

Bois flottant dans les cours d'eau

Un projet de recherche à vocation pratique



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Office fédéral de l'environnement OFEV

Bois flottant dans les cours d'eau

Un projet de recherche à vocation pratique

Impressum

Éditeur

Office fédéral de l'environnement (OFEV)

L'OFEV est un office du Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC).

Auteurs

Nicolas Steeb (WSL) et Stéphane Losey (OFEV)

Direction de projet

Markus Stoffel (Université de Genève), Stéphane Losey et Eva Gertsch-Gautschi (OFEV)

Groupe d'accompagnement

Johannes Abegg (Flussbau AG SHA), Niki Beyer-Portner (Hydrocosmos SA), Andre Burkard (Geoformer), Paul Dandliker (indépendant), Urs Felder (canton de Lucerne), Eva Frick (tur GmbH), Aron Ghiringhelli (canton du Tessin), Nils Hahlen (canton de Berne), Gabi Hunziker (Hunziker Gefahrenmanagement), Roni Hunziker (Hunziker, Zarn & Partner), Andrea Irniger (Hunziker, Zarn & Partner), Jürg Speerli (HSR Rapperswil)

Contributions

Haute école spécialisée bernoise, Haute école des sciences agronomiques, forestières et alimentaires HAFL (Eric Gasser, Massimiliano Schwarz): points 1.4/1.6/1.7/1.8

Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage WSL (Nicolas Steeb, Dieter Rickenmann, Alexandre Badoux, Christian Rickli): points 1.1/1.2/1.5/1.7/1.8/2.2

Université de Genève, Institut des Sciences de l'environnement ISE (Virginia Ruiz-Villanueva, Markus Stoffel): points 1.3/1.7/1.8/2.1/2.3/2.4/2.5/3.4/3.5

Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie (VAW) de l'EPF Zurich (Isabella Schalko, Volker Weitbrecht, Lukas Schmocker, Robert Boes): points 2.4/3.1/3.2/3.3/3.4/3.5/3.6

Référence bibliographique

OFEV (éd.) 2019: Bois flottant dans les cours d'eau. Un projet de recherche à vocation pratique. Office fédéral de l'environnement, Berne. Connaissance de l'environnement n° 1910: 100 p.

Mise en page

Cavelti AG, Marken. Digital und gedruckt, Gossau

Photo de couverture

Crue de la Reuss avec un embâcle de bois flottant contre le barrage de Perlen (LU), août 2005

© Forces aériennes suisses, DDPS

Téléchargement au format PDF

www.bafu.admin.ch/uw-1910-f

Il n'est pas possible de commander une version imprimée.

Cette publication est également disponible en allemand.
La langue originale est l'allemand.

Accès aux données et à de plus amples informations

www.bafu.admin.ch/eaux

© OFEV 2019

Table des matières

Abstracts	5	Bibliographie	80
Avant-propos	6	Annexe 1 Symboles et Abréviations	86
Introduction	7	Annexe 2 Schéma de recherche <i>WoodFlow</i>	88
1 Potentiel et apport de bois flottant	12	Annexe 3 Tableau récapitulatif des outils et approches <i>WoodFlow</i>	89
1.1 Méthode générale et fondement des approches SIG	12	Annexe 4 Tableau récapitulatif et comparatif des différentes approches SIG exemple de cas « Chirel »	96
1.2 Approche empirique SIG	15	Annexe 5 Procès-verbal de terrain pour le relevé du bois flottant	97
1.3 Approche SIG par logique floue	17		
1.4 Approche probabiliste : <i>SlideforMAP</i> et <i>BankforMAP</i>	22		
1.5 Formules d'estimation empiriques	25		
1.6 Action de la végétation et typage des cours d'eau	30		
1.7 Exemple de cas de la Chirel (canton de Berne)	34		
1.8 Recommandations et remarques importantes	41		
2 Transport, réduction et dépôt de bois flottant	47		
2.1 Transport de bois flottant	47		
2.2 Réduction de la taille du bois flottant	52		
2.3 Dépôt de bois flottant dans le lit du cours d'eau	56		
2.4 <i>Iber-Wood</i> : modélisation numérique 2D du transport et du dépôt du bois flottant	56		
2.5 Monitoring du bois flottant : vue d'ensemble des méthodes	60		
3 Embâcle de bois flottant	67		
3.1 Probabilité d'embâcle contre les piles de pont	67		
3.2 Mesures destinées à diminuer la probabilité d'embâcle contre les piles de pont	70		
3.3 Exhaussement du niveau d'eau et affouillement local dus à un embâcle de bois flottant	71		
3.4 Modélisation numérique du processus d'embâcle	74		
3.5 Revanche partielle en raison du transport de bois flottant dans le cas des ponts	75		
3.6 Exemple d'application : embâcle de bois flottant sur la Glatt (Zurich)	77		

Abstracts

This publication summarises the most important practical findings from the “WoodFlow” research project. The main goal was to improve the understanding of the processes governing large wood (LW) dynamics in watercourses and to provide practitioners with suitable tools to help assess LW-related hazards. The results provide a basis for estimating potential LW quantities, modelling wood transport during flooding and describing the associated clogging processes. The approaches developed are illustrated by case studies at different spatial scales. The resulting recommendations for application can be used by specialists as a basis for silvicultural and river-engineering measures.

La présente publication résume les principaux résultats du projet de recherche «Wood-Flow» utiles à la pratique. Ce dernier avait pour objectif général une meilleure compréhension de la dynamique du bois flottant dans les cours d'eau ainsi que la mise à disposition d'outils adaptés à la pratique afin de faciliter l'évaluation des dangers inhérents au bois flottant. Ces résultats fournissent des bases permettant d'estimer les quantités potentielles de bois flottant, d'en modéliser le transport en cas de crue et de décrire les processus d'embâcle associés. Les approches développées sont illustrées à l'aide d'exemples de cas à différentes échelles spatiales. Les recommandations qui en découlent sont destinées à des spécialistes pour des mesures d'entretien sylvicole et d'aménagement des cours d'eau.

Die vorliegende Publikation fasst die wichtigsten praxisrelevanten Erkenntnisse aus dem Forschungsprojekt «WoodFlow» zusammen. Das übergeordnete Ziel war es, das Prozessverständnis der Schwemmholzdynamik in Fließgewässern zu vertiefen und der Praxis geeignete Hilfsmittel zur Verfügung zu stellen, die bei der Beurteilung schwemmholzrelevanter Gefahren helfen. Die Resultate liefern Grundlagen zur Abschätzung potentieller Schwemmholzmengen, zur Modellierung von Holztransport bei Hochwasser und zur Beschreibung der damit verbundenen Verklausungsprozesse. Die entwickelten Ansätze werden mittels Fallbeispielen auf unterschiedlichen räumlichen Skalen veranschaulicht. Die daraus abgeleiteten Anwendungsempfehlungen dienen Fachpersonen als Grundlage für wald- und flussbauliche Massnahmen.

La presente pubblicazione riassume le principali conoscenze, rilevanti per la pratica, del progetto di ricerca «WoodFlow». L'obiettivo primario è approfondire la comprensione della dinamica del legname galleggiante nei corsi d'acqua e mettere a disposizione della pratica strumenti ausiliari adeguati per la valutazione dei pericoli relativi a tale fenomeno. I risultati forniscono basi per stimare le quantità di legname galleggiante, modellizzare il trasposto del legname in caso di piena e descrivere i processi di ostruzione connessi. Gli approcci sviluppati sono illustrati attraverso casi pratici su scale spaziali differenti. Le raccomandazioni di utilizzo che ne derivano servono da base agli specialisti per la pianificazione di misure selvicolturali et di sistemazione idrauliche.

Keywords:

watercourse, flooding, flood hazards, large wood, large wood dynamics, clogging

Mots-clés :

Cours d'eau, crue, dangers dus aux crues, bois flottant, dynamique du bois flottant, embâcle

Stichwörter:

Fließgewässer, Hochwasser, Hochwassergefahren, Schwemmholz, Schwemmholzdynamik, Verklausung

Parole chiave:

corsi d'acqua, piene, pericolo di piene, legno alluvionale, dinamica del legno alluvionale, ostruzione

Avant-propos

Si le bois flottant comporte de nombreux avantages écologiques, il représente également un risque pour la population et les infrastructures. En effet, en cas d'intempéries, il peut causer des dommages lorsqu'il forme des embâcles dans les passages étroits d'un cours d'eau, entraînant une montée du niveau de l'eau et des débordements. L'analyse des crues de 2005 a mis en évidence que si des mesures d'entretien sylvicole pouvaient influencer l'apport de bois flottant, elles ne permettaient pas de l'empêcher totalement. Ce constat montre la nécessité de tenir compte de la problématique du bois flottant dans les soins aux forêts protectrices ainsi que dans la planification de mesures d'aménagement des cours d'eau et de mesures d'urgence. La gestion du bois flottant consiste, d'une part, à élaborer des scénarios réalistes contre lesquels il s'agit de se protéger et, d'autre part, à déterminer les possibles scénarios de surcharge dont les mesures d'urgence doivent tenir compte.

Afin d'apporter une réponse adéquate aux problèmes posés par le bois flottant, l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) a initié un programme de recherche sur ce thème. Ce programme a consisté à élaborer des bases scientifiques permettant de relever les défis que présente actuellement la gestion du bois flottant dans les cours d'eau en vue d'une application dans la pratique.

La présente publication résume les résultats des travaux de recherche. Elle s'adresse aux spécialistes des cantons, des communes et des entreprises privées s'occupant des mesures d'entretien sylvicole et de l'aménagement des cours d'eau.

Nous remercions l'ensemble des instituts de recherche ayant participé à l'élaboration de cette publication pour leur précieuse collaboration.

Paul Steffen
Sous-directeur
Office fédéral de l'environnement

Introduction

Problématique du bois flottant en cas de crue

Les arbres et les arbustes qui recouvrent les berges des cours d'eau ont un effet stabilisateur et contribuent à la diversité écologique. Les dépôts de bois flottant dans le lit des rivières et des ruisseaux créent de multiples petites structures morphologiques qui génèrent des profondeurs d'eau et des vitesses d'écoulement très variées. Ces structures offrent à la faune protection, abris et sources de nourriture. Or le bois frais et le bois mort qui se trouvent dans le chenal et sur les pentes bordant un cours d'eau peuvent être mobilisés et emportés en cas de crues par des processus de glissements et d'érosion. Des accumulations et des dépôts de bois flottant de grande ampleur peuvent former des embâcles lorsque le profil d'écoulement est trop étroit, notamment au niveau de ponts et d'autres rétrécissements du chenal. Il en résulte souvent des débordements tels que des inondations et des épanchages d'alluvions dans les zones adjacentes. Les formations buissonnantes et le bois présents dans les cours d'eau et sur leurs berges représentent ainsi à la fois une richesse écologique et un danger pour l'homme et les biens matériels.

Les analyses des crues des dernières décennies ont montré que les quantités de bois flottant mobilisées lors de crues sont très variables et couvrent un spectre allant de quelques mètres cubes à 25 000 mètres cubes par événement (p. ex. Melezza en 1978, Reuss ou lac de Thoune en 2005 ; Waldner et al., 2007). Dans un même bassin versant, de grandes quantités de bois flottant peuvent être mobilisées lors d'événements successifs, comme cela a été le cas pour le Rhône en 1987, 1993 et 2000. De plus, la provenance du bois flottant peut considérablement varier. Lors des crues de 2005, si la part de bois frais a été très variable, elle a toujours représenté plus de moitié de la quantité totale de bois flottant (Waldner et al., 2007). Ces analyses révèlent la complexité des principaux processus de mobilisation, de transport et de dépôt de bois flottant et démontrent la nécessité de recherches scientifiques à ce sujet. En effet, il est extrêmement difficile de formuler des prévisions, qui restent entachées de grandes incertitudes.

Néanmoins, la problématique du bois flottant doit être prise en considération dans le cadre de l'évaluation des dangers liés aux cours d'eau. Elle doit également être intégrée à part entière dans la planification des mesures d'aménagement des eaux et des mesures sylvicoles et dans les plans d'urgence. Il s'agit aussi d'élaborer des scénarios réalistes. Pour l'heure, il n'existe toujours pas de méthode uniforme pour estimer le potentiel de bois flottant en tenant compte des processus de mobilisation, de transport et de dépôt et pour évaluer la probabilité d'embâcle. Les recommandations «Prise en compte des dangers dus aux crues dans le cadre des activités de l'aménagement du territoire» (OFEE, OFAT, OFEFP, 1997) et les directives «Protection contre les crues des cours d'eau» (OFEG, 2001) ne contiennent que très peu d'indications relatives à la gestion du bois flottant.

Sur la base de l'analyse des événements de 2005 en particulier, l'Office fédéral de l'environnement a donc reconnu les lacunes en matière de méthodes scientifiquement fondées permettant d'estimer les dangers dus au bois flottant. Après avoir procédé à un vaste état des lieux, il a lancé le programme de recherche interdisciplinaire *WoodFlow*, qui s'est déroulé de 2015 à 2019. Quatre instituts y ont pris part : la Haute école spécialisée bernoise, le Laboratoire de recherches hydrauliques, hydrologiques et glaciologiques de l'École polytechnique fédérale de Zurich, le Dendrolab de l'Université de Genève et l'Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage.

Le programme de recherche a poursuivi deux objectifs. Il a porté, d'une part, sur l'élaboration de bases scientifiques afin de maîtriser les défis liés à la gestion du bois flottant dans les cours d'eau et, d'autre part, sur le traitement de ces bases en vue de les transposer dans la pratique. Il s'est concentré sur l'analyse des principaux processus d'apport, de mobilisation et de transport de bois flottant ainsi que sur l'identification des points faibles du chenal d'écoulement. Ses résultats doivent servir à optimiser l'entretien des forêts le long des cours d'eau et les soins aux forêts protectrices, à évaluer les dangers et à élaborer des stratégies de protection. Par son caractère interdisciplinaire à l'interface entre l'ingénierie et les sciences

forestières, ce programme de recherche entend servir de modèle pour la gestion globale de la problématique liée au bois flottant dans les projets de protection contre les dangers naturels.

La présente publication résume les résultats du programme et les transpose en outils applicables dans la pratique. Elle reflète l'état des connaissances actuelles dans le domaine du bois flottant dans les cours d'eau.

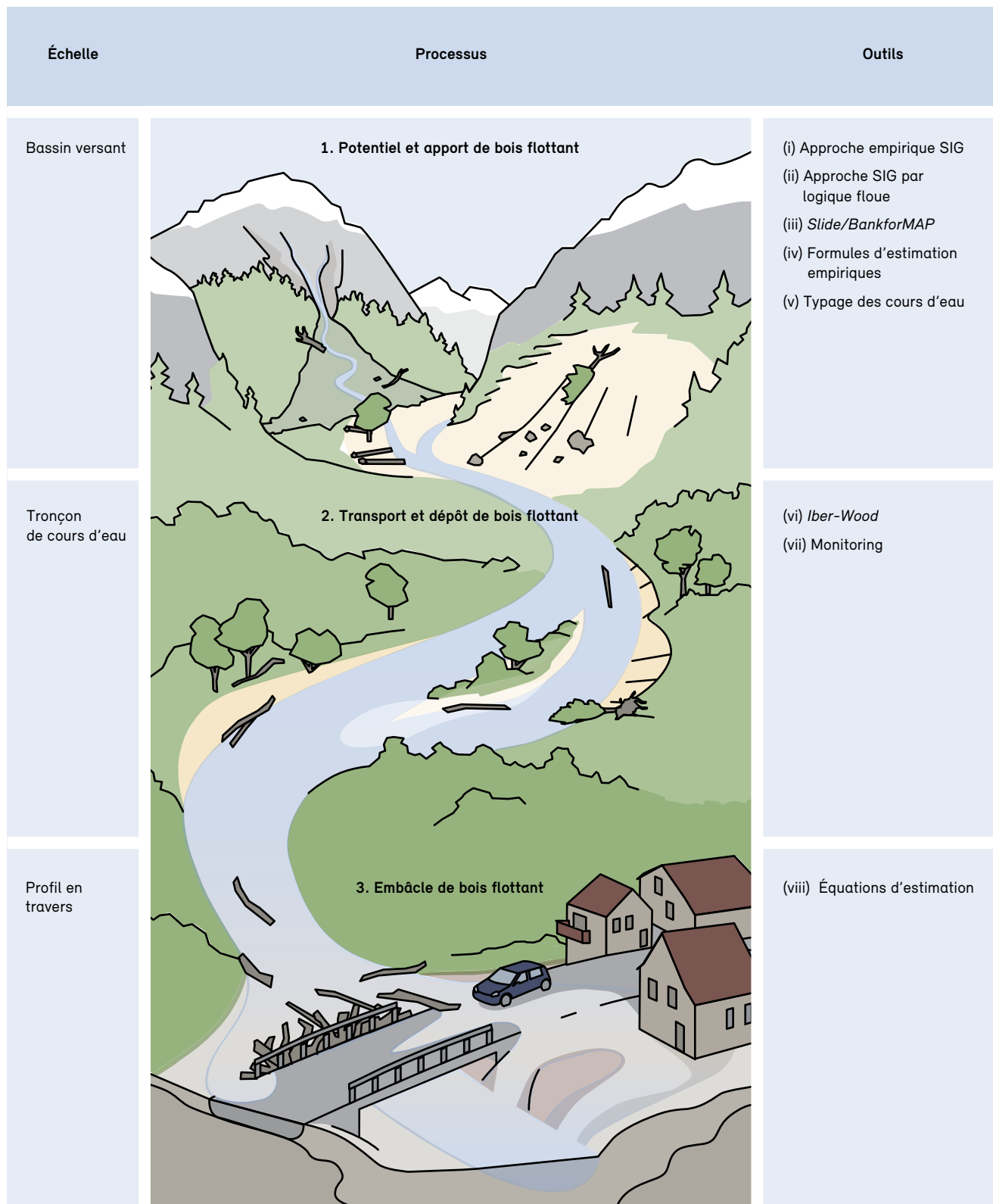
Structure du rapport et vue d'ensemble des méthodes

Le projet de recherche à vocation pratique *WoodFlow* a consisté dans un premier temps à élaborer des bases scientifiques visant à maîtriser les défis posés par le bois flottant dans le domaine de la gestion des cours d'eau (notamment en cas d'événement). Dans un second temps, ces bases ont été préparées en vue de leur mise en application dans la pratique suisse. Le présent rapport de synthèse fournit aux utilisateurs (p. ex. les bureaux d'ingénieurs et les services cantonaux) plusieurs outils et méthodes aidant à apprécier les dangers dus au bois flottant. Il est divisé en trois chapitres, qui abordent la dynamique du bois flottant à des échelles et des degrés de détail différents, dans un cadre global interdisciplinaire (Fig. 1 et Tab. 1).

Le *bassin versant* est le niveau de référence utilisé au chapitre 1 pour délimiter les surfaces contribuant à l'apport de bois flottant, identifier les principaux processus d'apport et estimer le potentiel de bois flottant ainsi que la charge de bois flottant attendue. Le *tronçon de cours d'eau* est l'échelle à laquelle sont analysés les processus de transport et de dépôt du bois flottant, ainsi que la réduction de la taille des morceaux de bois mobilisés (chap. 2). La modélisation des embâcles de bois flottant est faite au niveau du *profil en travers* et permet de localiser les points faibles du chenal d'écoulement (chap. 3). La Fig. 56 à l'annexe A2 illustre la complémentarité des approches développées dans le cadre du projet de recherche *WoodFlow* et renvoie aux différentes sections des trois chapitres. Les résultats modélisés servent de base pour les outils et les méthodes s'y rapportant.

Fig. 1 : Structure thématique du présent rapport de synthèse

Vue d'ensemble des outils au Tab. 1.



