHARD (2008). "Apports des modèles réduits pour la gestion des sédiments et des flottants en torrents et rivières torrentielles". *La Houille Blanche* 4, p. 90-97. ISSN : 0018-6368, 1958-5551. DOI : 10.1051/1hb:2008044.
- LAGASSE, P., P. CLOPPER, L. ZEVENBERGEN, W. SPITZ et L. GIRARD (2010). *Effects of Debris on Bridge Pier Scour*. Pages: 22955. Washington, D.C. : Transportation Research Board. ISBN : 978-0-309-11834-7. DOI : 10.17226/22955. URL : <https://www.nap.edu/catalog/22955>.
- LANGE, D. et G. BEZZOLA (2006). *Schwemmh Holz - Probleme und Lösungsansätze [Driftwood - Problems and solutions]*. Rapp. tech. 188. 125p. ISSN 0374-0056. Versuchsanstalt für Wasserbau Hydrologie und Glaziologie der Eidgenössischen Technischen Hochschule (VAW) Zürich. URL : <https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/baug/vaw/vaw-dam/documents/das-institut/mitteilungen/2000-2009/188.pdf>.
- LASSUS, C., J. VERMEULEN, C. IDELON et G. GUYOT (2019). "Influence of log jam visor on flow rate at a standard spillway". *Proc., 38th IAHR World Congress*, p. 536-546.
- LAUBER, G., J. SPEERLI, W. BERTSCHI et A. HEMMI (2016). "Integrated bed-load and driftwood retention in Kien - Findings from model-based testing and the 2011 flood [Geschiebe- und Schwemmh Holzrückhalt Kien-Erkenntnisse aus den Modellversuchen und dem Hochwasser 2011]". *INTERPRAEVENT Conference proceedings*. T. 1. Klagenfurt (Austria) : International Research Society INTERPRAEVENT, p. 708-717. URL : http://www.interpraevent.at/palm-cms/upload_files/Publikationen/Tagungsbeitraege/2016_1_708.pdf (visité le 25/02/2022).

- LAY, Y.-F. L. et A. RIVIÈRE-HONEGGER (2009). "Expliquer l'inondation: la presse quotidienne régionale dans les Alpes et leur piedmont (1882-2005)". *Géocarrefour* 2009.4, p. 259-270. DOI : 10.4000/geocarrefour.7555.
- LE LAY, Y. F. et B. MOULIN (2007). "Les barrages face à la problématique des bois flottants : collecte, traitement et valorisation". *La Houille Blanche* 3, p. 96-103. DOI : 10.1051/1hb:2007041.
- LE LAY, Y.-F., H. PIÉGAY et B. MOULIN (2013). "12.3 Wood Entrance, Deposition, Transfer and Effects on Fluvial Forms and Processes: Problem Statements and Challenging Issues". *Treatise on Geomorphology*. Elsevier, p. 20-36. ISBN : 978-0-08-088522-3. DOI : 10.1016/B978-0-12-374739-6.00320-1.
- LE LAY, Y.-F., H. PIÉGAY, K. GREGORY, A. CHIN, S. DOLÉDEC, A. ELOSEGI, M. MUTZ, B. WYŻGA et J. ZAWIEJSKA (2008). "Variations in cross-cultural perception of riverscapes in relation to in-channel wood". *Transactions of the Institute of British Geographers* 33.2, p. 268-287. DOI : 10.1111/j.1475-5661.2008.00297.x.
- LEFORT, P. et A. LAFFONT (2008). "Sur quelques mécanismes de la morpho-dynamique fluviale". *La Houille Blanche* 4, p. 72-82. DOI : 10.1051/1hb:2008042.
- LENCASTRE, A. (1983). *Hydraulique générale*. Edition revue et augmentée, 5ème tirage de 2008. Eyrolles, p. 633.
- LIEBAULT, F., A. REMAÎTRE et C. PETEUIL (2013). "Géomorphologie des rivières de montagne". *Torrents et rivières de montagne - Dynamique et aménagement*. Sous la dir. d'A. RECKING, D. RICHARD et G. DEGOUTTE. (In French). QUAE. Chap. 1, p. 15-89.
- LIVERS, B., K. B. LININGER, N. KRAMER et A. SENDROWSKI (2020). "Porosity problems: Comparing and reviewing methods for estimating porosity and volume of wood jams in the field". *Earth Surface Processes and Landforms* 45.13, p. 3336-3353. DOI : 10.1002/esp.4969.