Termes et définitions

De manière générale, le terme « bois flottant » désigne le bois déposé ou entraîné par l'eau, dont la longueur est supérieure à 1 m et dont le diamètre est au moins égal à 0.1 m (Wohl & Jaeger, 2009). Il s'agit du terme le plus fréquemment employé en Suisse dans les ouvrages spécialisés, et donc également dans le présent rapport. D'autres termes tels que « bois flotté » ou « bois mort » sont parfois employés comme des synonymes de bois flottant. On trouve dans les ouvrages anglophones des termes tels que « instream wood », « large wood » et « woody debris » (Ruiz-Villanueva et al., 2016c), le dernier étant de moins en moins utilisé en raison de sa connotation négative. Le bois flottant peut être du bois déjà mort (tombé dans le chenal ou présent sur une surface forestière toute proche), du bois frais (apport dans le chenal uniquement en cas de crue) et du bois d'industrie transformé (ayant

été stocké dans un dépôt, par exemple, puis emporté par la crue) (Lange & Bezzola, 2006). Vous trouverez ci-après la définition des principaux termes employés dans ce rapport de synthèse. Un glossaire détaillé sur le thème du bois flottant est disponible sur le site www.woodflow.ch (en français, allemand, italien et anglais).

Bois flottant : arbre ou partie d'un arbre (y compris les souches, les racines, les couronnes, les troncs, les branches et les ramifications) transporté dans le corridor fluvial (y compris dans les zones alluviales), généralement d'une longueur supérieure à 1 m et d'un diamètre supérieur à 0.1 m.

Dépôt de bois flottant : accumulation de bois flottant dans le chenal ou dans l'espace du cours d'eau.

Tab. 1 : Description sommaire des outils et des méthodes à vocation pratique développés dans le cadre du projet de recherche *WoodFlow*
Plus de détails à l'annexe A3.

Numéro	Nom	Section	Objectif	Remarques
(i)	Approche empirique SIG	1.2	Identification des surfaces d'apport potentiel de bois flottant et estimation de la charge de bois flottant	Géoréférencée à l'échelle régionale
(ii)	Approche SIG par logique floue	1.3		
(iii)	<i>Slide/BankforMAP</i>	1.4		Géoréférencée à petite échelle ; modélisation probabiliste
(iv)	Formules d'estimation empiriques	1.5	Estimation de la charge de bois flottant	Fonctions puissance
(v)	Typage des cours d'eau	1.6	Évaluation de l'action de la végétation	Matrices d'évaluation pour la déduction de mesures sylvicoles
(vi)	<i>Iber-Wood</i>	2.4 / 3.4	Modélisation du transport et du dépôt du bois flottant	Modélisation numérique 2D de l'hydrodynamique/hydraulique
(vii)	Monitoring	2.5	Observation et estimation des dépôts, de la mobilisation et du transport de bois flottant	Instructions concernant : • les inspections sur le terrain (procès-verbal) • les appareils d'enregistrement (vidéosurveillance) • la télédétection (images aériennes et drones)
(viii)	Équations d'estimation	3.1/3.3/3.5	Quantification des processus d'embâcle et de leurs effets sur les ouvrages	Essais sur modèles physiques pour estimer : • la probabilité d'embâcle • l'exhaussement du niveau d'eau • l'affouillement local Arbre de décision pour la détermination de la revanche nécessaire pour le passage du bois flottant sous les ponts

Dynamique du bois flottant : processus d'apport, de transport et de dépôt qui définissent les mouvements de déplacement et d'équilibre du bois flottant. Au sens strict, il s'agit de l'analyse des forces agissant sur le transport du bois flottant.

Apport de bois flottant : processus aboutissant à la présence de bois flottant dans le chenal tel que l'érosion latérale, le glissement de terrain, la coulée de boue, la lave torrentielle, l'avalanche, le déracinement dû au vent, le transport fluvial ou la mortalité naturelle des arbres.

Charge de bois flottant : quantité de bois flottant (volume ou masse) disponible dans un bassin versant ou dans un tronçon de cours d'eau qui est effectivement transportée dans le cours d'eau en cas de crue.

Potentiel de bois flottant : quantité de bois flottant (volume ou masse) disponible dans un bassin versant ou dans un tronçon de cours d'eau qui est susceptible d'être mobilisée et apportée dans le chenal pendant un événement d'intensité déterminée.

Radeau de bois flottant : grande accumulation de bois flottant transporté qui recouvre entièrement le chenal actif et dont la longueur est au moins deux fois supérieure à la largeur moyenne du chenal (point 2.1.1).

Embâcle : accumulation de bois flottant (morceaux de différentes tailles) en un point donné du chenal, occasionnant un rétrécissement de sa section transversale. Le plus souvent, l'emploi de ce terme signifie implicitement que toute la largeur du chenal est concernée (embâcle complet ou obstruction).

Vous trouverez en annexe la liste de toutes les variables (et leur symbole) utilisées dans ce rapport de synthèse.

1 Potentiel et apport de bois flottant

Le premier chapitre propose différentes méthodes permettant d'estimer le potentiel de bois flottant dans un bassin versant ainsi que la charge de bois flottant attendue en cas de crue. Afin que les différentes approches de modélisation soient comparables entre elles, la quantité de bois flottant est toujours exprimée en mètres cubes. Sont présentées deux approches SIG (approche empirique et approche par logique floue), une approche probabiliste/numérique et plusieurs formules d'estimation empiriques. Le chapitre 1 propose par ailleurs un typage des tronçons de cours d'eau tenant compte de l'action de la végétation, lequel sert de méthode simplifiée pour évaluer les processus d'apport potentiels et estimer l'action de la végétation. Le point 1.1 ci-dessous présente les similitudes et les différences des deux approches SIG, qui s'appuient certes sur les mêmes données de référence, mais ne les exploitent pas de la même façon pour modéliser les processus et estimer la charge de bois flottant. En fin de chapitre, un exemple concret de mise en application (bassin versant de la Chirel dans le canton de Berne) permet de comparer les différents outils disponibles (point 1.7) et d'en déduire des recommandations pratiques (point 1.8).

1.1 Méthode générale et fondement des approches SIG

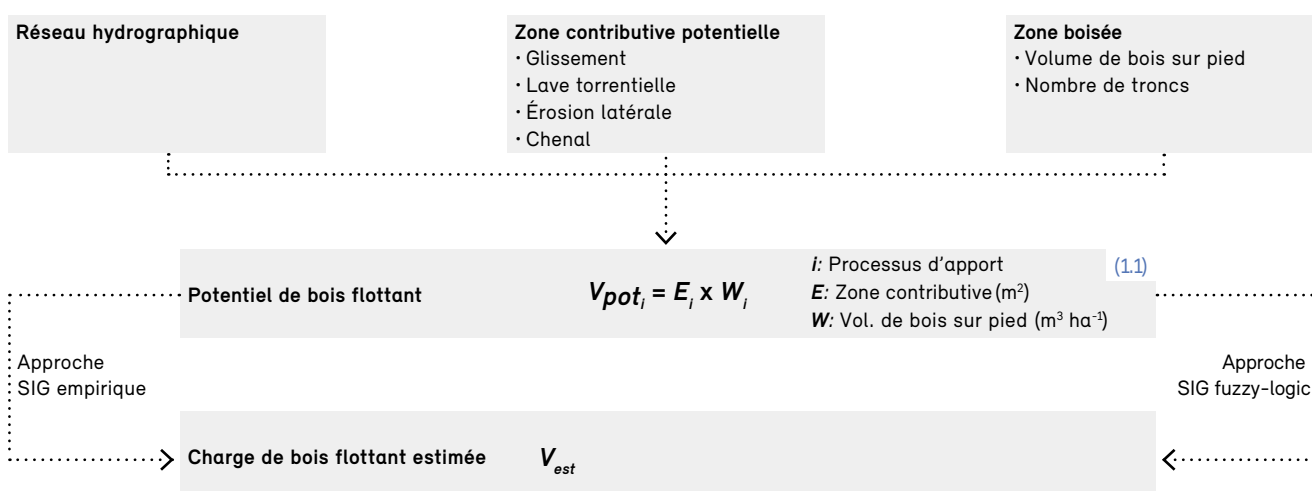
1.1.1 Méthode

Les deux approches SIG présentées ci-après procèdent à la modélisation géoréférencée de V_{pot} d'un bassin versant en recourant à des systèmes d'information géographiques. Elles recoupent diverses surfaces sujettes au processus considéré (apport potentiel de bois flottant) avec la surface forestière (volume de bois sur pied) et avec le réseau hydrographique (Fig. 2) en se focalisant sur l'apport et la mobilisation de bois flottant pendant un événement de crue. Le bois tombé dans le chenal avant l'épisode de crue (déracinement dû au vent, poids de la neige, ava-

lanche, etc.) est implicitement pris en considération ; il s'agit de la part de « bois du chenal ». À partir du potentiel de bois flottant ainsi déterminé, une seconde étape de la modélisation permet d'estimer V_{est} en provenance du bassin versant (Fig. 2), autrement dit la « quantité effective de bois flottant » (Lange et Bezzola 2006). Il s'agit en l'occurrence de V_{est} (points 1.1 à 1.4) ou de V_{reg} (point 1.5), qui ne doit pas être confondue avec V_{obs} .

Si les deux approches SIG exploitent les mêmes données de référence, elles diffèrent par leur façon de modéliser le potentiel de bois flottant et d'estimer la charge de bois flottant (points 1.2 et 1.3). L'approche empirique SIG (AES) intègre dans ses calculs plusieurs facteurs de

Fig. 2 : Représentation schématique du calcul du potentiel de bois flottant



réduction ; l'approche SIG par logique floue (ASLF) utilise plusieurs matrices de décision différentes pour estimer la charge de bois flottant.

1.1.2 Données de référence

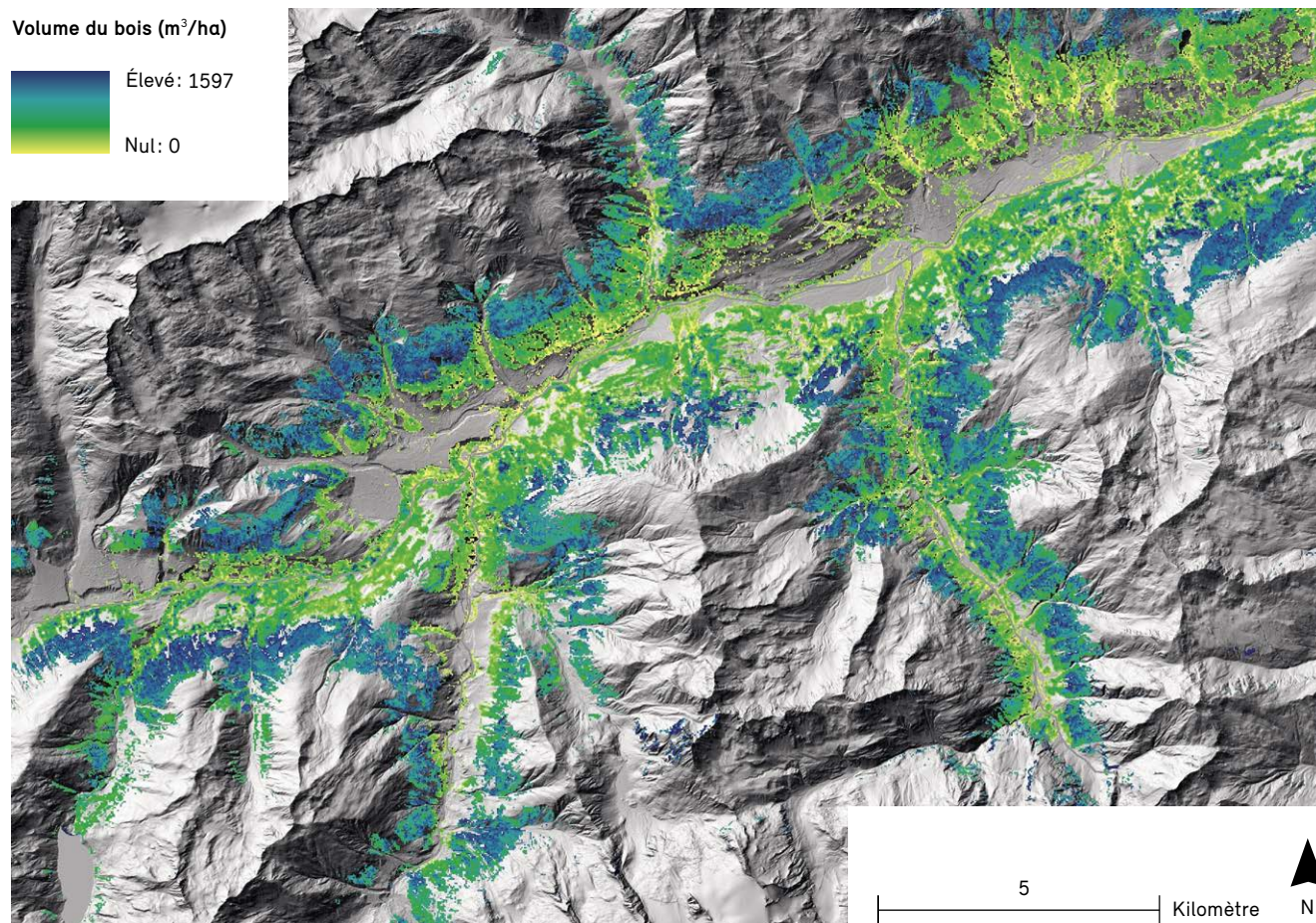
Afin que les résultats obtenus soient comparables d'une région à l'autre, les deux approches SIG utilisent des géodonnées uniformisées à l'échelle de la Suisse (Vector25 et swissTLM3D © swisstopo, swissALTI3D © swisstopo, SilvaProtect-CH © OFEV, Écomorphologie – niveau R [région] © OFEV, CH-NOCE © OFEV, Inventaire forestier national © WSL). Il s'agit concrètement des données d'entrée suivantes :

- shapefile du **bassin versant** à étudier : le shapefile doit être défini par l'utilisateur lui-même. L'OFEV met à disposition un outil simple et rapide pour extraire un pé-

mètre de recherche : la « Subdivision de la Suisse en bassins versants » (EZGG-CH), directement accessible en ligne en suivant le lien <https://s.geo.admin.ch/7dc770a41e>. Il suffit de cliquer sur le tronçon de cours d'eau souhaité pour obtenir les fichiers du bassin versant (partiel) correspondant, prêts à être téléchargés ;

- **modèle numérique de terrain** de la Suisse (swissALTI3D de swisstopo [résolution 2 x 2 m]) ;
- shapefile du **réseau hydrographique** de la Suisse : ce shapefile a été conçu spécifiquement pour les systèmes d'information géographiques, si bien qu'il contient déjà des liens vers des critères écomorphologiques (p. ex. largeur du cours d'eau) et vers les numéros d'ordre des cours d'eau ;
- shapefile de la **surface forestière** de la Suisse (Silva_V25) issu du jeu de données SilvaProtect-CH ;

Fig. 3 : Extrait de la carte du volume de bois sur pied dans le bassin versant du Rhin à Disentis/Mustér (GR)



Fond cartographique : modèle numérique de surface (relief).

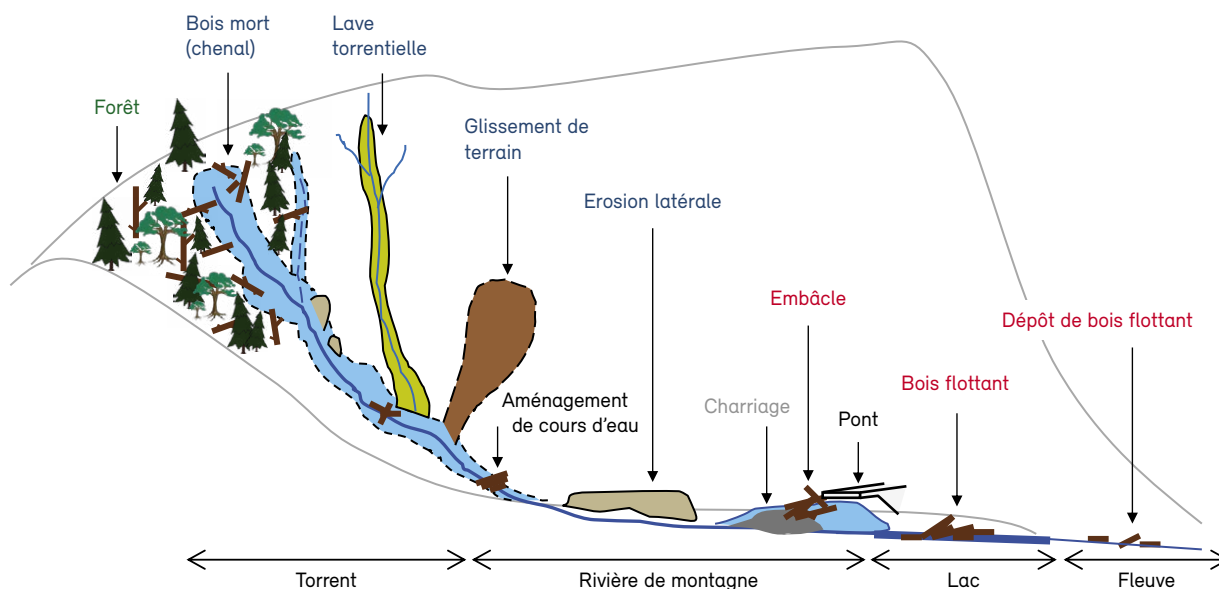
- shapefile des **arrondissements forestiers** de la Suisse, y compris des données provenant de l'IFN (WSL, 2016) ;
- carte du **volume de bois sur pied** [m^3/ha] dans les forêts suisses (VB-MHV) : basée sur le modèle de la hauteur de la végétation en Suisse (Ginzler & Hobi, 2016) et sur les données de l'IFN (WSL, 2016), cette carte nationale en format raster [$25 \times 25 \text{ m}$] renseigne sur le volume de bois sur pied [m^3/ha] dans les forêts suisses (Ginzler et al., 2019 ; Fig. 3). Dans les deux approches SIG, la surface forestière se réfère à la carte du VB-MHV. Le recoupement entre les surfaces d'apport potentiel (modélisées) et la surface forestière permet de calculer le potentiel de bois flottant ;
- modélisation des **processus d'apport** : les deux approches SIG prennent en considération les processus majeurs d'apport de bois flottant, à savoir les glissements de terrain, les laves torrentielles provenant d'affluents à pente raide, l'érosion latérale et la mobilisation du bois mort déjà présent dans le chenal (Fig. 4). Elles utilisent pour cela les données contenues dans les shapefiles de SilvaProtect-CH décrivant les trajectoires des coulées de boue (EV_HM ; base pour la délimitation des surfaces de glissement potentielles) et les trajectoires des laves torrentielles (EV_Mur) (Losey & Wehrli, 2013). Ces shapefiles sont mis à disposition

par l'OFEV. L'élément clé pour la modélisation de l'érosion latérale et du recul des berges est la largeur du lit mineur dans le réseau hydrographique (Écomorphologie – niveau R [région]). Les résultats empiriques présentés au point 2.3. ont servi à l'estimation du potentiel de bois mort dans le chenal.

Les deux approches SIG sont mises à disposition sur le site www.woodflow.ch sous la forme de fichiers .tbx ou de scripts Python à télécharger. Elles sont accompagnées d'un manuel d'utilisation détaillé. Le site précise à quel endroit les géodonnées requises sont accessibles. Les données de référence et la méthodologie sont décrites de façon plus détaillée dans les publications de Steeb et al. (2019a) et de Ruiz-Villanueva & Stoffel (2018).

Fig. 4 : Représentation schématique des processus d'apport et de dépôt de bois flottant

Adaptation d'après Waldner et al., 2009.



1.1.3 Scénarios

Pour estimer le potentiel de bois flottant d'un bassin versant, les approches SIG (points 1.2 et 1.3) et l'approche probabiliste (point 1.4) calculent trois scénarios différents en fonction de la probabilité d'occurrence ou de la périodicité des processus impliqués :

$$SH_{\langle 30 \rangle} \mid SH_{100} \mid SH_{\langle 300 \rangle}$$

La plupart des événements bien documentés se rapportant au bois flottant (point 1.5) font état d'un épisode de précipitations éventuellement associé à un débit d'une périodicité de 50 à 150 ans. Ce scénario est repris dans le présent rapport sous la dénomination SH_{100} . Les deux autres scénarios $SH_{\langle 30 \rangle}$ et $SH_{\langle 300 \rangle}$ ont été établis sur la base d'expertises en tenant compte de facteurs ad hoc ; faute de données suffisantes, il n'a pas été possible de les quantifier plus précisément. Pour cette raison, la périodicité à laquelle ils se réfèrent est approximative (et donc indiquée entre guillemets).