- LOVETT, S. et P. PRICE (2007). *Principles for riparian lands management*. Land & Water Australia. URL : <http://lwa.gov.au/products/px061170>.
- MARSH, G. P. (1864). *Man and Nature; or, Physical geography as modified by human action*. Charles Scribner.
- MASER C. and Trap, J. M. (1984). *the seen and unseen world of the fallen tree*. Anglais. USA.
- MASON ET AL. (1990). *Effects of channel modifications on the hydrology of Chicod Creek basin, North Carolina*. T. 90. 4031. Department of the Interior, US Geological Survey. 83 p.
- MAZZORANA, B., F. COMITI, C. VOLCAN et C. SCHERER (mar. 2011a). "Determining flood hazard patterns through a combined stochastic-deterministic approach". *Natural Hazards* 59.1. Publisher: Springer Nature, p. 301-316. DOI : 10.1007/s11069-011-9755-2.
- MAZZORANA, B. et S. FUCHS (2010). "Fuzzy Formative Scenario Analysis for woody material transport related risks in mountain torrents". *Environmental Modelling & Software* 25.10, p. 1208-1224. DOI : 10.1016/j.envsoft.2010.03.030.
- MAZZORANA, B., J. HÜBL, A. ZISCHG et A. LARGIADER (2011b). "Modelling woody material transport and deposition in alpine rivers". *Natural Hazards* 56.2, p. 425-449. DOI : 10.1007/s11069-009-9492-y.
- MAZZORANA, B., A. ZISCHG, A. LARGIADER et J. HÜBL (2009). "Hazard index maps for woody material recruitment and transport in alpine catchments". *Natural Hazards and Earth System Sciences* 9.1, p. 197-209. ISSN : 1684-9981. DOI : 10.5194/nhess-9-197-2009.
- MIZUYAMA, T., S. ABE et K. IDO (1988). "Sediment control by Sabo Dams with Slits and/or Large Drainage Conduits". *6th Congress Asian and Pacific Regional Division - IAHR*.
- MOLLES, M. C., C. S. CRAWFORD, L. M. ELLIS, H. M. VALETT et C. N. DAHM (sept. 1998). "Managed Flooding for Riparian Ecosystem Restoration". *BioScience* 48.9, p. 749-756. ISSN : 00063568, 15253244. DOI : 10.2307/1313337.
- MONNET, J.-M. (2020). *lidaRtRee: Forest Analysis with Airborne Laser Scanning (Lidar) Data*. R package version 2.0.1. URL : <https://gitlab.irstea.fr/jean-matthieu.monnet/lidaRtRee>.
- MOREL, M., G. PITON, G. EVIN et C. LE BOUTEILLER (jan. 2022). *Projet HYDRODEMO : Évaluation de l'aléa torrentiel dans les petits bassins versants des Alpes du Nord - Action 3 : Caractériser la production sédimentaire*. Research Report. INRAE. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03549827> (visité le 17/02/2022).
- O'CONNOR, N. A. (fév. 1991). "The effects of habitat complexity on the macroinvertebrates colonising wood substrates in a lowland stream". en. *Oecologia* 85.4, p. 504-512. ISSN : 0029-8549, 1432-1939. DOI : 10.1007/BF00323762.
- OFEN (2019). *Effet des bois flottants bloquant un évacuateur de crue sous des conditions extrêmes*. Rapp. tech. Office fédéral de l'énergie OFEN, p. 86.
- OFEV (2019). *Bois flottant dans les cours d'eau*. Rapp. tech. Connaissance de l'environnement num 1910. Office fédéral de l'environnement, Berne, p. 100. 100 p. URL : [https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/fr/dokumente/naturgefahren/uw-umwelt-wissen/schwemmholz-fliessgewaessern.pdf.download.pdf/fr_BAFU_UW-1910_Schwemmholz_2_GzD_12-12\%20\(002\).pdf](https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/fr/dokumente/naturgefahren/uw-umwelt-wissen/schwemmholz-fliessgewaessern.pdf.download.pdf/fr_BAFU_UW-1910_Schwemmholz_2_GzD_12-12\%20(002).pdf).