L'AES utilise des facteurs de réduction différents selon le scénario, ainsi que des largeurs tampons différentes pour les surfaces d'apport potentiel (se référer à la méthode décrite en détail par Steeb et al., 2019a). Pour chaque scénario, l'ASLF représente les surfaces d'apport potentiel

sous forme de cartes matricielles avec des valeurs de possibilité entre 0 et 1. L'approche probabiliste fait une estimation des quantités de précipitations (*SlideforMAP*) et des débits (*BankforMAP*) pour chaque scénario et utilise ces estimations pour la modélisation numérique des processus d'apport.

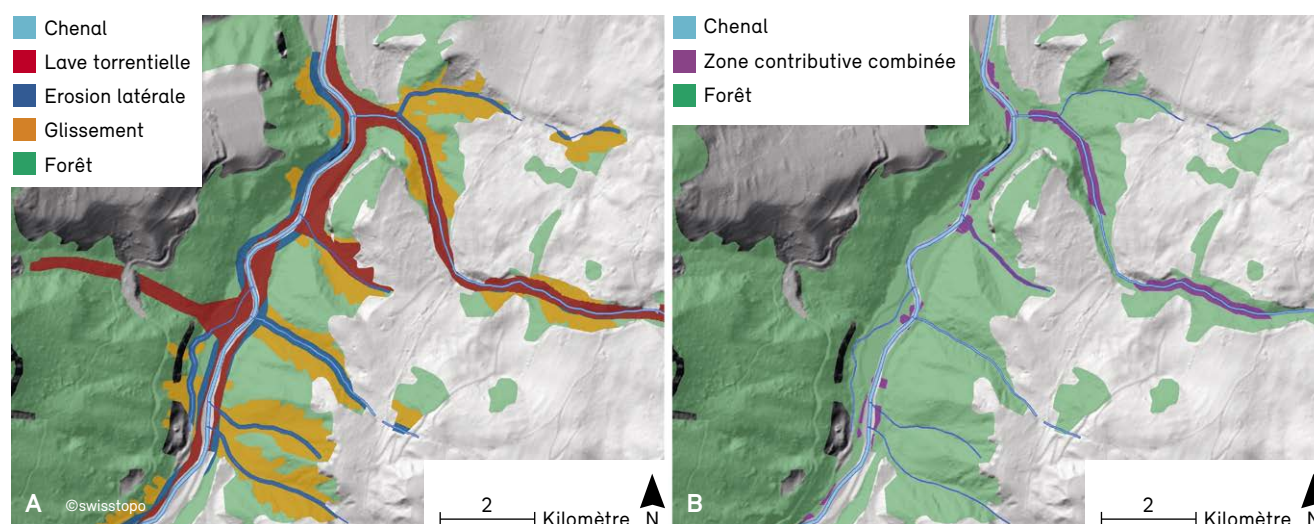
1.2 Approche empirique SIG

1.2.1 Potentiel de bois flottant

Une fois les données d'entrée saisies, le modèle SIG calcule automatiquement le potentiel de bois flottant dans le bassin versant considéré. Pour cela, il extrait, d'une part, les surfaces potentielles de perte forestière liées aux différents processus d'apport (Fig. 5a) et, d'autre part, les surfaces d'apport potentiel qui se superposent à l'extérieur du lit (érosion latérale, glissement de terrain, lave torrentielle ; Fig. 5b). La surface potentielle d'apport ainsi combinée permet de déterminer le potentiel de bois flottant minimal attendu et de définir les surfaces potentielles ayant la plus grande probabilité de mobilisation. Ces surfaces sont celles où il faut agir en priorité pour réduire la présence de bois flottant (entretien des forêts et des cours d'eau).

Fig. 5 : Extrait de la modélisation SIG du bassin versant de la Chiene (BE)

Les données produites sont (A) les surfaces de perte forestière par processus d'apport et (B) les surfaces d'apport potentiel qui se superposent.



Fond cartographique : modèle numérique de surface (relief).

Le modèle SIG produit un tableau dans lequel la surface d'apport potentiel boisée et la quantité potentielle de bois flottant (m^3) sont calculées pour chaque processus d'apport et pour chacun des trois scénarios (Tab. 2). Le volume de bois mort et le volume de bois frais qui composent le potentiel de bois flottant total peuvent être différenciés et il est possible d'estimer le nombre de troncs d'arbre mobilisés à l'intérieur de la surface forestière considérée.

Comme en témoigne le Tab. 2, le glissement de terrain est généralement le processus qui influence le plus fortement la surface d'apport potentiel. Cela tient au fait que l'effet protecteur de la forêt n'a pas été pris en compte dans les trajectoires de coulée de boue modélisées par SilvaProtect-CH et que les surfaces d'apport correspondantes ont donc tendance à être surévaluées. Pour compenser cette surévaluation, l'AES intègre dans l'estimation de la charge de bois flottant plusieurs facteurs de réduction qui rééquilibrent la part des différents processus d'apport.

1.2.2 Charge de bois flottant

À partir de V_{pot} ainsi déterminé, une seconde étape de modélisation permet d'estimer V_{est} (équation 1.2), étant admis que tout le bois potentiellement disponible ne sera pas apporté et transporté dans le cours d'eau en cas de crue (Fig. 2). Les facteurs de réduction f_{abm} pris en compte dans ces calculs jouent un rôle important en ce qu'ils diffèrent selon le processus d'apport et selon le scénario (Tab. 3):

$$V_{est} = \sum_i^n V_{pot_i} \cdot f_{abm_i} \quad (1.2)$$

Les facteurs de réduction ont été déterminés de manière empirique par comparaison entre le potentiel de bois flottant et V_{obs} et sur la base d'indications fournies par d'autres études et d'autres modèles (Steeb et al., 2019a). Les charges de bois flottant et les surfaces d'apport estimées sont ainsi du même ordre de grandeur que les valeurs observées lors d'événements passés (Fig. 6). Calculée sur la base de 34 bassins versants tests, V_{est} correspond à 2 % de V_{pot} dans le scénario SH_{«30»}, à 8 % de V_{pot} dans le scénario SH₁₀₀ et à 19 % de V_{pot} dans le scénario SH_{«300»}. Elle représente la part du potentiel de bois flottant qui est mobilisée en cas d'événement (selon l'approche SIG).

Considérant la périodicité de l'événement, les charges calculées avec les facteurs de réduction du modèle SIG ont plutôt tendance à surévaluer les quantités de bois (Fig. 8B). En matière de prévention des dangers, cette surévaluation fait office d'estimation prudente. L'AES a été appliquée à 34 bassins tests pour lesquels il existait déjà des observations relatives aux charges de bois flottant effectives (V_{obs}). De manière générale, les meilleurs résultats obtenus avec cette approche sont ceux qui concernent les bassins versants de petite à moyenne taille (5 à 200 km²). Comme la situation dans les bassins versants de très petite taille (<5 km²) peut être dominée par

Tab. 2 : Tableau produit par le modèle SIG pour le bassin versant de la Grande Melchaa (OW)

La surface boisée d'apport potentiel et la charge potentielle de bois flottant correspondante [m^3] sont calculées pour chaque processus d'apport et chaque scénario. Le potentiel V_{pot} total représente la somme des charges de bois flottant correspondant aux surfaces d'apport potentiel, tandis que V_{combi} représente les charges relatives aux surfaces qui se superposent.

	SH _{«30»}		SH ₁₀₀		SH _{«300»}	
	Surface d'apport potentiel [ha]	Quantité potentielle de bois flottant [m^3]	Surface d'apport potentiel [ha]	Quantité potentielle de bois flottant [m^3]	Surface d'apport potentiel [ha]	Quantité potentielle de bois flottant [m^3]
Bois du chenal	28.5	2 197	28.5	2 197	28.5	2 197
Érosion latérale	18.7	4 659	62.7	18 567	91.4	28 550
Glissement	141.5	49 574	152.9	54 919	151.3	55 197
Lave torrentielle	69.4	18 052	97.7	26 218	124.8	34 423
V_{pot} total	258.0	74 483	341.7	101 901	396.0	120 367
V_{tot} combi	10.1	2 724	30.0	8 270	47.0	13 116

des processus d'apport sporadiques tels que des glissements ou des laves torrentielles, les charges de bois flottant sont sous-évaluées par le modèle ($V_{obs} > V_{est}$). Pour les bassins versants de très grande taille ($>200 \text{ km}^2$), V_{pot} est à l'inverse très élevé (le rapport V_{obs}/V_{pot} est plus petit que la fourchette des facteurs f_{abm} ; Fig. 7). En cas d'intempéries, seule une partie du bassin est touchée et donc active sur le plan géomorphologique, si bien que les facteurs de réduction figurant dans le Tab. 3 ont tendance à être trop élevés, et les charges de bois flottant surévaluées ($V_{est} > V_{obs}$). Dans la perspective d'une comparaison entre l'AES et l'ASLF (point 1.7), les charges de bois flottant estimées par l'AES (Fig. 8) et par l'ASLF (Fig. 10) concernent la même sélection de périmètres de recherche.

1.3 Approche SIG par logique floue

Tab. 3 : Facteurs de réduction de la charge de bois flottant estimée

Aperçu des facteurs de réduction utilisés pour estimer V_{est} à partir de V_{pot} d'un bassin versant.

f_{abm}	SH _{«30»}	SH ₁₀₀	SH _{«300»}
Bois du chenal	0.1	0.3	0.7
Érosion latérale	0.05	0.1	0.2
Glissement	0.01	0.05	0.1
Lave torrentielle	0.05	0.1	0.3

Il existe une autre approche SIG permettant de déterminer les surfaces d'apport de bois flottant et d'estimer le volume de bois flottant dans un bassin donné. Cette approche fondée sur les principes de la logique floue a été développée par Ruiz-Villanueva et al. (2014a). Très flexible, la théorie de la logique floue (*fuzzy logic* en anglais) s'adapte facilement à une multitude de problématiques différentes (p.ex. Mazzorana et Fuchs, 2010).

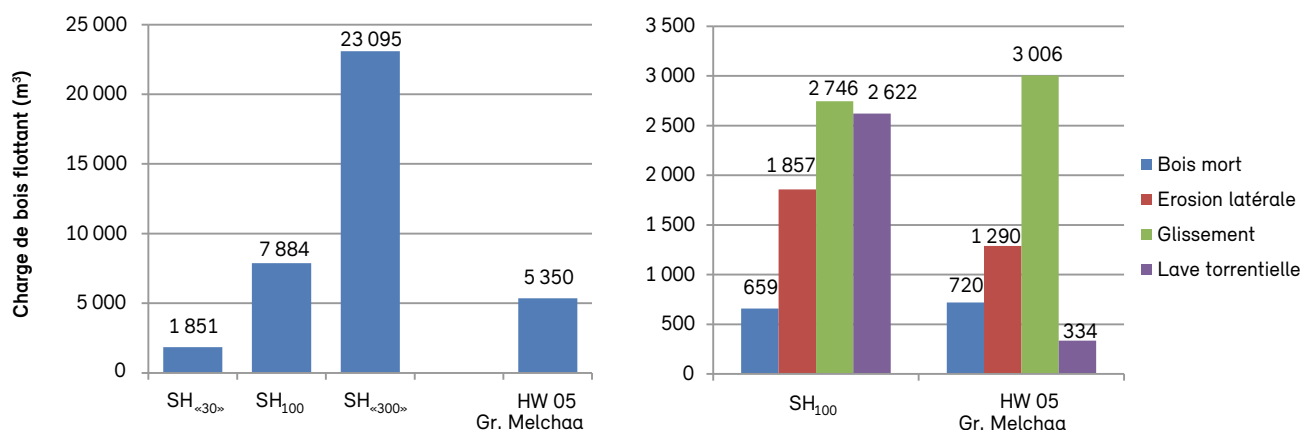
L'approche SIG par logique floue (ASLF) se déroule en trois étapes :

- analyser le terrain pour déterminer les surfaces d'apport potentielles sujettes à l'érosion des berges, aux glissements de terrain et aux laves torrentielles ;
- analyser la couverture forestière et la densité de végétation ;
- déterminer pour différents scénarios le volume de bois flottant potentiel et estimé.

Les trois scénarios établis pour les approches SIG (point 1.1.3) diffèrent par la probabilité et l'intensité des processus impliqués. Ils se réfèrent à un événement fréquent (SH_{«30»}), à un événement rare (SH₁₀₀) et à un événement très rare (SH_{«300»}). Dans le modèle ASLF, les surfaces sujettes aux processus d'apport ne sont pas toutes modélisées de la même façon. S'agissant des surfaces sujettes aux glissements et aux laves torrentielles,

Fig. 6 : Comparaison des charges bois flottant estimées et observées en prenant pour exemple la Grande Melchaa (OW)

Charges V_{est} par scénario, à gauche, et comparaison avec les charges V_{obs} par processus d'apport pour la crue de 2005 (le débit de pointe de 2005 ayant une périodicité d'environ 100 ans) en prenant pour exemple la Grande Melchaa ($E = 76 \text{ km}^2$; à droite)

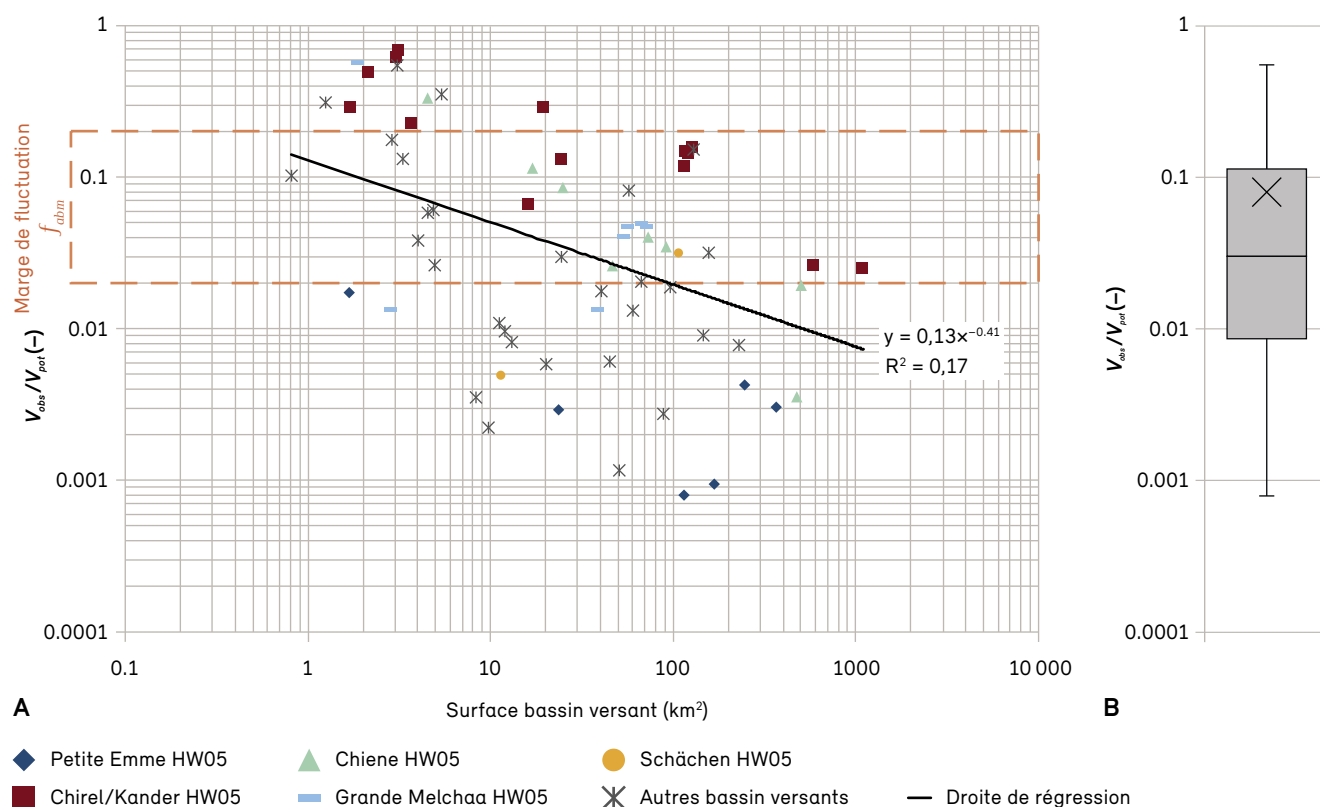


les secteurs concernés sont définis sur la base des trajectoires linéaires de SilvaProtect-CH. Comme l'intensité n'est pas une donnée fournie par SilvaProtect, il faut la déduire d'après la densité des trajectoires, en se basant sur les bornes de classes (seuils naturels) définies par Jenks. Plus la trajectoire est dense, plus l'intensité est élevée. L'analyse étant basée sur des données matricielles, les lignes doivent être converties en zones de pixels. Outre l'intensité des processus, la connectivité entre les surfaces d'apport et le réseau hydrographique joue elle aussi un rôle important dans la mobilisation du bois flottant. Dans le modèle ASLF, les surfaces situées à plus de 100 m du chenal ou dont la pente est inférieure à 40° sont considérées comme non connectées au réseau hydrographique et sont donc exclues (Fig. 9).

SilvaProtect-CH ne fournissant aucune indication relative à l'érosion latérale, il a fallu développer pour l'ASLF un modèle spécifique capable de déterminer les surfaces potentiellement concernées par ce processus. Ce modèle tient compte de la sinuosité du chenal et de sa déclivité (paramètre aidant à estimer la capacité de transport) et intègre un ratio entre la largeur actuelle du chenal et sa largeur possible en cas d'érosion latérale due à un événement de crue. Ce ratio a été calculé sur la base des crues de plusieurs cours d'eau en Suisse et dans six autres pays telles qu'elles sont documentées dans une banque de données européenne (Ruiz-Villanueva et al., 2019a). L'analyse de ces données a permis de créer trois catégories (basées sur le premier quartile, le troisième quartile et la valeur médiane) en considérant différentes

Fig. 7 : Application du modèle SIG empirique à un groupe de 34 bassins tests

Pour certains d'entre eux, il a été possible d'utiliser également des données relatives à des surfaces de bassin versant partiel (analyse de la crue de 2005). (A) En moyenne, le rapport V_{obs}/V_{pot} diminue à mesure que la taille du bassin versant augmente. (B) Le box plot montre la distribution des valeurs V_{obs}/V_{pot} pour tous les bassins tests (x = valeur moyenne).