- OKAMOTO, T., H. TAKEBAYASHI, M. SANJOU, R. SUZUKI et K. TODA (sept. 2019). "Log jam formation at bridges and the effect on floodplain flow: A flume experiment". *Journal of Flood Risk Management* 13.S1. Publisher: Wiley, e12562. DOI : 10.1111/jfr3.12562.

- ONF-RTM, ONF-DRN et INRAE-ETNA (fév. 2022a). *Retour d'expérience technique de la crue du 2 octobre 2020 dans la vallée de la Roya - Volet torrentiel*. Rapp. tech. V1. Nice (France) : Direction Départementale des Territoires et de la Mer des Alpes-Maritimes (DDTM06), 275+922 annexes.
- (fév. 2022b). *Retour d'expérience technique de la crue du 2 octobre 2020 dans la vallée de la Vésubie - Volet torrentiel*. Rapp. tech. V1. Nice (France) : Direction Départementale des Territoires et de la Mer des Alpes-Maritimes (DDTM06), 299+1540 annexes.
- PAGLIARA, S. et I. CARNACINA (2010). "Temporal scour evolution at bridge piers: effect of wood debris roughness and porosity". *Journal of Hydraulic Research* 48.1, p. 3-13. ISSN : 0022-1686, 1814-2079. DOI : 10.1080/00221680903568592.
- (2011a). "Influence of large woody debris on sediment scour at bridge piers". *International Journal of Sediment Research* 26.2, p. 121-136. ISSN : 10016279. DOI : 10.1016/S1001-6279(11)60081-4.
- (2011b). "Influence of Wood Debris Accumulation on Bridge Pier Scour". *Journal of Hydraulic Engineering* 137.2, p. 254-261. ISSN : 0733-9429, 1943-7900. DOI : 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000289.
- PANICI, D. et G. A. de ALMEIDA (2018). "Formation, growth, and failure of debris jams at bridge piers". *Water Resources Research* 54.9, p. 6226-6241. DOI : 10.1029/2017WR022177.
- (2020). "Influence of Pier Geometry and Debris Characteristics on Wood Debris Accumulations at Bridge Piers". *Journal of Hydraulic Engineering* 146.6, p. 04020041. DOI : 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001757.
- PERSI, E., G. PETACCIA et S. SIBILLA (2018a). "Large wood transport modelling by a coupled Eulerian-Lagrangian approach". *Natural Hazards* 91.1, p. 59-74. DOI : 10.1007/s11069-017-2891-6.
- PERSI, E., G. PETACCIA, S. SIBILLA, P. BRUFAU et P. GARCÍA-NAVARRO (2019a). "Calibration of a dynamic Eulerian-lagrangian model for the computation of wood cylinders transport in shallow water flow". *Journal of Hydroinformatics* 21.1, p. 164-179. DOI : 10.2166/hydro.2018.085.
- PERSI, E., G. PETACCIA, S. SIBILLA, P. BRUFAU et J. I. GARCÍA-PALACIN (2020). "Experimental dataset and numerical simulation of floating bodies transport in open-channel flow". *Journal of Hydroinformatics* 22.5, p. 1161-1181. DOI : 10.2166/hydro.2020.029.
- PERSI, E., G. PETACCIA, S. SIBILLA, J. I. GARCÍA-PALACIN, P. BRUFAU et P. GARCÍA-NAVARRO (2018b). "Calibration of a numerical model for the transport of floating wooden debris". *E3S Web of Conferences* 40. Sous la dir. d'A. PAQUIER et N. RIVIÈRE, p. 02012. ISSN : 2267-1242. DOI : 10.1051/e3sconf/20184002012. URL : <https://www.e3s-conferences.org/10.1051/e3sconf/20184002012>.
- PERSI, E., G. PETACCIA, S. SIBILLA, A. LUCÍA, A. ANDREOLI et F. COMITI (2019b). "Numerical modelling of uncongested wood transport in the Rienz river". *Environmental Fluid Mechanics*, p. 1-20.
- PETEUIL, C. et F. LIÉBAULT (2011). "ECSTReM, une méthode pratique pour prédire la production sédimentaire annuelle et événementielle des torrents à partir d'observations originales spécifiques aux Alpes françaises." French. *Actes du Colloque Eaux en Montagne de la Société Hydrotechnique de France*. Lyon, France, p. 6. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00615485/document>.
- PFISTER, M., L. BÉNET et G. DE CESARE (2020). "Effet des bois flottants obstruant un évacuateur de crue dans des conditions extrêmes". *Wasser, Energie, Luft-Eau, Energie, Air* 112, p. 77-83.
- PFISTER, M., D. CAPOBIANCO, B. TULLIS et A. J. SCHLEISS (2013a). "Debris-Blocking Sensitivity of Piano Key Weirs under Reservoir-Type Approach Flow". *Journal of Hydraulic Engineering* 139.11, p. 1134-1141. DOI : 10.1061/(asce)hy.1943-7900.0000780.
- PFISTER, M., A. J. SCHLEISS et B. TULLIS (2013b). "Effect of driftwood on hydraulic head of Piano Key weirs". *Labyrinth and Piano Key weirs II*. CRC Press/Balkema Leiden, Netherlands, p. 255-264.
- PICCO, L., M. LENZI, W. BERTOLDI, F. COMITI, E. RIGON, A. TONON, A. GARCIA-RAMA, D. RAVAZZOLO et R. RAINATO (2015). "Wood in world rivers : Proceedings of the Third International Conference Wood in World Rivers 2015 - Extended Abstracts", p. 264.
- PIÉGAY, H et L. MARIDET (1994). "Formations végétales arborées riveraines des cours d'eau et potentialités piscicoles". *Bulletin Français de Pêche et Pisciculture* 333, p. 125-147.
- PILOTTO, F., A. BERTONCIN, G. L. HARVEY, G. WHARTON et M. T. PUSCH (2014). "Diversification of stream invertebrate communities by large wood". *Freshwater Biology* 59.12, p. 2571-2583. ISSN : 00465070. DOI : 10.1111/fwb.12454.
- PITON, G., S. CARLADOUS, O. MARCO, D. RICHARD, F. LIEBAULT, A. RECKING, Y. QUEFFÉLÉAN et J. TACNET (2019a). "Usage des ouvrages de correction torrentielle et plages de dépôt : origine, état des lieux, perspectives". *La Houille Blanche* 1, p. 57-67. DOI : 10.1051/1hb/2019008.
- PITON, G., S. CARLADOUS, A. RECKING, J. TACNET, F. LIEBAULT, D. KUSS, Y. QUEFFÉLÉAN et O. MARCO (2019b). "Fonctions Des Barrages De Correction Torrentielle". *Cybergeo : European Journal of Geography*. Environnement, Nature, Paysage 896. URL : <http://journals.openedition.org/cybergeo/32190>.
- PITON, G., S. DUPIRE, P. ARNAUD, A. MAS, R. MARCHAL, D. MONCOULON, C. T. et J. TACNET (2018). *DELIVERABLE 6.2 From hazards to risk: models for the DEMOs - Part 3: France: Brague catchment DEMO*. Rapp. tech. pp. 215-344. NAIAD H2020 project (Grant Agreement n° 730497). URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03026632v1>.

- PITON, G., S. MEJEAN, H. BELLOT, J. LE GUERN, C. CARBONARI et A. RECKING (2016). "Bed-load trapping in open check dam basins measurements of flow velocities and depositions patterns". *INTERPRAEVENT Conference proceedings*. Sous la dir. de G. KOBOLTSCHNIG. Klagenfurt (Austria) : International Research Society INTERPRAEVENT, p. 808-817. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01390582>.
- PITON, G., A. R. CERON MAYO et S. LAMBERT (2022). "Small Scale Modelling of Flexible Barriers. II: Interaction with Large Wood". *Journal of Hydraulic Engineering*.
- PITON, G., T. HORIGUCHI, L. MARCHAL et S. LAMBERT (2020). "Open check dams and large wood: head losses and release conditions". *Natural Hazards and Earth System Sciences* 20.12, p. 3293-3314. DOI : 10.5194/nhess-20-3293-2020.
- PITON, G., L. MARCHAL et S. LAMBERT (2019c). "Étude des interactions barrages filtrants / transport de flottants et risque de relargage - étude expérimentale des ouvrages rigides", p. 64. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02515247/>.
- PITON, G. et A. RECKING (2015). "Design of Sediment Traps with Open Check Dams. I: Hydraulic and Deposition Processes". *Journal of Hydraulic Engineering* 142.2, p. 04015045. ISSN : 0733-9429, 1943-7900. DOI : 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001048.