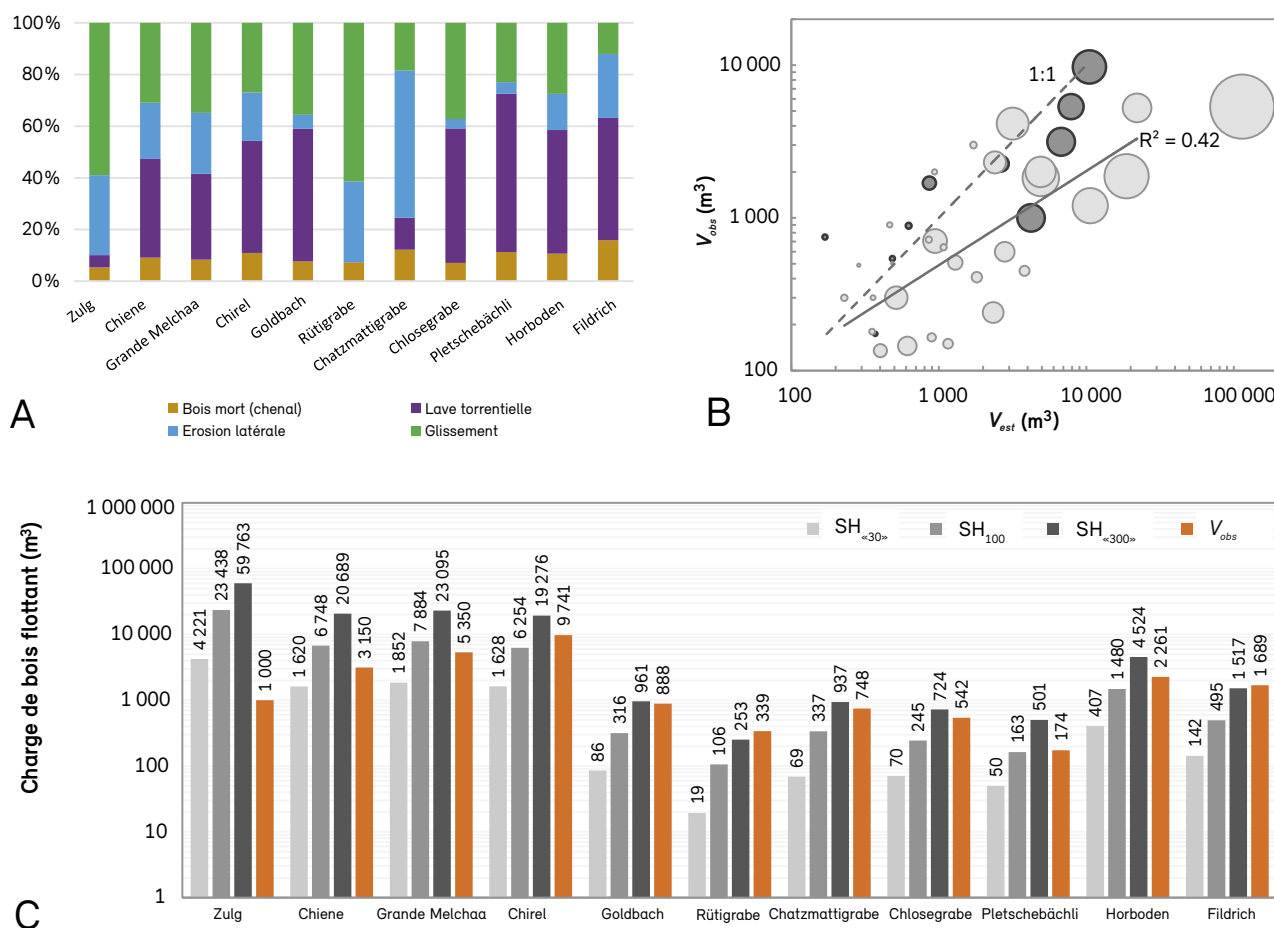
classes de largeur de chenal. Les données écomorphologiques de l'OFEV (indications sur la largeur du lit) ont ensuite été utilisées pour attribuer un ratio aux différents cours d'eau.

Les surfaces d'apport sujettes aux processus de glissement, de lave torrentielle et d'érosion latérale sont réparties selon une classification qui produit pour chaque scénario une matrice avec des valeurs de possibilité entre 0 et 1. Les surfaces des différents processus qui se superposent sont corrigées comme suit : aux endroits où des

processus de lave torrentielle et des processus de glissement se superposent, les premiers sont ignorés ; les deux sont ignorés aux endroits où ils se superposent à des surfaces d'érosion latérale. La charge de bois flottant (bois vivant) est calculée à partir de cette matrice et de la carte du VB-MHV. Elle sert ensuite de base pour l'estimation du bois mort présent sur le sol forestier, qui correspond (selon des relevés de l'IFN) à 5 % du bois vivant. S'agissant du bois mort déjà présent dans le chenal, l'ASLF applique des valeurs d'estimation différentes en fonction du numéro d'ordre du cours d'eau (Fig. 38 au point 2.3) ;

Fig. 8 : Données produites par l'approche empirique SIG

(A) part de la charge de bois flottant par processus d'apport (bois du chenal, lave torrentielle, érosion latérale et glissement) pour différents bassins versants ; (B) charge de bois flottant estimée et comparaison avec les quantités de bois flottant documentées pour la crue de 2005 (et de 2012 pour la Zulg). La taille des cercles est proportionnelle à la taille des bassins versants. Les cercles foncés correspondent aux bassins illustrés sur les graphiques (A) et (C) (il s'agit des mêmes exemples de cas que ceux modélisés par l'ASLF et présentés sur la Fig. 10). Les cercles clairs correspondent à d'autres bassins modélisés uniquement par l'AES ; (C) charge de bois flottant par scénario ($SH_{\text{«30»}}$, SH_{100} , $SH_{\text{«300»}}$) et par exemple de cas.



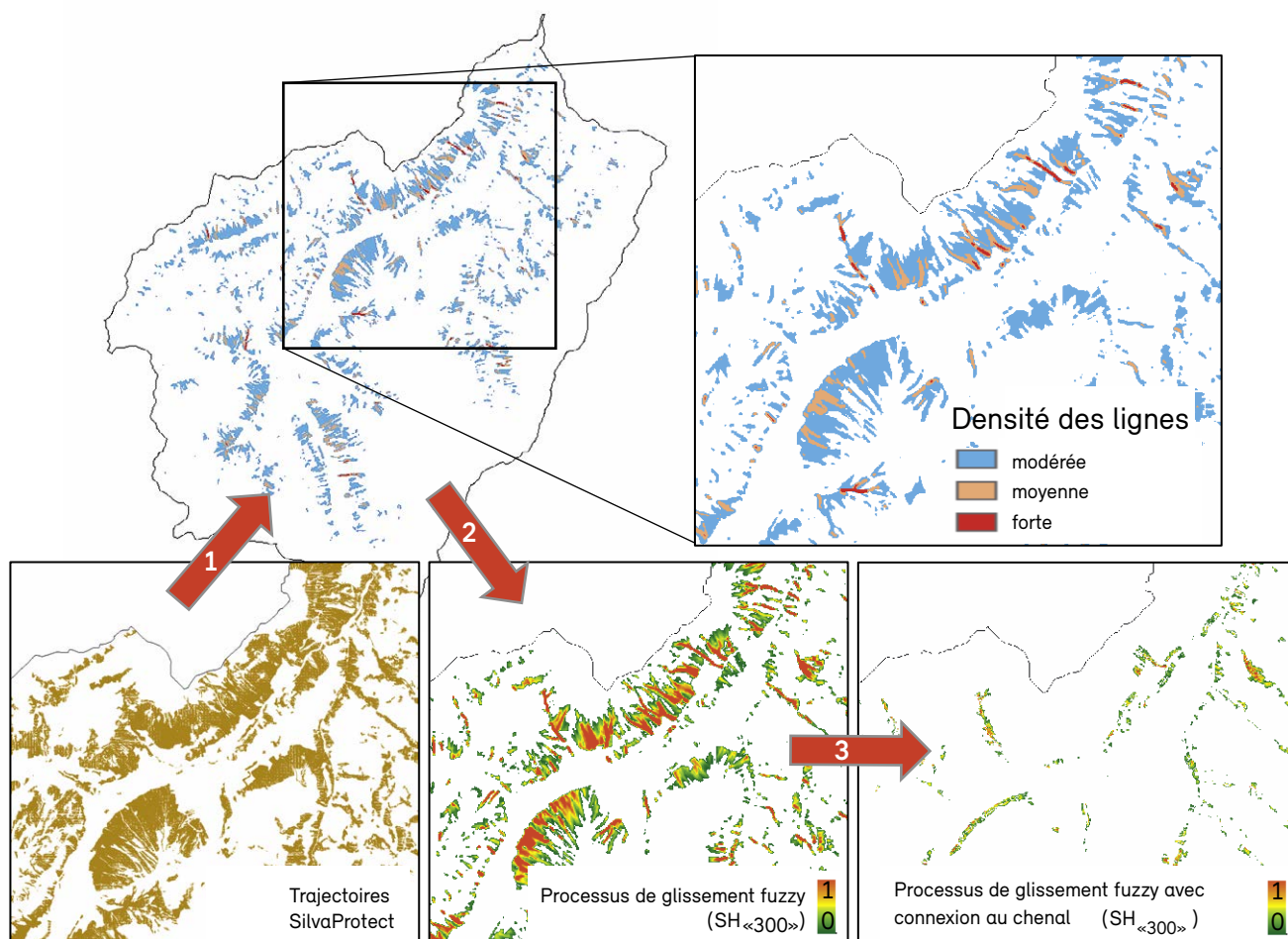
ces valeurs ont pu être vérifiées grâce aux indications de Ruiz-Villanueva et al. (2016c) et aux observations de Rickli et al. (2018). Contrairement à l'AES, l'ASLF ne représente pas la mobilisation du bois du chenal comme un processus d'apport en tant que tel (Fig. 8A et Fig. 10A), mais l'intègre dans l'indication du volume de bois sur pied.

L'approche SIG par logique floue a été appliquée aux bassins versants de la Chirel, de la Chiene, de la Petite Emme, de la Landquart, de la Grande Melchaa et de la Zulg. Elle a été validée grâce aux données d'observation de la crue d'août 2005, et de 2012 pour la Zulg (Fig. 10). Le bassin versant de la Chirel a été analysé en détail pour servir de point de comparaison avec les autres approches (point 1.7). Les charges de bois flottant estimées pour le

scénario SH₁₀₀ présentent une bonne concordance avec les observations faites après la crue de 2005 (Waldner et al., 2009 ; Kuratli, 2017 ; Steeb et al., 2017). D'après les résultats obtenus, l'érosion latérale est le processus qui domine l'apport de bois flottant dans le chenal, suivi par les processus de glissement et de lave torrentielle ; ces derniers varient toutefois selon le bassin versant. Il convient de noter que les surfaces concernées par l'érosion latérale ont tendance à être surévaluées du fait que l'ASLF ne tient pas compte des éventuels aménagements bordant le chenal qui contribuent à empêcher l'élargissement du lit. Cette erreur a un impact moindre lorsqu'il s'agit de bassins versants non aménagés, comme celui de la Chirel, qui a subi d'importants déplacements de chenal pendant la crue de 2005. Ce constat souligne la difficulté

Fig. 9 : Bassin versant de la Chirel

Cartes du bassin versant de la Chirel illustrant le travail réalisé à partir des trajectoires SilvaProtect (en bas à gauche) pour analyser la densité des trajectoires (1), les zones de glissement de terrain imprécises (2) et leur connectivité avec le réseau hydrographique (3).



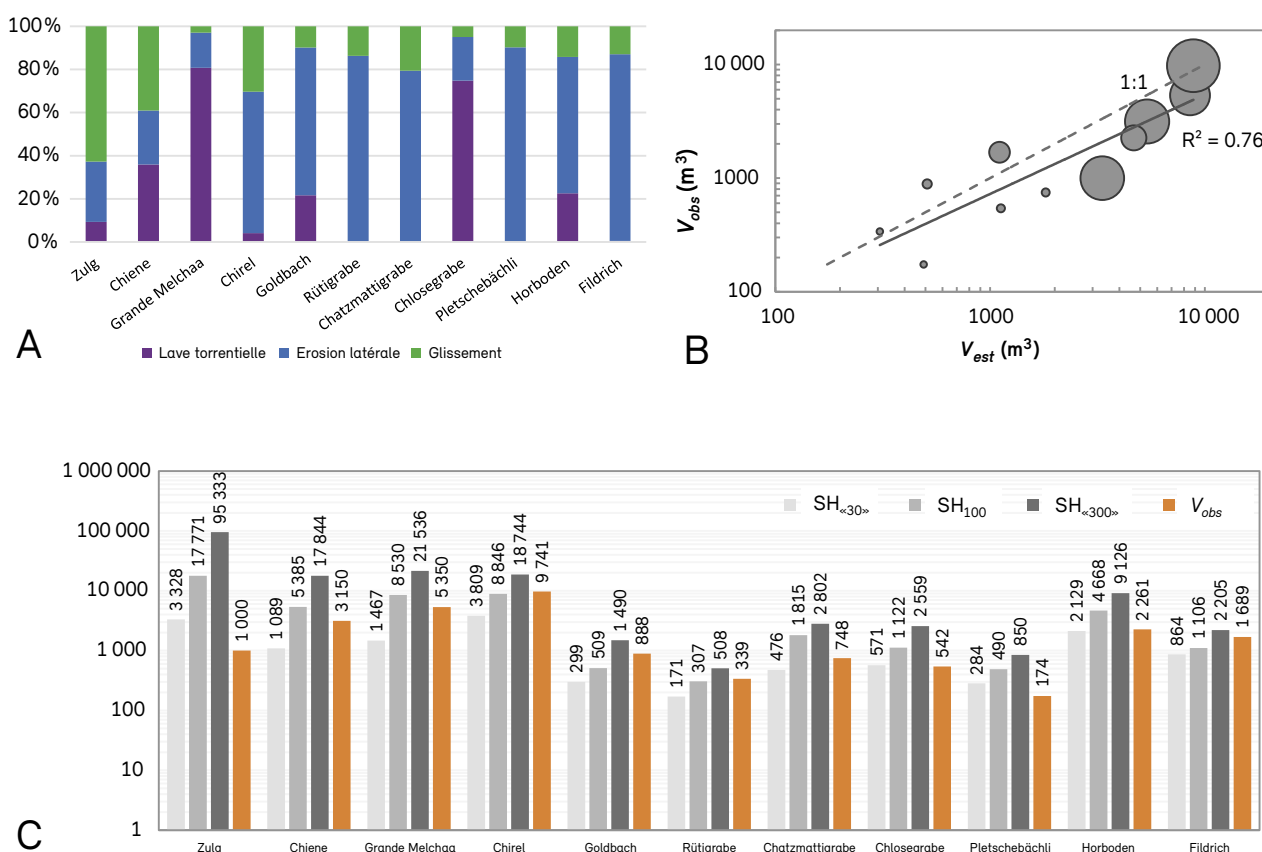
que représente l'estimation systématisée de l'érosion latérale et des déplacements de chenal. Le modèle ASLF prend en compte tous les secteurs qui, le long du réseau hydrographique, peuvent potentiellement être exposés au processus d'érosion latérale. Les valeurs qu'il en déduit pour chaque scénario s'entendent comme des valeurs maximales qui, en cas d'événement, ont toutefois peu de chance d'être atteintes. Il est prévu de perfectionner et d'améliorer cet aspect du modèle ASLF.

Comme indiqué précédemment, le calcul de la charge de bois flottant estimée se déroule en plusieurs étapes, que l'utilisateur peut réaliser séparément et directement. Il lui suffit de saisir les données d'entrée requises, puis d'enregistrer les fichiers de sortie qui seront utiles

à l'étape de modélisation suivante. Le modèle ASLF de détermination des surfaces d'apport potentiel a été créé à l'aide du logiciel ArcGIS 10.1 et requiert l'installation des extensions Spatial Analyst et 3D Analyst (ESRI). Il comprend un fichier .tbx, une documentation (avec un guide succinct) et un script Python (pour le calcul de sinuosité du chenal). Il s'agit d'un modèle flexible pouvant s'adapter à différentes données d'entrée. Il permet par exemple d'intégrer des processus de glissement et de lave torrentielle indépendamment de SilvaProtect-CH ou de prendre en considération des processus d'apport supplémentaires, tels que les avalanches et les tempêtes.

Fig. 10: Données produites par l'approche SIG par logique floue

(A) Part de la charge de bois flottant par processus d'apport (glissement, lave torrentielle et érosion latérale; le bois du chenal est pris en considération implicitement dans la charge totale) pour une sélection de bassins versants; (B) charge de bois flottant estimée et comparaison avec les quantités de bois flottant documentées pour la crue de 2005 (et de 2012 pour la Zugl). La taille des cercles est proportionnelle à la taille des bassins versants; (C) charge de bois flottant par scénario ($SH_{<30>}$, SH_{100} , $SH_{<300>}$) et par périmètre étudié.



1.4 Approche probabiliste : *SlideforMAP* et *BankforMAP*

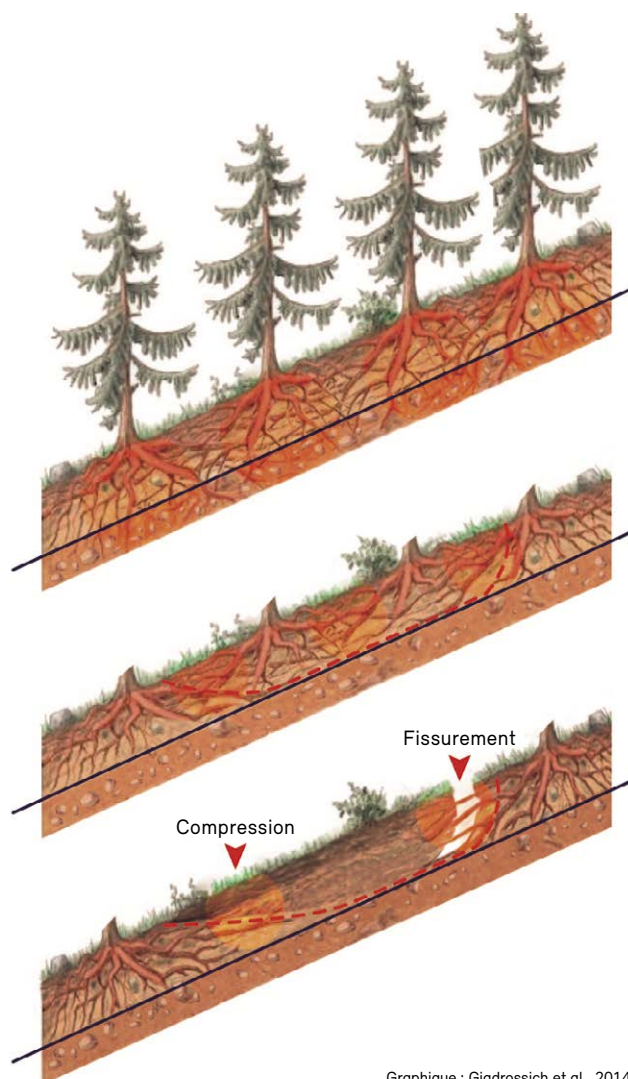
1.4.1 Modélisation numérique des processus d'apport

Parmi les nombreuses méthodes d'évaluation quantitative développées ces dernières décennies, rares sont celles qui intègrent les effets de la végétation sur la dynamique du bois flottant. Quelques modèles physiques et numériques servant à évaluer la stabilité des versants utilisent les propriétés mécaniques de la végétation pour tenir compte du fait que les racines pivotantes plongeant jusqu'à l'horizon de cisaillement augmentent la cohésion visible du sol et stabilisent les versants. D'autres modèles tiennent compte du renforcement latéral du sol sous l'action des racines, c'est-à-dire de la stabilisation des versants due à l'effet de traction et de pression exercé par les racines latérales (Fig. 11). Pour modéliser l'érosion des berges, certaines méthodes intègrent la contrainte d'entraînement en pascals (Pa) ou la puissance d'écoulement en watts par mètre carré (W/m^2). Le matériau riverain est arraché dès que la contrainte d'entraînement ou la puissance d'écoulement dépasse la valeur limite spécifique au matériau. Si la végétation augmente effectivement les valeurs limites de la contrainte d'entraînement et de la puissance d'écoulement, le manque de données quantitatives spécifiques à la végétation rend toutefois difficile l'intégration de ces limites dans des modèles.

Deux modèles numériques ont été développés pour permettre la quantification, la visualisation et une meilleure estimation de l'action de la végétation sur la stabilité des versants et des berges : *SlideforMAP* (landSlide-forest-MAP) et *BankforMAP* (Bank-forest-MAP).

SlideforMAP (Schwarz et al., 2010, 2012, 2013) modélise à petite échelle de manière géoréférencée (d'où le nom «MAP») la probabilité des glissements de terrain et de berge ainsi que l'action protectrice de la forêt dans son état actuel ou idéal. À titre d'exemple, la Fig. 12B illustre la probabilité de glissement pour un épisode de précipitations d'une périodicité de 100 ans (d'après HADES ; Jensen et al., 1997). Afin de quantifier l'action de la végétation spécifique à une station, la position et la taille des arbres sont déterminées grâce à un algorithme de reconnaissance des arbres isolés FINT (Dorren, 2017 ; Menk et al., 2017) (Fig. 12A). Le renforcement du sol sous

Fig. 11 : La végétation stabilise les versants grâce à l'action des racines pivotantes et latérales et augmente les contraintes de traction, de cisaillement et de compression



Graphique : Giadrossich et al., 2014

l'action des racines est calculé à partir de données sur les essences d'arbres enregistrées dans *SlideforMAP* (p.ex. Dazio et al., 2018 ; Fig. 12D).