- (2016). "Design of Sediment Traps with Open Check Dams. II: Woody Debris". *Journal of Hydraulic Engineering* 142.2, p. 04015046. ISSN : 0733-9429, 1943-7900. DOI : 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001049.
- PITON, G. et J.-M. TACNET (2020). *Risque d'inondation dans le bassin de la Brague (Alpes-Maritimes): ré-analyse de l'évènement d'Octobre 2015 à l'aide de la méthode du FEV*. Note de synthèse. URL : <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02866215>.
- POLIT, J. I. et S. BROWN (déc. 1996). "Mass and nutrient content of dead wood in a central Illinois floodplain forest". en. *Wetlands* 16.4, p. 488-494. ISSN : 0277-5212, 1943-6246. DOI : 10.1007/BF03161338.
- PULETTI, N., R. CANULLO, W. MATTIOLI, R. GAWRYS, P. CORONA et J. CZEREPKO (2019). "A dataset of forest volume deadwood estimates for Europe". *Annals of Forest Science* 76.3, p. 68.
- RICKENMANN, D. (1997). "Schwemmholz und hochwasser". *Wasser Energie Luft* 89.5/6, p. 115-119.
- RICKLI, C., A. BADOUX, D. RICKENMANN, N. STEEB et P. WALDNER (2018). "Large wood potential, piece characteristics, and flood effects in Swiss mountain streams". *Physical Geography*, p. 1-23. ISSN : 0272-3646, 1930-0557. DOI : 10.1080/02723646.2018.1456310. URL : <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02723646.2018.1456310>.
- RIMBÖCK, A (2004). "Design of rope net barriers for woody debris entrapment. Introduction of a design concept". *International Symposium Interpraevent*, p. 265-276.
- RIMBÖCK, A et T. STROBL (2001). "Schwemmholzpotenzial und Schwemmholzrückhalt am Beispiel Partnach / Ferchenbach (Oberbayern) [Woody debris Potential and woody debris entrapment exemplified by Partnach / Ferchenbach (upper Bavaria)]". *Wildbach und Lawinenverbau* 145, p. 15-27.
- ROYET, P., G. DEGOUTTE, L. PEYRAS, J. LAVABRE et F. LEMPERRIÈRE (2010). "Cotes et crues de protection, de sûreté et de danger de rupture". *La Houille Blanche* 2, p. 51-57. DOI : 10.1051/1hb/2010018.
- RUDOLF-MIKLAU, F. et J. HÜBL (2010). "Managing risks related to drift wood (woody debris)". *INTERPRAEVENT Conference Proceedings*, p. 868 -878. URL : http://www.interpraevent.at/palm-cms/upload_files/Publikationen/Tagungsbeitraege/2010_868.pdf.
- RUIZ-VILLANUEVA, V. (2020). "Keynote Lecture - When a Tree Falls in a River... a Cascade Process Begins". [Online] 10th International Conference on Fluvial Hydraulics (River Flow 2020). Campus LyonTech la Doua, Villeurbanne, FRA. URL : <https://www.iahr.org/index/video/92?s=09>.
- RUIZ-VILLANUEVA, V., J. M. BODOQUE, A. DÍEZ-HERRERO et E. BLADÉ (2014a). "Large wood transport as significant influence on flood risk in a mountain village". *Natural Hazards* 74.2, p. 967-987. ISSN : 0921-030X, 1573-0840. DOI : 10.1007/s11069-014-1222-4.
- RUIZ-VILLANUEVA, V., A. DÍEZ-HERRERO, J. BALLESTEROS et J. BODOQUE (2014b). "Potential large woody debris recruitment due to landslides, bank erosion and floods in mountain basins: a quantitative estimation approach". *River Research and Applications* 30.1, p. 81-97. DOI : 10.1002/rra.2614.
- RUIZ-VILLANUEVA, V., H. PIÉGAY, V. GAERTNER, F. PERRET et M. STOFFEL (mai 2016a). "Wood density and moisture sorption and its influence on large wood mobility in rivers". en. *CATENA* 140, p. 182-194. DOI : 10.1016/j.catena.2016.02.001.
- RUIZ-VILLANUEVA, V., V. SCORPIO, A. BACHMANN, G. BROUSSE, M. CAVALLI, F. COMITL, S. CREMA, E. FERNÁNDEZ, G. FURDADA, H. HAJDUKIEWICZ, L. HUNZINGER, A. LUCÍA, L. MARCHI, A. MORARU, H. PIÉGAY, G. PITON, D. RICKENMANN, M. RIGHINI, N. SURIAN, R. YASSINE et B. WYŻGA (2022). "Channel widening in mountain and foothills areas during floods: insights from a European meta-analysis". *in preparation*.
- RUIZ-VILLANUEVA, V., E. BLADÉ, M. SÁNCHEZ-JUNY, B. MARTI-CARDONA, A. DÍEZ-HERRERO et J. M. BODOQUE (2014c). "Two-dimensional numerical modeling of wood transport". *Journal of Hydroinformatics* 16.5, p. 1077-1096. ISSN : 1464-7141, 1465-1734. DOI : 10.2166/hydro.2014.026.
- RUIZ-VILLANUEVA, V., E. B. CASTELLET, A. DÍEZ-HERRERO, J. M. BODOQUE et M. SÁNCHEZ-JUNY (2013). "Two-dimensional modelling of large wood transport during flash floods". *Earth Surface Processes and Landforms* 39.4, p. 438-449. DOI : 10.1002/esp.3456.

- RUIZ-VILLANUEVA, V., A. DíEZ-HERRERO, J. A. GARCÍA, A. OLLERO, H. PIÉGAY et M. STOFFEL (2018). "Does the public's negative perception towards wood in rivers relate to recent impact of flooding experiencing?" *Science of the Total Environment* 635, p. 294-307.
- RUIZ-VILLANUEVA, V., C GAMBERINI, E BLADÉ, M. STOFFEL et W BERTOLDI (2020). "Numerical Modeling of Instream Wood Transport, Deposition, and Accumulation in Braided Morphologies Under Unsteady Conditions: Sensitivity and High-Resolution Quantitative Model Validation". *Water Resources Research* 56.7, e2019WR026221. DOI : 10.1029/2019WR026221.
- RUIZ-VILLANUEVA, V., B. MAZZORANA, E. BLADÉ, L. BÜRKL, P. IRIBARREN-ANACONA, L. MAO, F. NAKAMURA, D. RAVAZZOLO, D. RICKENMANN, M. SANZ-RAMOS, M. STOFFEL et E. WOHL (2019). "Characterization of wood-laden flows in rivers". *Earth Surface Processes and Landforms* 44.9, p. 16. ISSN : 01979337. DOI : 10.1002/esp.4603.
- RUIZ-VILLANUEVA, V., H. PIÉGAY, A. M. GURNELL, R. A. MARSTON et M. STOFFEL (2016b). "Recent advances quantifying the large wood dynamics in river basins: New methods and remaining challenges". *Reviews of Geophysics* 54.3, p. 611-652. DOI : 10.1002/2015RG000514.
- RUIZ-VILLANUEVA, V., B. WYŻGA, P. MIKUŚ, H. HAJDUKIEWICZ et M. STOFFEL (2016c). "The role of flood hydrograph in the remobilization of large wood in a wide mountain river". *Journal of Hydrology* 541, p. 330-343. DOI : 10.1016/j.jhydrol.2016.02.060.
- RUIZ-VILLANUEVA, V., B. WYŻGA, J. ZAWIEJSKA, M. HAJDUKIEWICZ et M. STOFFEL (2016d). "Factors controlling large-wood transport in a mountain river". *Geomorphology* 272, p. 21-31. DOI : 10.1016/j.geomorph.2015.04.004.
- RUIZ-VILLANUEVA, V., B. WYŻGA, H. HAJDUKIEWICZ et M. STOFFEL (2016e). "Exploring large wood retention and deposition in contrasting river morphologies linking numerical modelling and field observations". *Earth Surface Processes and Landforms* 41.4, p. 446-459. ISSN : 01979337. DOI : 10.1002/esp.3832.
- RUIZ-VILLANUEVA, V., B. WYŻGA, P. MIKUŚ, M. HAJDUKIEWICZ et M. STOFFEL (2017). "Large wood clogging during floods in a gravel-bed river: the Długopole bridge in the Czarny Dunajec River, Poland: Large wood clogging during floods". *Earth Surface Processes and Landforms* 42.3, p. 516-530. ISSN : 01979337. DOI : 10.1002/esp.4091.