BankforMAP modélise à petite échelle de manière géoréférencée la probabilité d'érosion des berges (Fig. 12C) en tenant compte des paramètres contribuant à la formation de l'écoulement et des effets de la végétation. L'érosion est le résultat de forces hydrodynamiques agissant sur les berges (Julien, 2002). Les dépôts au pied des berges sont enlevés latéralement et transportés sous forme de charge sédimentaire (charriage et suspension).

Dans *BankforMAP*, le calcul de la contrainte d'entraînement limite suppose de déterminer le paramètre de Shields afin de connaître la contrainte d'entraînement excédentaire par section transversale. Le coefficient d'érodabilité est alors déterminé de manière stochastique. *BankforMAP* peut ainsi modéliser la probabilité spatiale d'érosion des berges avec et sans végétation. L'état de la forêt peut également être adapté afin d'établir l'efficacité de l'action stabilisatrice de la forêt (actuelle ou idéale) par rapport à une situation sans forêt. Ici aussi, l'algorithme FINT est utilisé pour déterminer la position et la taille des arbres. Dans *BankforMAP*, l'influence de la végétation a été intégrée de telle sorte qu'elle augmente la contrainte d'entraînement limite et réduit la probabilité d'érosion

si la surface riveraine directement exposée aux forces hydrodynamiques est riche en racines. La modélisation et la comparaison d'une rive boisée et d'une rive non boisée permettent d'établir dans quelle mesure la végétation influe sur la probabilité d'érosion et à quels endroits le potentiel de protection peut être optimisé.

Les deux modèles *SlideforMAP* et *BankforMAP* peuvent être utilisés pour montrer l'action stabilisatrice de la forêt considérée dans son état actuel ou idéal. Cette approche de modélisation spatiale permet de repérer les endroits d'un bassin versant qui nécessitent la mise en œuvre de mesures sylvicoles. L'efficacité, et donc le potentiel de protection, correspond à la différence entre la probabilité

Fig. 12: Application de *SlideforMAP* / *BankforMAP* à une partie du bassin versant de la Chirel à Rothbad (BE)

Reconnaissance des arbres isolés avec l'algorithme FINT (A), probabilité de glissement pour un épisode de précipitations d'une périodicité de 100 ans, dans l'état actuel de la forêt (B), probabilité d'érosion des berges pour un débit d'une périodicité de 100 ans (C) et effet de stabilisation dû au renforcement du sol par les racines, dans l'état actuel de la forêt (D), à Rothbad (BE).

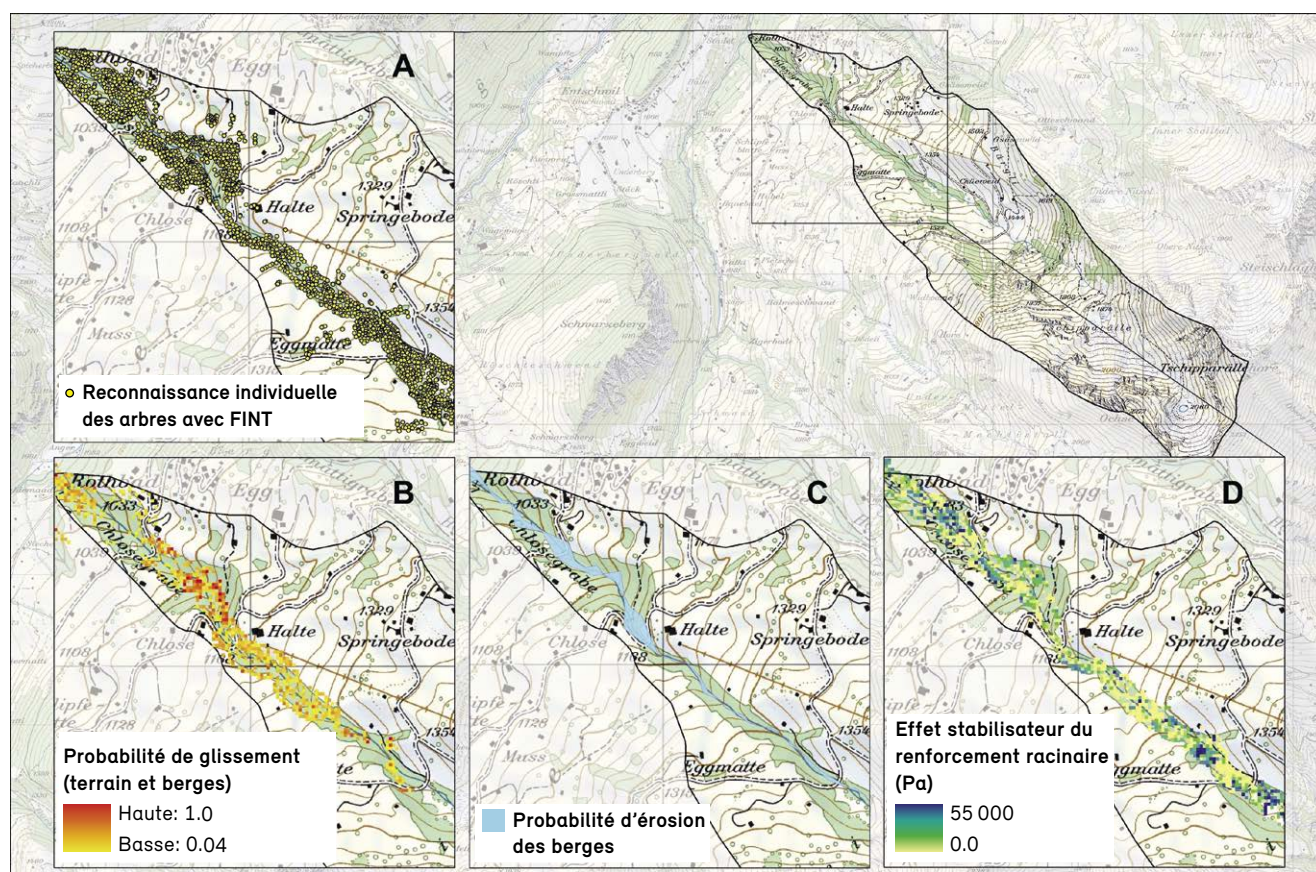
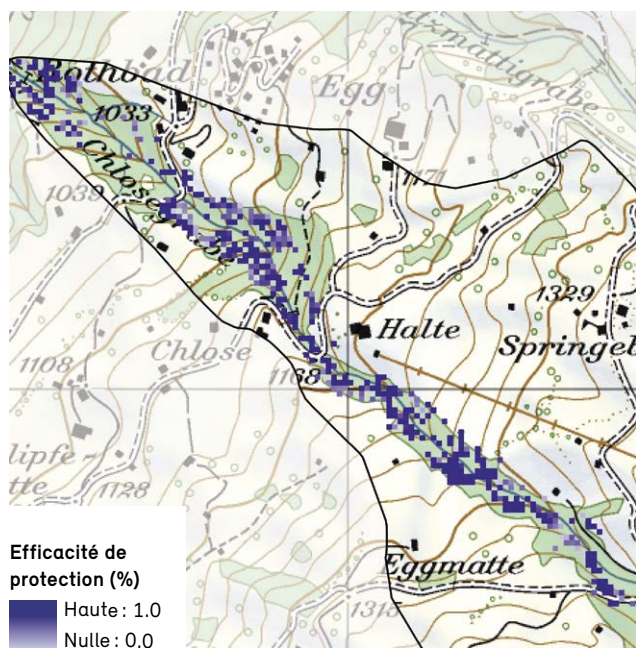


Fig. 13: Efficacité de l'action protectrice de la forêt dans son état actuel, à Rothbad (BE)



Fond cartographique : PK25, swisstopo

de glissement qui est modélisée en tenant compte de l'état actuel ou idéal de la forêt et la probabilité de glissement qui est modélisée sans tenir compte de la forêt (Fig. 13). Plus l'efficacité est élevée, plus il est possible de réduire la probabilité de glissement à l'aide de mesures sylvicoles (autrement dit, plus le potentiel de protection est élevé). Si les valeurs sont basses, cela signifie que l'action protectrice de la forêt est déjà importante et que son efficacité ne sera que très légèrement augmentée par des mesures sylvicoles. En d'autres termes : si la différence entre les deux modélisations est élevée, l'«amélioration» de l'état de la forêt grâce à des mesures sylvicoles peut avoir une grande influence sur la prédisposition des processus d'apport, étant admis que la probabilité de glissement est nettement inférieure dans un contexte de forêt idéale que dans un contexte sans forêt. Le fait de prendre pour hypothèse un profil forestier idéal permet de visualiser les endroits où l'action protectrice de la forêt peut être améliorée à l'aide de mesures sylvicoles ciblées. Dans *SlideforMAP*, l'état idéal de la forêt a été défini de sorte que le renforcement du sol sous l'action des racines équivaut à 5 kilopascals (kPa). Cette valeur est spécifique aux essences d'arbre considérées et varie en conséquence.

1.4.2 Estimation du potentiel de bois flottant par les modèles *SlideforMAP* et *BankforMAP*

Comme les deux approches SIG (points 1.2 et 1.3), les modèles *Slide/BankforMAP* calculent le potentiel de bois flottant dans un bassin versant pour trois scénarios différents (épisode hypothétique de précipitations ayant une périodicité de 30, 100 et 300 ans : SH «30» | SH₁₀₀ | SH «300»). Ils superposent les surfaces modélisées (avec leurs probabilités d'érosion latérale et de glissement de berge et de terrain) et la position des arbres (avec le volume d'arbres estimé) pour déterminer l'apport potentiel de bois flottant par les processus d'apport considérés. Puisque le modèle *SlideforMAP* ne calcule pas la distance de propagation des masses en mouvement modélisées, seuls sont pris en considération les arbres situés à l'intérieur des surfaces de glissement et à moins de 50 m du chenal. L'estimation du potentiel de bois flottant peut être affinée grâce à la probabilité modélisée des processus d'apport. Les probabilités d'occurrence calculées peuvent alors servir de facteurs de correction pour estimer V_{est} à partir de V_{pot} .

Les modèles *Slide/BankforMAP* requièrent les données et les paramètres d'entrée suivants : un modèle numérique de terrain (MNT), un modèle numérique de surface (MNS), une estimation de l'intensité et de la durée des précipitations (d'après HADES) et une estimation du type de sol (cohésion, angle de frottement). Le temps nécessaire à la modélisation dépend de la taille du bassin versant considéré. L'hétérogénéité des propriétés du sol et la distribution des pluies dans l'espace et dans le temps sont la cause des incertitudes les plus grandes.

Les modèles *Slide/BankforMAP* permettent aux acteurs de la pratique d'estimer rapidement les processus d'apport et leur probabilité d'occurrence en tenant compte de la végétation, sans avoir besoin d'une multitude de paramètres d'entrée. L'estimation du type de sol est la seule étape pouvant prendre du temps. S'agissant des bassins versants de petite à moyenne taille, les modèles *Slide/BankforMAP* permettent a) d'estimer le potentiel et la charge de bois flottant et b) de représenter dans l'espace l'efficacité de l'action protectrice de la forêt. Aux endroits où la probabilité d'apport est élevée et où l'efficacité peut être améliorée, il convient d'envisager la mise en œuvre de mesures sylvicoles contribuant à mettre la forêt dans

un état garantissant la meilleure action protectrice possible.

Une version de *SlideforMAP* qui ne fait pas référence à un bassin versant spécifique est mise à la disposition des praticiens sur le site www.ecorisq.org. L'outil *SlideforNET* (disponible sur Internet) estime la stabilité des versants pour le secteur considéré en tenant compte de l'état actuel de la forêt. Dès que la validation du modèle sera terminée, il est également prévu de mettre à disposition sur la plateforme ecorisQ une version de *BankforMAP* ne faisant pas référence à un bassin versant spécifique (nommée *BankforNET*).

1.5 Formules d'estimation empiriques

Pour estimer la charge de bois flottant, il existe une méthode simple et rapide qui consiste à utiliser des formules d'estimation empiriques, comme celles développées par Rickenmann (1997) et par Uchiogi et al. (1996). Dans la pratique, ces équations sont fréquemment utilisées pour déterminer l'ordre de grandeur de la quantité de bois flottant potentiellement transportée en cas de crue. Le problème avec les formules existantes, c'est qu'elles se fondent sur des données de référence relativement peu fournies, ce qui limite leur capacité prédictive.

Une banque de données richement documentée a pu être constituée dans le cadre du projet de recherche *Wood-Flow*. Elle répertorie des quantités de bois flottant apportées et transportées et d'autres paramètres pertinents concernant les bassins versants et les événements de crue s'y rapportant. Les indications sur le bois flottant proviennent de diverses sources d'information (Steeb et al., 2019b), notamment de formulaires StorMe, d'analyses d'événement, de données de télédétection, de publications scientifiques et de données relevées dans le cadre du projet (analyses SIG, relevés de terrain, etc.). Au total, cette banque comprend 210 jeux de données, qui se réfèrent pour l'essentiel à des crues survenues en Suisse. Deux tiers des quantités de bois flottant documentées proviennent de dépôts ; le reste a été reconstitué à partir de surfaces d'apport. Toutes les indications sur les quantités de bois flottant ont été uniformisées en vue de leur analyse et converties en mètres cubes, en s'ins-

pirant de Lange et Bezzola (2006) pour la conversion du volume foisonné en volume plein. De manière générale, la conversion s'est basée sur le facteur de masse $\alpha = 3.3$. Un facteur de masse plus petit ($\alpha = 1.4$) a été appliqué aux dépôts de bois flottant provenant de lacs (p. ex. radeaux), au motif qu'il faut s'attendre à un compactage plus dense, à savoir un volume de pores plus petit. Avec 64 entrées, la crue d'août 2005 est la plus fortement représentée dans la banque de données. Les bassins versants des cours d'eau étudiés se situent principalement dans l'espace alpin et préalpin, et sont donc en majorité des rivières de montagne et des torrents. La banque de données du projet a permis de tester et de perfectionner plusieurs approches empiriques existantes et de mettre au jour de nouvelles corrélations. Elle aide à répondre aux questions de recherche suivantes :

- À quelle quantité de bois flottant (en m^3) faut-il s'attendre pendant une crue dans un bassin versant donné ?
- Quelles variables de contrôle permettent d'estimer la charge de bois flottant ?

1.5.1 Variables de contrôle pour la quantification de la charge de bois flottant

Les variables de contrôle permettant d'estimer la charge de bois flottant ont été réparties en deux groupes : les caractéristiques du bassin versant et les facteurs liés à l'événement (Fig. 14). La liste présentée ci-dessous ne prétend pas être exhaustive ; elle contient les variables qui ont pu être reconstituées de manière fiable à partir des analyses d'événement, l'intention de départ étant de déterminer et d'évaluer toutes les variables de contrôle de la manière la plus complète possible et pour chaque entrée de la banque de données.

Ces variables se prêtent différemment bien à l'estimation prédictive de la charge de bois flottant. La matrice de corrélation (Fig. 15) donne un premier aperçu de l'influence des différents paramètres sur la présence de bois flottant ($r = \pm 1$, indiquant une corrélation parfaite ; plus r s'approche de 0, plus la relation statistique est faible). Pour la plupart des variables, on constate que la corrélation positive avec la quantité de bois flottant est significative ($p \leq 0.05$), moyenne ou élevée. On peut également déduire de la matrice que les variables de contrôle ne sont pas indépendantes les unes des autres et qu'elles sont parfois

Fig. 14: Schéma conceptuel des variables de contrôle ayant une influence sur la mobilisation du bois flottant

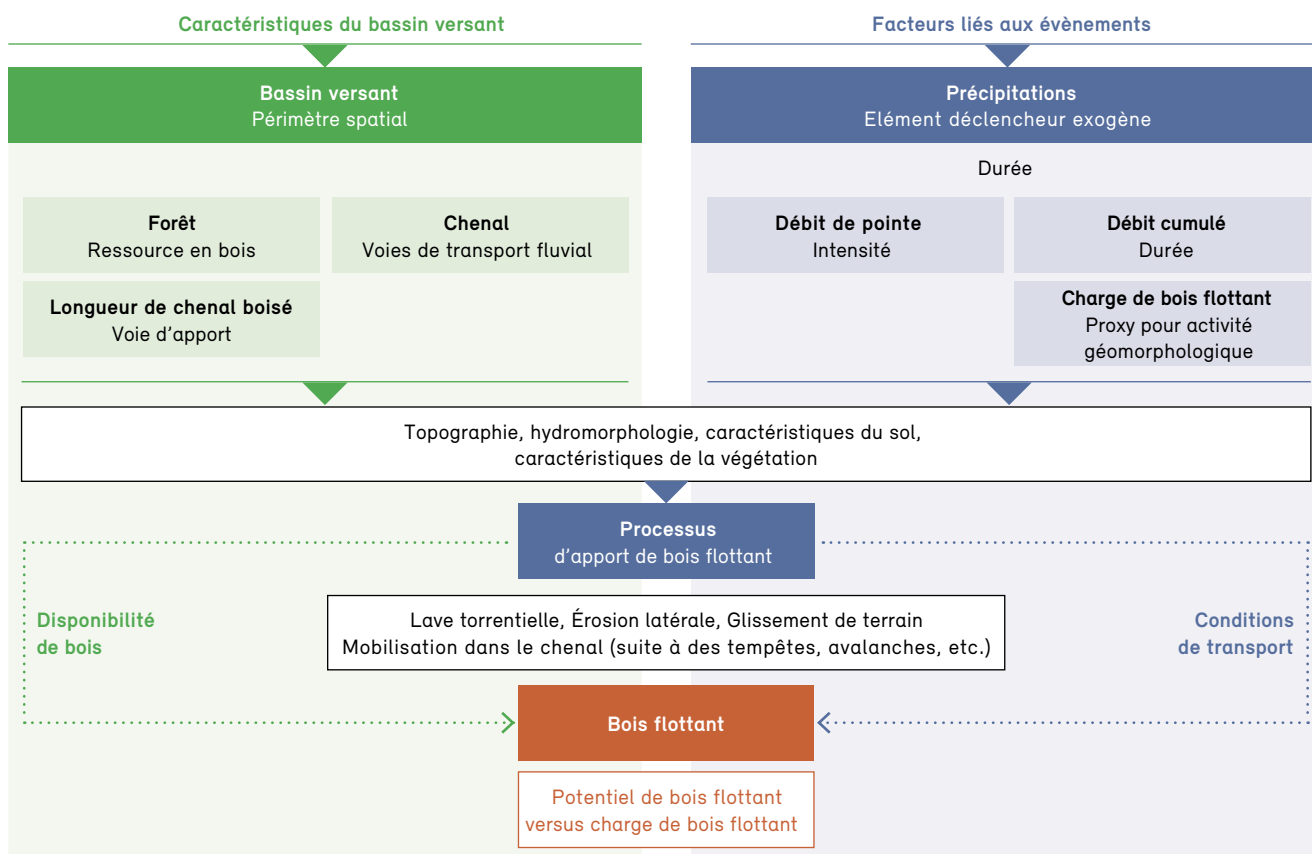


Fig. 15: Matrice de corrélation de Spearman pour les paramètres considérés

Les chiffres indiquent le coefficient de corrélation. Les valeurs significatives ($p \leq 0.05$) sont en couleur.