- SABO DIVISION (2000). *Guideline for Driftwood Countermeasures*. Ministry of Construction. Japan, p. 42. URL : <http://www.sabo-int.org/guideline/pdf/driftwoodCountermeasureGuideline.pdf>.
- SCHALKO, I., C. LAGEDER, L. SCHMOCKER, V. WEITBRECHT et R. M. BOES (2019a). "Laboratory Flume Experiments on the Formation of Spanwise Large Wood Accumulations: Part II-Effect on local scour". *Water Resources Research* 55.6, p. 4871-4885. ISSN : 00431397. DOI : 10.1029/2019WR024789. URL : <http://doi.wiley.com/10.1029/2019WR024789>.
- SCHALKO, I., C. LAGEDER, L. SCHMOCKER, V. WEITBRECHT et R. BOES (2019b). "Laboratory flume experiments on the formation of spanwise large wood accumulations Part I: Effect on backwater rise". *Water Resources Research*, 2018WR024649. ISSN : 0043-1397, 1944-7973. DOI : 10.1029/2018WR024649.
- SCHALKO, I., L. SCHMOCKER, V. WEITBRECHT et R. M. BOES (2019c). "Laboratory study on wood accumulation probability at bridge piers". *Journal of Hydraulic Research*, p. 1-16. ISSN : 0022-1686, 1814-2079. DOI : 10.1080/00221686.2019.1625820. URL : <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00221686.2019.1625820>.
- SCHMOCKER, L. et W. H. HAGER (2011). "Probability of Drift Blockage at Bridge Decks". *Journal of Hydraulic Engineering* 137.4, p. 470-479. ISSN : 0733-9429, 1943-7900. DOI : 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000319.
- (2013). "Scale Modeling of Wooden Debris Accumulation at a Debris Rack". *Journal of Hydraulic Engineering* 139.8, p. 827-836. ISSN : 0733-9429, 1943-7900. DOI : 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000714.
- SCHMOCKER, L. et V. WEITBRECHT (2013). "Driftwood: Risk Analysis and Engineering Measures". *Journal of Hydraulic Engineering* 139.7, p. 683-695. ISSN : 0733-9429, 1943-7900. DOI : 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000728.
- SCHOOR, M., W. LIEVELD, H van RHEEDE, A SIEBEN, P. DUIJN, A KLINK, L. DIONISIO PIRES et W BLAAUWENDRAAT (2015). "Reintroduction of large woody debris in navigable rivers: a pilot study to stimulate biodiversity within safety constraints". *Proceedings of the Third International Conference Wood in World Rivers*, p. 33-35.
- SEDALP (2015). *Work Package 6 - Interactions with structures*. Rapp. tech. WP6 Final Report. Alpine Space European project. URL : <http://www.sedalp.eu/download/reports.shtml>.
- SLAGHT, J. C., S. G. SURMACH et R. GUTIÉRREZ (oct. 2013). "Riparian old-growth forests provide critical nesting and foraging habitat for Blakiston's fish owl *Bubo blakistonii* in Russia". en. *Oryx* 47.4, p. 553-560. ISSN : 0030-6053, 1365-3008. DOI : 10.1017/S0030605312000956.
- SPREITZER, G., J. TUNNICLIFFE et H. FRIEDRICH (2020). "Porosity and volume assessments of large wood (LW) accumulations". *Geomorphology*, p. 107122.
- STEEB, N., D. RICKENMANN, A. BADOUX, C. RICKLI et P. WALDNER (2017). "Large wood recruitment processes and transported volumes in Swiss mountain streams during the extreme flood of August 2005". *Geomorphology* 279, p. 112-127. DOI : 10.1016/j.geomorph.2016.10.011.
- STOCKSTILL, R. L., S. F. DALY et M. A. HOPKINS (2009). "Modeling floating objects at river structures". *Journal of Hydraulic Engineering* 135.5, p. 403-414. DOI : 10.1061/(ASCE)0733-9429(2009)135:5(403).

- STURM, T., I. ABID, B. MELVILLE, X. XIONG, T. STOESSER, B. F. BUGALLO, K. V. CHUA, S. ABT et S. HONG (2018). *Combining individual scour components to determine total scour*. Rapp. tech. Washington, D.C. DOI : 10.17226/22955. URL : <https://www.nap.edu/catalog/25046>.