		V_{obs}	E	L	L_w	W	M	Q_{max}	Q_{spez}	V_w	F	P_h	P_{mm}	P_{vol}
V_{obs}	charge de bois flottant effectivement transportée lors d'une crue (m^3).....	V_{obs}												
E	superficie du bassin versant (km^2).....	E	0.66											
L	longueur du chenal (km).....	L	0.48	0.87										
L_w	longueur de chenal boisée (km).....	L_w	0.48	0.77	0.95									
W	surface forestière (km^2).....	W	0.59	0.95	0.87	0.85								
M	nombre de Melton (-).....	M	-0.41	-0.87	-0.84	-0.81	-0.87							
Q_{max}	débit de pointe ($m^3 s^{-1}$).....	Q_{max}	0.64	0.81	0.61	0.6	0.83	-0.81						
Q_{spez}	débit spécifique ($m^3 s^{-1} km^{-2}$).....	Q_{spez}	-0.43	-0.82	-0.66	-0.5	-0.72	0.58	-0.33					
V_w	volume (d'eau) écoulé (m^3).....	V_w	0.63	0.92	0.83	0.73	0.9	-0.8	0.88	-0.73				
F	charge sédimentaire (m^3).....	F	0.64	0.54	0.29	0.23	0.42	-0.3	0.47	-0.32	0.59			
P_h	durée des précipitations (h).....	P_h	0.01	0.08	-0.03	-0.15	-0.03	0.18	0.13	-0.22	0.24	0.15		
P_{mm}	quantité moyenne de précipitations (mm).....	P_{mm}	0.27	0.06	0.03	0.05	0.08	0.04	0.13	0	0.31	0.34	0.5	
P_{vol}	volume total de précipitations (m^3).....	P_{vol}	0.56	0.93	0.88	0.79	0.89	-0.81	0.62	-0.83	0.93	0.75	0.19	0.25

même en étroite corrélation. Étant donné que le périmètre d'étude détermine les conditions topographiques (la surface forestière et le chenal sont d'autant plus grands que le périmètre est vaste) et influence fortement les conditions hydrologiques (plus le périmètre est vaste, plus le débit est élevé de manière générale), la superficie du bassin versant peut être considérée comme la variable de contrôle dominante.

1.5.2 Recommandations relatives à l'utilisation des formules

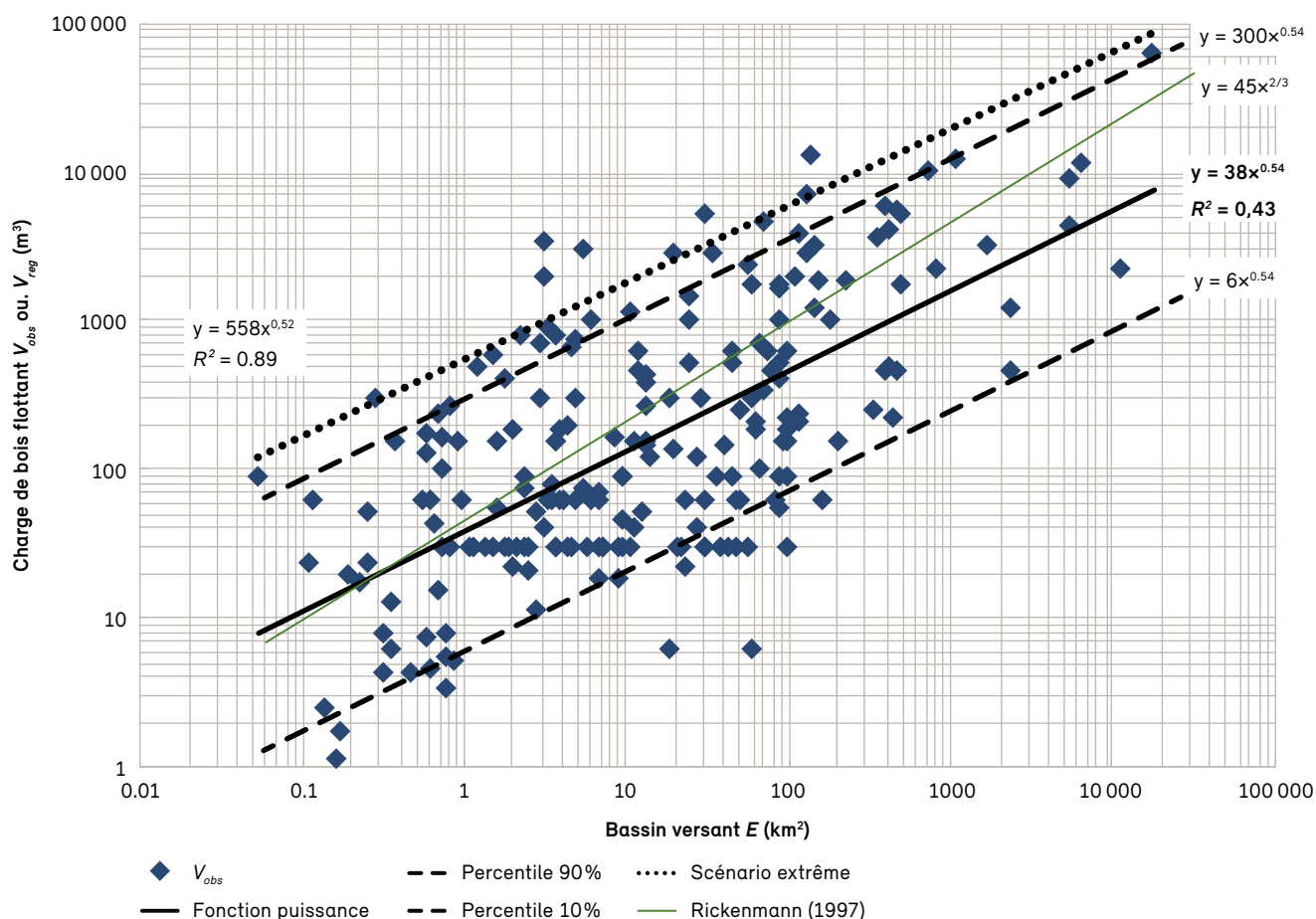
Diverses méthodes statistiques ont été utilisées pour établir les dix meilleures formules d'estimation permettant de quantifier la charge de bois flottant. Comme la plupart des données présentent une importante dispersion, il a fallu utiliser des fonctions puissance pour pouvoir les rappro-

cher. Chaque fois que possible, les nouvelles régressions ainsi calculées ont été comparées avec les anciennes formules d'estimation (p.ex. de Rickenmann, 1997) afin de vérifier leur validité dans la perspective d'une banque de données plus volumineuse. Une fourchette allant des percentiles 10 % à 90 % a été spécifiée pour chaque fonction, et le scénario extrême (« worst case ») a été envisagé en vue de fournir une estimation prudente au sens de la prévention des dangers naturels (Fig. 16). La méthode et ses résultats sont décrits en détail dans Steeb et al. (2019b).

Comme le montre la Fig. 16, la charge de bois flottant connaît des effets d'échelle spatiale. De manière générale, la quantité de bois flottant absolue augmente avec la taille du bassin versant. L'analyse de la charge de bois

Fig. 16: Charge de bois flottant en fonction de la superficie du bassin versant E

Rapport entre la charge de bois flottant et la superficie du bassin versant E , d'après les différentes équations de régression V_{reg} définies.



flottant spécifique (V_{obs}/E) montre que les torrents jusqu'à 25 km² sont les plus gros pourvoyeurs de bois flottant. Tandis qu'une grande partie des charges de bois flottant représentées sur la Fig. 16 ont une périodicité d'environ 50 à 150 ans (précipitations et/ou débit de pointe), les quantités de bois flottant inférieures à 50 m³ ont souvent une périodicité de moins de 50 ans.

Les dix formules d'estimation de la charge de bois flottant qui ont été développées dans le cadre du projet *WoodFlow* sont présentées dans le Tab. 4. Sur la base d'une analyse de décision multicritères (Steeb et al., 2019b), quatre critères ont été utilisés pour apprécier et noter leur qualité

d'ajustement : 1) le nombre n de données utilisées pour la déduction des formules, 2) le coefficient de détermination R^2 , 3) le rapport factoriel des équations à percentile $\frac{P_{90}}{P_{10}}$ (indicateur du domaine de dispersion des formules, pour un même exposant), 4) le pourcentage des données qui se situent à l'intérieur d'un ordre de grandeur si l'on compare la quantité de bois flottant modélisée et la quantité observée ($0.33 \leq \frac{V_{reg}}{V_{obs}} \leq 3.33$). La qualité d'ajustement des équations 1.3 à 1.12 est signalée par des astérisques, la meilleure note étant symbolisée par trois astérisques (***).

Tab. 4 : Vue d'ensemble des fourchettes et des scénarios extrêmes pour chaque formule d'estimation, y compris les critères de notation
Plus la couleur d'une cellule est foncée, plus la qualité d'ajustement de la formule est élevée.

Équation				Facteur	Exposant	η	R^2	$\frac{P_{90}}{P_{10}}$	$\frac{V_{reg}}{V_{obs}}$
***	(1.3)	$V_{reg} = 38 E^{0.54}$	Percentile 10 %	6	0.54	209	0.43	50	50
			Percentile 90 %	300	0.54				
			Scénario extrême	558	0.52				
**	(1.4)	$V_{reg} = 77 W^{0.56}$	Percentile 10 %	13	0.56	179	0.35	55	52
			Percentile 90 %	720	0.56				
			Scénario extrême	1460	0.46				
*	(1.5)	$V_{reg} = 49 L_w^{0.5}$	Percentile 10 %	7	0.50	175	0.24	71	44
			Percentile 90 %	500	0.50				
			Scénario extrême	925	0.50				
*	(1.6)	$V_{reg} = 40 L^{0.48}$	Percentile 10 %	5.5	0.48	177	0.23	73	41
			Percentile 90 %	400	0.48				
			Scénario extrême	860	0.44				
***	(1.7)	$V_{reg} = 0.2 F^{0.65}$	Percentile 10 %	0.04	0.65	196	0.45	35	56
			Percentile 90 %	1.4	0.65				
			Scénario extrême	1.4	0.7				
*	(1.8)	$V_{reg} = 0.3 V_w^{0.47}$	Percentile 10 %	0.04	0.47	167	0.34	65	50
			Percentile 90 %	2.6	0.47				
			Scénario extrême	6.2	0.45				
***	(1.9)	$V_{reg} = 5.7 Q_{max}^{0.91}$	Percentile 10 %	0.65	0.91	77	0.42	46	58
			Percentile 90 %	30	0.91				
			Scénario extrême	115	0.72				
**	(1.10)	$V_{reg} = 0.3 P_{vol}^{0.46}$	Percentile 10 %	0.04	0.46	164	0.32	55	51
			Percentile 90 %	2.2	0.46				
			Scénario extrême	8	0.41				
**	(1.11)	$V_{reg} = 0.4 Q_{max}^{0.46} V_w^{0.33}$	Percentile 10 %	0.3	0.35 0.25	166	0.32	47	51
			Percentile 90 %	14	0.35 0.25				
			Scénario extrême	87	0.26 0.19				
***	(1.12)	$V_{reg} = 0.2 E^{0.23} F^{0.6}$	Percentile 10 %	0.06	0.22 0.56	196	0.49	30	56
			Percentile 90 %	1.8	0.22 0.56				
			Scénario extrême	1.7	0.23 0.61				

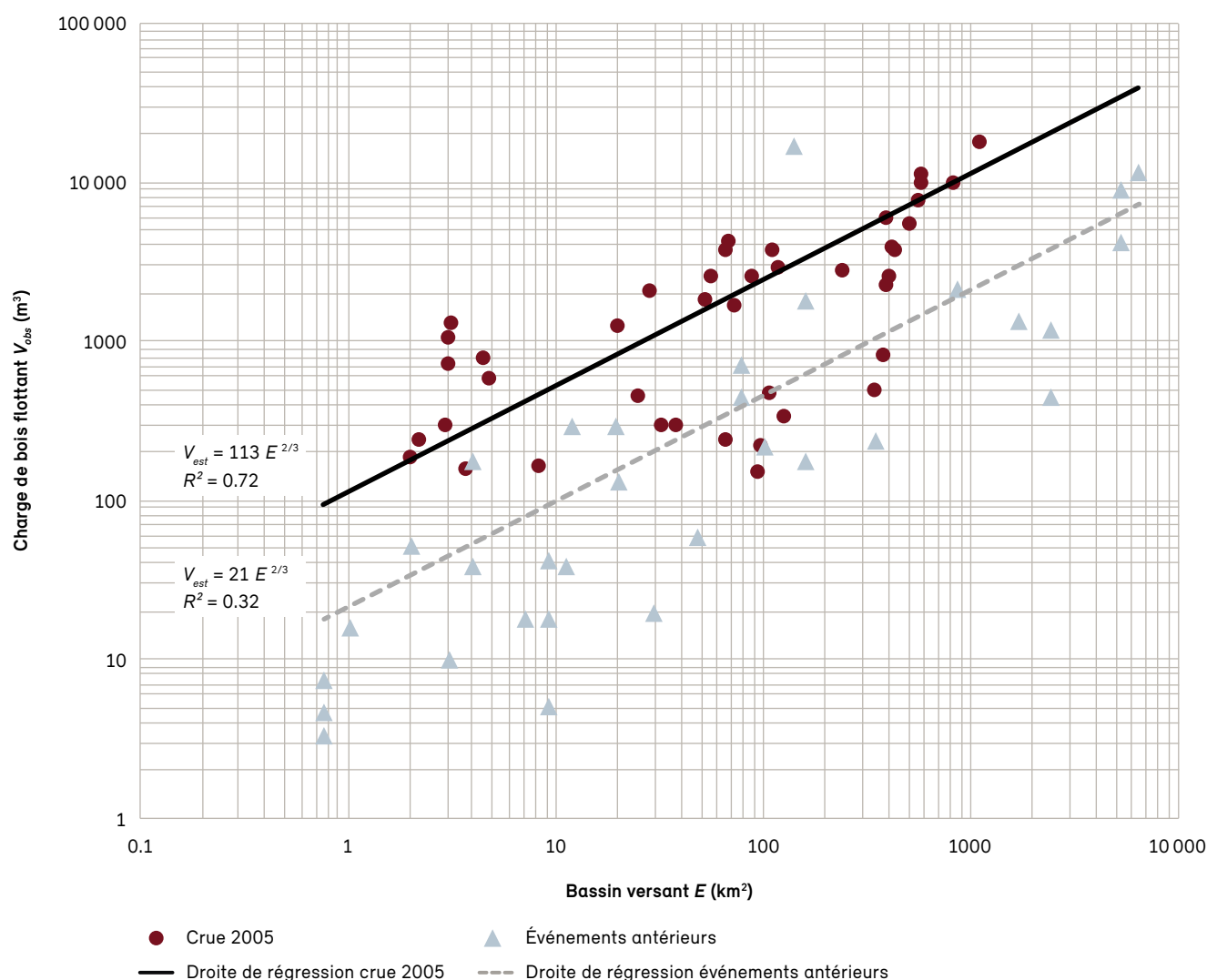
Le rapport V_{reg}/V_{obs} montre que, malgré la grande dispersion des données, près de 50 % des ratios se situent dans le même ordre de grandeur, et ce pour l'ensemble des dix formules. Les meilleures prévisions ont été obtenues pour des quantités de bois flottant d'environ 50 à 500 m³, la quantité modélisée étant surévaluée ou sous-évaluée d'un facteur de 2 au maximum. Les quantités plus petites (<50 m³) ont tendance à être surévaluées et les quantités plus grandes (>500 m³) à être sous-évaluées. De manière générale, ces tendances valent pour les dix équations de régression. Afin que l'estimation de la charge de bois flottant tienne compte de ces incertitudes, il a fallu quanti-

fier la fourchette des volumes de bois flottant possibles en intégrant dans les formules correspondantes les équations à percentile et le scénario extrême.

Les dix formules donnent à l'utilisateur une possibilité de choix lui permettant d'opter pour l'équation la mieux adaptée aux données dont il dispose. Les équations les plus faciles à utiliser dans la pratique sont les équations basées sur les caractéristiques du bassin versant (1.3 à 1.6), car les paramètres correspondants peuvent être déterminés d'une manière relativement fiable et rapide à l'aide d'un système d'information géographique (se référer

Fig. 17 : Influence de la durée de la crue sur la charge de bois flottant

Charges de bois flottant de la crue d'août 2005 dans une sélection de bassins versants (points rouges) et comparaison avec des événements antérieurs (points gris; adapté d'après Steeb et al., 2017).



à la méthode décrite par Steeb et al., 2019b). Dans le cas des équations spécifiques à un événement (1.7 à 1.12), les paramètres correspondants doivent être mesurés et/ou estimés à partir d'analyses d'événement ou à partir de la modélisation hydrologique du périmètre étudié. L'estimation des variables F , Q_{max} , V_w , P_{vol} introduit cependant une incertitude supplémentaire dans la quantification de la charge de bois flottant.

1.5.3 Aide à l'interprétation des formules

Les recherches empiriques ont montré que la charge de bois flottant est dépendante de plusieurs facteurs. De façon générale, les équations empiriques se caractérisent par une dispersion importante, raison pour laquelle l'estimation quantitative de la charge de bois flottant est souvent empreinte d'incertitude. Selon une étude sur la crue d'août 2005, les charges de bois flottant liées à cet événement ont été presque cinq fois supérieures à celles d'événements antérieurs ayant une période de retour comparable (Fig. 17 ; Steeb et al., 2017 ; Steeb et al., 2019b). Cela montre que la périodicité d'une crue fondée uniquement sur le débit de pointe n'est pas totalement déterminante : la durée de la crue joue elle aussi un rôle important. La corrélation de ces deux paramètres est intégrée dans l'équation 1.11. Elle est connue pour agir également sur le charriage fluvial et sur la formation de laves torrentielles (formation conditionnée par l'intensité et la durée des précipitations). Lors de la crue de 2005, les précipitations ont duré trois jours, si bien que les débits sont restés élevés pendant une longue période de temps, occasionnant des charges de bois flottant d'une importance exceptionnelle. Étant donné que tous les processus importants de mobilisation du bois flottant sont fortement dépendants de l'activité géomorphologique et des processus de transport de sédiments, il n'est pas étonnant que les équations de régression 1.7 et 1.12 fournissent parfois les meilleures évaluations statistiques (Tab. 4).

1.6 Action de la végétation et typage des cours d'eau

Parce qu'il est difficile de quantifier l'influence de la végétation (ligneuse) sur la stabilité des berges et des versants, les praticiens ont besoin qu'on mette à leur disposition une méthode simple basée sur des données quantitatives, qui

leur permette d'évaluer cette influence sur le terrain de manière approximative et objective. Les défis posés à une telle méthode sont les suivants : évaluer dans quels secteurs d'un chenal la végétation ligneuse a une action positive sur les processus d'apport de bois flottant (autrement dit, exerce une action protectrice) et dans quels secteurs elle peut contribuer à l'apport de bois flottant (autrement dit, exerce une action négative).

Le typage présenté ici pour les tronçons de cours d'eau et les pentes situées en bordure se réfère à des paramètres qu'il est facile de déterminer sur le terrain. Le choix de ces paramètres et de leurs seuils s'inspire de données bibliographiques, de résultats de recherches récentes et d'expériences tirées de la pratique (Gasser et al., 2019). Les matrices d'évaluation proposées sont conçues en priorité pour les applications suivantes :

- évaluation de l'action des ligneux présents le long des cours d'eau et sur les pentes situées en bordure : le typage aide à déterminer si les ligneux présents dans un tronçon donné ont une action positive (stabilisatrice) ou s'ils sont susceptibles de contribuer à la production de bois flottant ;
- ciblage plus précis des interventions sylvicoles : le typage peut aider à réaliser les bonnes mesures sylvicoles aux bons endroits, en vue d'optimiser l'effet protecteur de la forêt.

Complémentaires aux approches modélisant le potentiel et la charge de bois flottant (points 1.1 à 1.5), ces applications peuvent être mises en œuvre directement sur le terrain. Elles permettent entre autres de définir par déduction le besoin d'intervention dans les différents peuplements. À titre d'exemple, le typage peut être utilisé pour vérifier sur le terrain les processus d'apport modélisés ou pour estimer l'état actuel de la végétation ligneuse et son influence sur les processus d'apport.