- SUTFIN, N., B. LIVERS et E. WOHL (2015). "Large wood-induced storage of sediment and organic carbon in mountainous streams of the Colorado Rocky Mountains, U.S.A." *Proceedings of the Third International Conference Wood in World Rivers*, p. 43-48.
- THEVENET, A. (1998). "Intérêt des débris ligneux grossiers pour les poissons dans les grandes rivières : pour une prise en compte de leur dimension écologique dans la gestion des cours d'eau". Thèse de doctorat dirigée par Statzner, Bernhard Sciences Lyon 1 1998. Thèse de doct., 1 vol. (111 p.) URL : <http://www.theses.fr/1998LY010168>.
- UCHIOGI, T, J SHIMA, H TAJIMA et Y ISHIKAWA (1996). "Design methodes for woody-debris entrapment". *INTERPRAEVENT Conference Proceedings*, p. 279-288.
- URABE, H. et S. NAKANO (1998). "Contribution of woody debris to trout habitat modification in small streams in secondary deciduous forest, northern Japan". *Ecological Research* 13.3, p. 335-345.
- WALLERSTEIN, N., S. ARTHUR et J. BLANC (2013). *Culvert designand operation guide supplementary technical note on Understanding blockage risks*. Rapp. tech. CIRIA-C720. Heriot-Watt University.
- WALLERSTEIN, N. et C. THORNE (2004). "Influence of large woody debris on morphological evolution of incised, sand-bed channels". *Geomorphology* 57.1-2, p. 53-73.
- WELBER, M., W. BERTOLDI et M. TUBINO (2013). "Wood dispersal in braided streams: Results from physical modeling". *Water Resources Research* 49.11, p. 7388-7400. ISSN : 00431397. DOI : 10.1002/2013WR014046.
- WOHL, E. (2017). "Bridging the gaps: An overview of wood across time and space in diverse rivers". *Geomorphology* 279, p. 3-26.
- WOHL, E., D. N. SCOTT et S. E. YOCHUM (2019). "Managing for large wood and beaver dams in stream corridors". *Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-404. Fort Collins, CO: US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 137 p. 404*. URL : <https://www.srs.fs.usda.gov/pubs/59331>.
- YASSINE, R. (2020). "Evaluation de l'efficience probable d'un projet de restauration fonctionnelle et durable d'un cours d'eau." Thèse de doct. Univ. Toulouse. URL : <http://www.theses.fr/s170742>.
- ZHANG, Z., H. GHAFARIAN, B. MACVICAR, L. VAUDOR, A. ANTONIO, K. MICHEL et H. PIÉGAY (2021). "Video monitoring of in-channel wood: from flux characterization and prediction to recommendations to equip stations". *Earth Surface Processes and Landforms*. DOI : 10.1002/esp.5068.
- ZISCHG, A. P., N. GALATIOTO, S. DEPLAZES, R. WEINGARTNER et B. MAZZORANA (2018). "Modelling spatiotemporal dynamics of large wood recruitment, transport, and deposition at the river reach scale during extreme floods". *Water* 10.9, p. 1134.
- ZOLLINGER, F. (1983). "Die Vorgänge in einem Geschiebeablagerungsplatz (ihre Morphologie und die Möglichkeiten einer Steuerung)". (In German). Thèse de doct. ETH Zürich. URL : <https://doi.org/10.3929/ethz-a-000318964>.
- ÖWAV (2021). *Holz in und an Fließgewässern – Wildholzmanagement*. German. Rapp. tech. ÖWAV-Arbeitsbehelf 63. Wien, AUT. : Österreichischen Wasser- und Abfallwirtschaftsverbandes (ÖWAV), p. 114. URL : <https://www.oewav.at/Publikationen?current=410953&mode=form> (visité le 25/02/2022).



ISL
ISL Sud Ouest
15 rue du Maréchal Harispe
64500 Saint-Jean de Luz - France
Rejoignez-nous sur :



<https://isl.fr/>



INRAE
Centre Center Lyon-Grenoble - Auvergne-Rhône-Alpes
2 rue de la Papeterie BP 76,
38 402 St-Martin-d'Hères - France

Rejoignez-nous sur :



<https://www.inrae.fr/centres/lyon-grenoble-auvergne-rhone-alpes>