1.6.1 Processus déterminants pour le typage des cours d'eau et l'action des ligneux

Le typage établit une distinction entre les processus hydrauliques (érosion hydraulique des berges ; zone 1 sur la Fig. 18) et les processus gravitaires (glissement de berge et glissement de terrain ; zones 2 et 3 sur la Fig. 18). D'autres processus d'apport potentiellement influencés

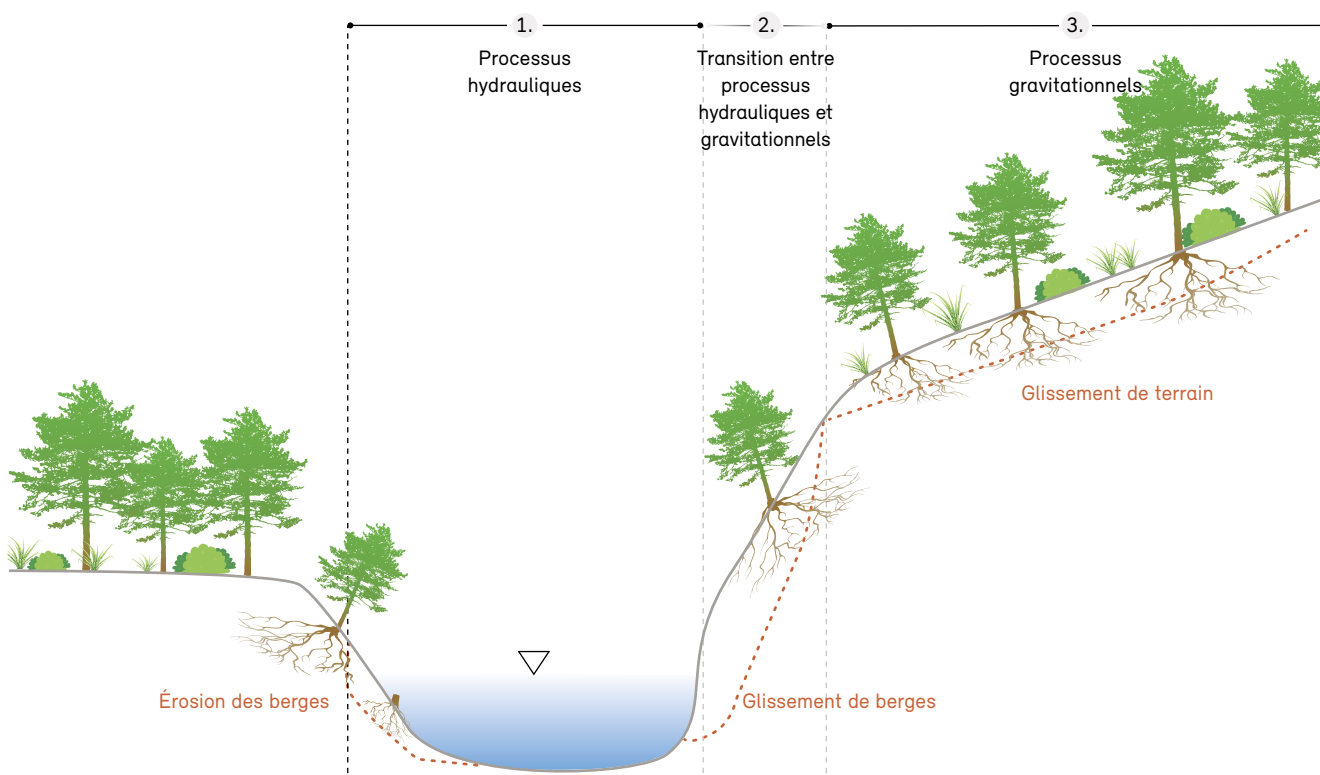
par des facteurs biotiques (p. ex. insectes, champignons, castors) ou abiotiques (p. ex. tempêtes, incendies) ne sont pas pris en compte dans le typage, car a) ces facteurs sont peu sensibles aux mesures sylvicoles et b) ces processus jouent un rôle mineur dans l'apport potentiel de bois flottant. Les trois facteurs considérés comme déterminants pour la mobilisation du bois flottant sont les suivants : 1) la nature du processus d'écoulement (écoulement fluvial ou lave torrentielle), 2) l'intensité du processus d'écoulement (p. ex. contrainte d'entraînement ou puissance d'écoulement) et 3) les dimensions du bois flottant mobilisable par rapport à la largeur du chenal et à la profondeur d'écoulement.

La végétation ligneuse consiste principalement à stabiliser les versants, les talus et les berges sous l'action des racines (Fig. 19). La morphologie des systèmes racinaires (traçants, fasciculés ou pivotants) et leur action stabilisatrice sont fonction des essences et de la station. De plus, l'influence de la végétation ligneuse sur la stabilité des

berges et des versants varie selon le processus d'apport considéré. En fonction de la magnitude du processus, du mélange d'essences, de la densité de végétation et de la station, l'influence des ligneux peut ainsi être :

- (1) **grande** : l'action positive de la végétation est prédominante ; les possibles effets négatifs (p. ex. apport de bois flottant) ne sont pas significatifs ;
- (2) **variable** : l'action de la végétation dépend de l'état de la forêt. Elle est positive si la forêt se trouve dans un état idéal, et elle peut être négative si l'état de la forêt n'est pas suffisamment bon ;
- (3) **petite** : la végétation dans son état idéal a une action stabilisatrice modérée et des effets négatifs peuvent prédominer (p. ex. fourniture potentielle de bois flottant).

Fig. 18 : Distinction entre les processus d'apport hydrauliques et gravitaires



1.6.2 Comment procéder au typage des cours d'eau

Le typage des cours d'eau se déroule en trois étapes : (1) évaluation de la mobilisation potentielle de bois flottant sur la base des propriétés du chenal et du bois flottant, (2) évaluation de l'action de la végétation sur l'érosion des berges et (3) évaluation de l'action de la végétation sur les glissements de berge et de terrain.

1. Évaluation de la mobilisation potentielle de bois flottant sur la base des propriétés du chenal et du bois flottant : il est admis que les largeurs de chenal inférieures à 2 m n'ont pas la capacité de mobiliser du bois flottant. Cette hypothèse se fonde sur la définition même du bois flottant (morceaux d'une longueur supérieure à 1 m) et sur des observations émanant de la pratique. Sans compter que les ligneux présents dans les chenaux de moins de 2 m sujets au processus de lave torrentielle ont un effet stabilisateur et ralentisseur. En règle générale, un chenal dont la largeur est égale ou supérieure à 2 m et dont la déclivité est égale ou supérieure à 15° est sujet au processus de lave torrentielle (Haeberli et al., 1991 ; voir aussi la Fig. 33 au point 2.1.2). Dans ce cas, l'action de stabilisation et de ralentissement exercée par les ligneux dépend de l'état de la végétation. La comparaison entre les dépôts

de bois flottant spécifiques et les largeurs de chenal (Ruiz-Villanueva et al., 2016c) montre par ailleurs que les dépôts les plus importants correspondent à des largeurs de chenal inférieures à 5 m (Fig. 38 au point 2.3). On peut donc en déduire que dans les chenaux entre 2 et 5 m de largeur, la mobilisation de bois flottant est limitée. Comme précisé plus loin (point 2.2.3), les morceaux de bois flottant dont la longueur est supérieure à la largeur du chenal sont en principe non mobilisables (cela concerne en particulier le transport fluvial ; dans le cas des laves torrentielles en revanche, même les gros morceaux de bois peuvent être mobilisés).

2. Évaluation de l'action de la végétation sur l'érosion des berges : l'érosion directe due au courant peut être déterminée à partir de la contrainte d'entraînement ou de la puissance d'écoulement, la littérature spécialisée fournissant toutefois davantage d'informations quantitatives sur les valeurs critiques de la contrainte d'entraînement. L'érosion se produit lorsque la contrainte d'entraînement exercée par le courant dépasse une valeur limite. D'après les indications fournies par des ouvrages spécialisés (p.ex. Magilligan, 1992 ; Fischenich, 2001 ; Bloemer et al., 2015), la contrainte d'entraînement limite pour les berges boisées est comprise entre 50 et 300 Pa et varie forte-

Fig. 19 : Effet stabilisateur positif de la végétation dans le contexte des processus d'érosion

(A) Les racines stabilisent la berge en la protégeant contre l'érosion hydraulique (influence positive). (B) En fonction de son état, la végétation peut protéger le talus contre l'érosion en stabilisant les glissements.



ment en fonction des propriétés du matériau riverain (cohésion, angle de frottement, granulométrie, pression de l'eau interstitielle) et de la végétation (mélange d'essences d'arbres et densité). Cette fourchette a été retenue comme critère pour l'évaluation de l'influence de la végétation. Le concept de «géométrie hydraulique» (Leopold & Maddock, 1953) permet d'utiliser la largeur et la déclivité du chenal – deux paramètres faciles à relever sur le terrain – pour faire une estimation grossière de la contrainte d'entraînement critique (Fig. 20). S'agissant des processus hydrauliques, l'estimation doit intégrer en complément les propriétés morphologiques locales du chenal, ce afin de tenir compte par exemple de la présence de gros blocs et de bois dans le chenal pouvant dévier le courant. Dans le cas d'un chenal entre 15 et 30 m de largeur et en fonction de l'état de la forêt, les arbres peuvent avoir pour effet de stabiliser les berges en contribuant notablement à augmenter la valeur critique de la contrainte d'entraînement (p.ex. Tal et al., 2004). Les chenaux ayant une largeur supérieure à 30 m et une déclivité supérieure à 15 % ne sont pas des cas réalistes et se situent donc, sur la figure 20, dans une zone grise où l'influence de la végétation n'est pas définie.

3. Évaluation de l'action de la végétation sur les glissements de berge et de terrain: les racines des arbres peuvent stabiliser les berges en contribuant au ren-

forcement basal ou latéral du sol sur un demi-mètre de profondeur environ (p.ex. Schwarz et al., 2012; Schwarz et al., 2016). Si la surface de cisaillement potentielle ou la zone d'arrachement se situe à plus de 50 cm de profondeur, l'influence des ligneux est alors variable. Lorsque la déclivité du versant et la profondeur de la surface de cisaillement atteignent une certaine valeur limite, des glissements peuvent se produire en fonction du matériau et de la saturation en eau du sol, de l'état de la forêt et du mélange d'essences d'arbres. L'influence positive des ligneux est élevée dans les cas où la pente est comprise entre 20 et 35° environ (Fig. 21; Rickli & Graf, 2009; Schwarz et al., 2018). D'après Wynn et al. (2004), la présence d'arbres au pied d'une berge pentue réduit fortement le déclenchement d'un glissement de berge et la formation d'un affouillement. Pour toutes ces raisons, l'influence de la végétation peut être grande, variable ou petite en fonction de son état.

Pour résumer, le typage des cours d'eau suppose de relever sur le terrain la largeur et la déclivité du chenal ainsi que la déclivité des versants et d'estimer la profondeur de la surface de cisaillement (glissements de berge et de terrain). Il peut être réalisé directement sur le terrain pour apprécier l'influence de la végétation ligneuse sur les processus d'apport précités, pour un tronçon donné.

Fig. 20 : Niveaux d'influence de la végétation sur l'érosion des berges en fonction de la largeur et de la déclivité du chenal

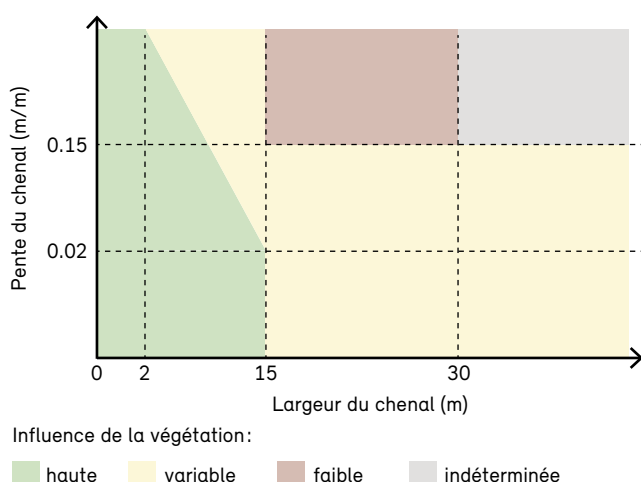
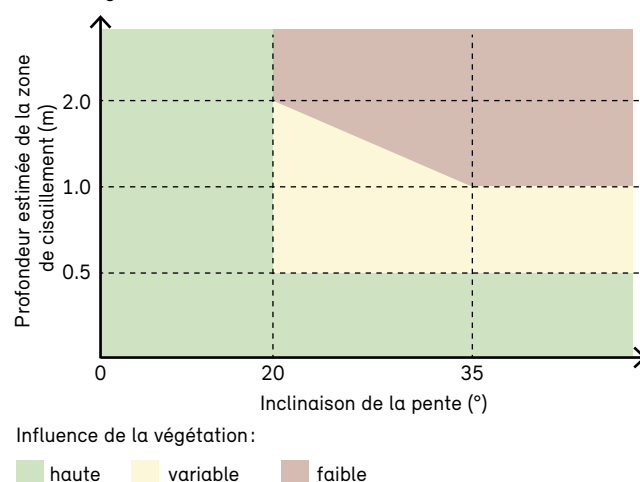


Fig. 21 : Niveaux d'influence de la végétation sur les glissements proches du chenal pouvant apporter du bois flottant, en fonction de la profondeur estimée de la surface de cisaillement et de la déclivité des berges et des versants



1.6.3 Mesures sylvicoles

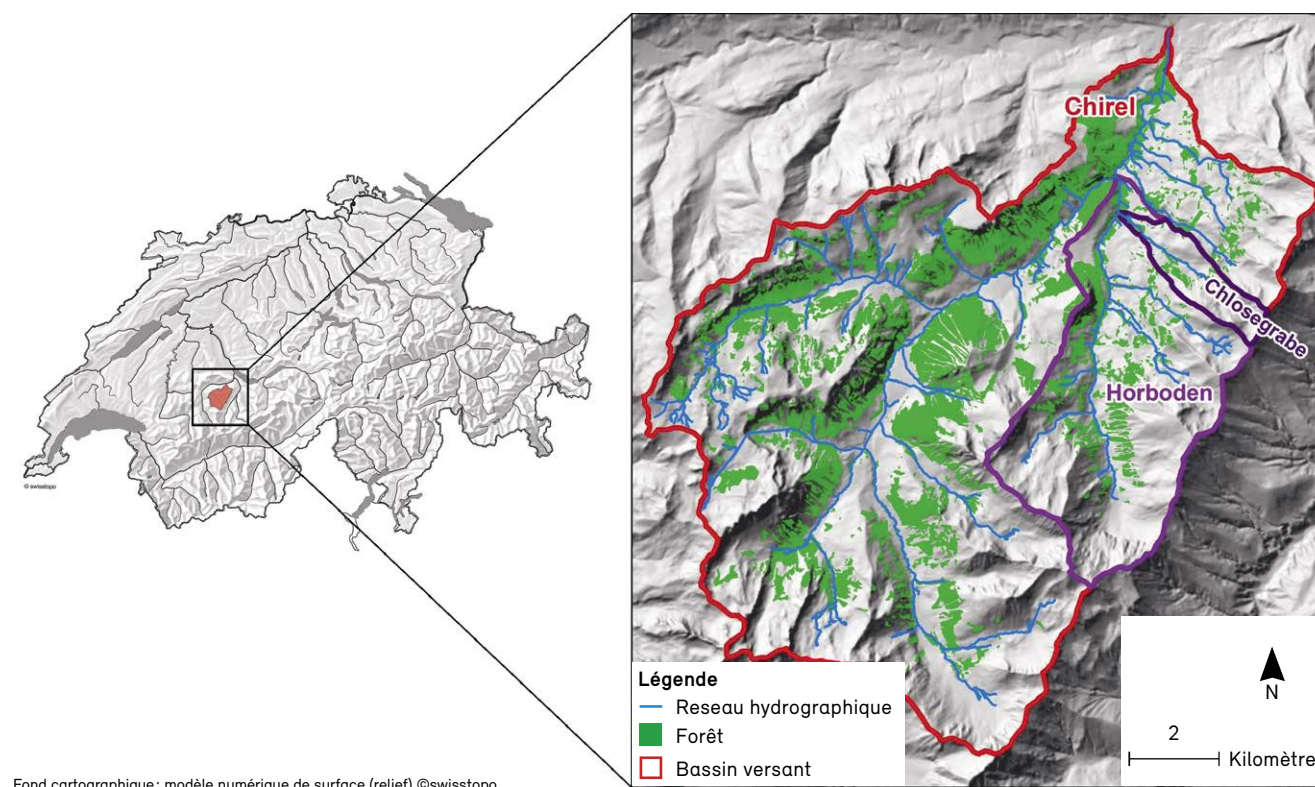
L'influence des ligneux varie selon le processus d'apport. Grâce au typage des cours d'eau, il est possible d'adapter localement les mesures sylvicoles au tronçon considéré. Si l'influence de la végétation dans un tronçon est jugée «grande», cela signifie que les effets positifs de la végétation sont déjà prédominants. Dans ce cas, il n'est pas utile de mettre en œuvre des mesures sylvicoles visant à réduire l'apport potentiel de bois flottant; mieux vaut exploiter des synergies avec d'autres fonctions forestières, pour autant que la forêt satisfasse aux exigences de la méthode NaiS (Frehner et al., 2005). Si le tronçon est classé dans la catégorie «influence variable», cela signifie que des mesures sylvicoles peuvent avoir un impact important sur la prédisposition des processus d'apport. Dans ce cas, les mesures doivent être pensées de manière à garantir la meilleure action protectrice possible, par analogie avec les exigences NaiS. Enfin, si l'influence de la végétation sur le tronçon est «petite», cela signifie que les effets négatifs des ligneux sont prédominants (apport potentiel de bois flottant). Il convient alors d'éliminer les

ligneux de façon ciblée, afin de réduire l'apport potentiel de bois flottant, et de fixer un diamètre d'arbre maximal acceptable. Le fait de promouvoir une végétation arbus-tive à proximité des berges peut également constituer un compromis satisfaisant et durable.

1.7 Exemple de cas de la Chirel (canton de Berne)

Au moyen d'une sélection d'exemples de cas et de calculs, les différentes méthodes proposées au chapitre 1 pour estimer le potentiel et la charge de bois flottant ont été comparées ci-après. La comparaison prend pour référence un périmètre correspondant à trois bassins versants (partiels) de la Chirel, dans l'Oberland bernois. Des périmètres supplémentaires ont également été modélisés pour la comparaison des deux approches SIG.

Fig. 22 : Carte synoptique de la Chirel avec les trois bassins versants (partiels) étudiés



1.7.1 Activité du bois flottant dans le bassin versant de la Chirel pendant la crue de 2005

Situés dans le bassin versant de la Kander (Fig. 22), la rivière de montagne Chirel et ses affluents se prêtent parfaitement bien à la comparaison des différentes approches présentées dans ce rapport. Pendant la crue d'août 2005, le secteur a été fortement touché par d'intenses précipitations qui ont généré des débits très élevés et une forte activité en termes de bois flottant. Cette crue du siècle a fait l'objet d'analyses détaillées (LLE Diemtigtal, 2006 ; Waldner et al., 2009), qui ont notamment permis d'étudier précisément la dynamique du bois flottant dans le bassin versant.

Du 20 au 22 août 2005, de vastes secteurs au nord des Alpes ont été exposés à d'importantes quantités de précipitations. Dans le bassin versant de la Chirel, il est tombé pendant cette période 150 à 170 mm de pluie (avec une intensité maximale de 8 mm/h). L'analyse statistique de l'événement a montré que le volume de précipitations sur une journée a alors atteint un nouveau record, avec une période de retour de 100 ans (le volume de précipitations sur plusieurs jours, pour sa part, avait déjà connu un niveau similaire en 1970). Le débit de pointe de la Chirel a atteint 100 m³/s (avec un débit spécifique de 0.77 m³/s/km²), provoquant une érosion latérale et un déplacement du chenal d'une ampleur encore rarement observée dans cette rivière. Les processus d'érosion ont été favorisés

par les conditions préexistantes et le déroulé de l'événement : les très fortes pluies sont tombées sur des sols déjà humides et ont déstabilisé des talus amplement sollicités par les débits de crue. Le phénomène a concerné plus particulièrement les affluents de la Chirel, qui ont par ailleurs subi les effets de plusieurs laves torrentielles et processus similaires. Compte tenu de la durée de l'événement, les affluents ont eu le temps d'être exposés alternativement à des processus d'érosion (érosion latérale et verticale) et à des processus de dépôt. Les fortes érosions latérales ont eu pour effet d'élargir considérablement le lit du cours d'eau. Par endroits, le fond du lit doit être aujourd'hui deux à trois fois plus large qu'avant l'événement. Le chenal principal de la Chirel a lui aussi subi une érosion latérale massive (déplacement dû à la formation de méandres et de ramifications). Près de 170 000 m³ de matériaux ont ainsi été charriés vers le cours inférieur de la Chirel, dont 70 000 m³ en provenance du cours supérieur et 30 000 m³ en provenance des affluents. Le reste (70 000 m³) a été mobilisé par l'érosion latérale dans les méandres et les ramifications. L'érosion des talus dans les affluents et celle des terrasses alluviales de gravier dans le cours principal ont eu pour effet de mobiliser d'importantes quantités de bois. Des quantités considérables de bois flottant ont ainsi été exportées du bassin versant (Tab. 5).

Tab. 5 : Bilan de bois flottant dans le bassin versant de la Chirel
Crue d'août 2005.

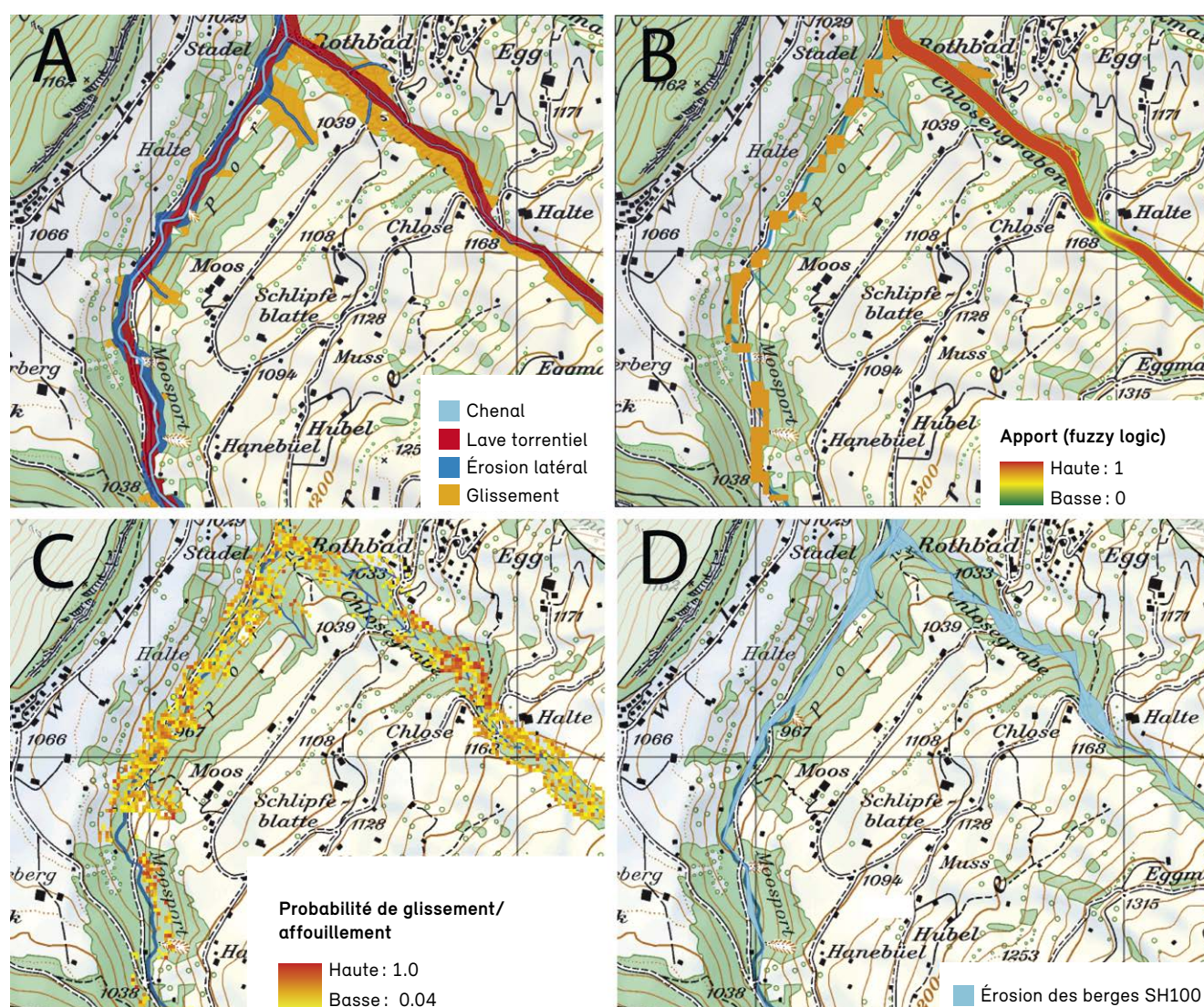
Ruisseau	Surface d'apport (ha)	Volume de bois sur pied (m ³ /ha)	Apport de bois flottant (m ³)	Dépôt de bois flottant (m ³)	Bois retiré (%)	Retrait de bois flottant (m ³)
Goldbach	2.92	304	888	710	20	178
Rütigrabe	1.22	277	339	271	20	68
Chratzmattigrabe	2.55	294	748	374	50	374
Chlosegrabe	2.76	196	542	325	40	217
Pletschbächli	0.74	235	174	122	30	52
Schreindgrabe	0.63	202	126	101	20	25
Total ruisseaux latéraux	10.81	261	2 817	1 903	32	914
Fildrich	5.63	300	1 689	500	70	1 189
Chirel jusqu'à Horboden	7.04	321	2 261	1 900	16	361
Horboden jusqu'à Oey	9.33	319	2 975	665	78	2 310
Total bassin versant	32.81	297	9 741	4 968	49	4 773

Afin de pouvoir comparer les méthodes d'estimation présentées au chapitre 1, il a fallu reconstituer en détail le bilan de bois flottant dans le bassin versant de la Chirel pendant la crue d'août 2005. Les charges de bois flottant documentées sont répertoriées dans le Tab. 5. La reconstitution du bilan s'est fondée sur l'analyse d'événement réalisée sur mandat du canton de Berne (LLE Diemtigtal, 2006) et sur des relevés LiDAR effectués par le canton (balayages laser réalisés en décembre 2005 et janvier 2006). Parce qu'il est apparu après-coup que les

charges de bois flottant estimées dans l'analyse d'événement étaient nettement surévaluées pour ce qui concerne les affluents (en raison d'une erreur de conversion), il a fallu recalculer le bilan de bois flottant de la Chirel à partir des relevés LiDAR et de la carte du volume de bois sur pied (point 1.1.2).

Fig. 23 : Comparaison des trois approches de modélisation du potentiel de bois flottant

Localisation : confluence du Chlosegraben avec la Chirel, à Rothbad (BE) : (A) approche empirique SIG, (B) approche SIG par logique floue, (C) SlideforMAP et (D) BankforMAP.



Trois bassins versants (partiels) de taille différente ont été choisis pour l'étude de cas de la Chirel (Fig. 22) :

- Chlosegrabe : affluent (3.1 km²)
- Horboden : cours de la Chirel jusqu'à Horboden (28.6 km², y compris les affluents Chlosegrabe, Pletschbächli et Schreiendgrabe)
- Chirel : totalité du bassin versant (129 km²)

1.7.2 Comparaison des approches de modélisation

Les résultats des trois approches de modélisation (AES, ASLF et *Slide/BankforMAP*) sont regroupés dans un tableau à l'annexe A4. Pour chacun des trois scénarios (SH «30» | SH₁₀₀ | SH «300») et chacun des périmètres étudiés (Chlosegrabe, Horboden, Chirel), le tableau indique les charges V_{pot} et V_{est} et les surfaces y relatives (F_{pot}). Les trois approches se distinguent fondamentalement par leur façon (i) de délimiter les surfaces d'apport potentiel, (ii) de quantifier le potentiel de bois flottant et (iii) d'estimer la charge de bois flottant. Ces différences sont présentées ci-après.

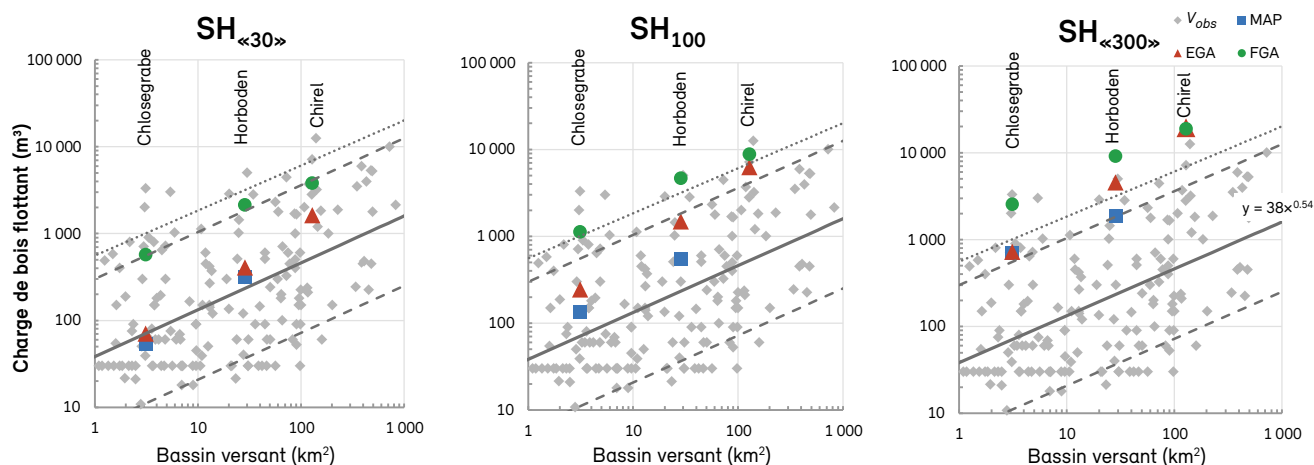
La Fig. 23 illustre les surfaces F_{pot} modélisées par les trois approches pour le scénario SH₁₀₀ et le périmètre Chlosegrabe (Rothbad, BE). On constate que les surfaces F_{pot} coïncident en grande partie et que l'AES a tendance à délimiter des surfaces plus vastes que *Slide/BankforMAP*

(annexe A4). D'un point de vue purement technique, l'AES et *BankforMAP* délimitent les surfaces d'apport potentiel sous forme de polygones (shapefiles) tandis que l'ASLF et *SlideforMAP* produisent des cartes matricielles.

Les charges V_{est} sont représentées sur la Fig. 24. Les carrés gris représentent les charges de bois flottant documentées pour tous les événements enregistrés dans la banque de données du bois flottant (point 1.5). Les données sont ventilées en fonction de la taille du bassin versant. Sont également représentées les valeurs empiriques estimées par l'équation 1.3 et les sous-variantes correspondantes. En raison de sa trop grande taille, le périmètre correspondant à la totalité du bassin versant de la Chirel n'a pas pu être modélisé par *Slide/BankforMAP*. Les résultats montrent que l'ASLF produit les estimations de charge les plus élevées, suivie par l'AES et par *Slide/BankforMAP*. Comparativement aux charges (moyennes) calculées à l'aide de formules d'estimation empiriques (point 1.5), les trois approches de modélisation spatiale produisent globalement des valeurs plus élevées. Cela tient d'une part à la durée de la crue de 2005, qui a généré en moyenne des quantités de bois flottant supérieures à celles d'autres crues (point 1.5) et, d'autre part, au fait que les approches ont été calibrées principalement à partir d'événements liés à la crue de 2005.

Fig. 24 : Comparaison de trois approches visant à estimer la charge de bois flottant

Comparaison des charges V_{est} (voir les symboles colorés dans la légende), réparties par bassin versant et par scénario. Sont également représentées les valeurs empiriques de V_{reg} estimées par l'équation 1.3 (décrite au point 1.5) : trait plein pour la droite de régression de toutes les données, petits pointillés pour le scénario extrême, grands pointillés pour les percentiles 90 % et 10 %.



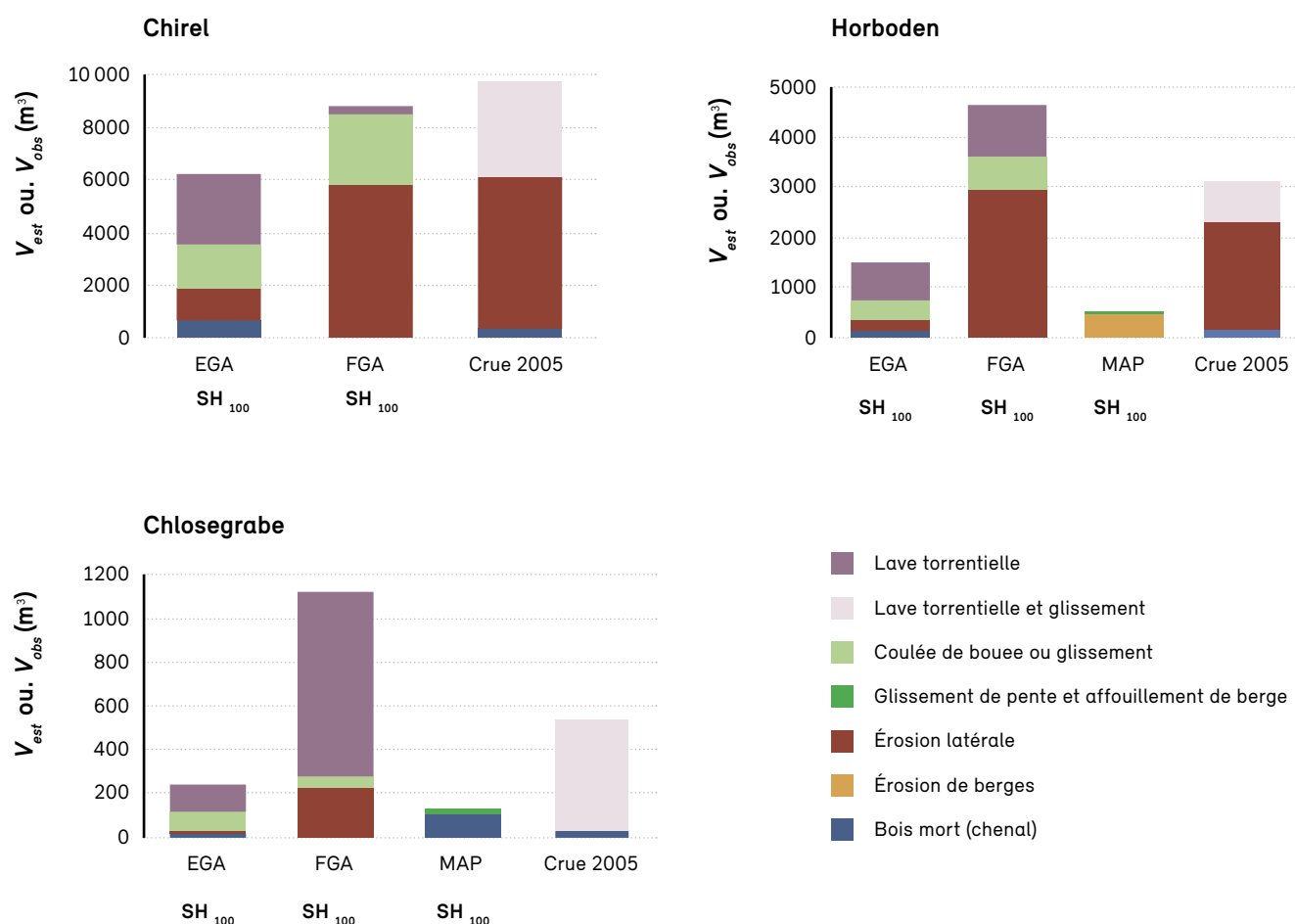
Comme indiqué précédemment (points 1.2 et 1.3), les approches SIG sont calibrées de telle sorte qu'elles ont plutôt tendance à surévaluer V_{obs} qu'à la sous-évaluer. Cette tendance générale ne se confirme pas dans le cas de la Chirel qui, s'agissant de la charge de bois flottant, constitue un exemple extrême (Fig. 27) : pour l'ensemble du bassin versant de la Chirel, l'AES et l'ASLF sous-évaluent toutes les deux la charge de bois flottant de la crue 2005 ; pour les bassins plus petits de Horboden et du Chlosegrabe, V_{obs} est sous-évaluée par *Slide/Bankfor-MAP* et par l'AES, tandis qu'elle est nettement surévaluée par l'ASLF (Fig. 25). L'une des raisons expliquant la différence entre V_{obs} et V_{est} est la perte forestière occasionnée par la crue d'août 2005. Comme les données d'entrée des modèles SIG (surface forestière et volume

de bois sur pied) proviennent de relevés effectués après cet événement, les surfaces d'apport potentiel et donc la charge de bois flottant estimée s'avèrent plus petites. L'autre grande incertitude concerne les indications sur la charge de bois flottant documentée, qui reposent en fait sur des estimations grossières. Si on ventile les charges estimées (SH_{100}) en fonction de la part de chaque processus d'apport impliqué et si on compare ces charges avec les charges V_{obs} documentées pendant la crue de 2005, on constate là aussi des différences entre les trois approches (Fig. 25) :

- **charge de bois flottant observée en 2005** : s'agissant du Chlosegrabe, les processus d'apport impliqués ont été les laves torrentielles et les glissements de terrain. Dans

Fig. 25 : Différenciation des charges de bois flottant par processus d'apport

Résultats des différentes approches de modélisation : distribution par processus d'apport de V_{est} pour le scénario SH_{100} et pour trois bassins versants (partiels) de la Chirel de taille différente et comparaison avec les charges de bois flottant observées pendant la crue d'août 2005.



Tab. 6 : Différenciation des processus selon les approches de modélisation de *WoodFlow*

Processus d'apport	Érosion des berges	Glissement de berge	Glissement de versant
Approche de modélisation			
<i>BankforMAP</i>	•		
<i>SlideforMAP</i>		•	•
AES & ASLF érosion latérale	•	•	
AES & ASLF coulée de boue/glisement			•

les deux bassins plus vastes (Horboden et Chirel), le processus d'apport déterminant a été l'érosion latérale ;

- **approche SIG par logique floue (ASLF)** : par rapport à V_{obs} , les volumes de bois flottant par processus d'apport sont bien restitués. L'ASLF attribue tendanciellement à l'érosion latérale une part importante dans l'apport de bois flottant (Fig. 10A) ;
- **approche empirique SIG (AES)** : la part des différents processus d'apport est relativement équilibrée. Le processus de lave torrentielle domine, suivi par les glissements, l'érosion latérale et la mobilisation du bois du chenal ;
- ***Slide/BankforMAP*** : l'érosion hydraulique des berges contribue à l'essentiel de la charge estimée.

Différenciation des processus d'apport

Différencier les processus d'apport qui contribuent à une charge de bois flottant n'est pas chose aisée. Comme il est quasiment impossible d'attribuer clairement une charge observée à un processus unique, la lave torrentielle et le glissement de terrain sont représentés ensemble sur la Fig. 25 pour ce qui concerne la crue de 2005. La classification des processus d'apport n'est pas la même dans les trois approches : *BankforMAP* modélise uniquement l'érosion (hydraulique) des berges, tandis que l'érosion latérale modélisée par les deux approches SIG comprend à la fois l'érosion des berges et les glissements de berge. *SlideforMAP* modélise les glissements de terrain (géotechniques), qu'ils soient de versant ou de berge, tandis que les coulées de boue et les glissements modélisés par les deux approches SIG sont intégrés à partir de SilvaProtect-CH (Tab. 6). La Fig. 25 tient compte de ces transitions graduelles entre les différents processus d'apport.

Comparaison entre l'AES et l'ASLF

Comme les processus d'apport de bois flottant sont à la fois très complexes et variables dans l'espace et dans le temps, il est particulièrement difficile de prédire les charges de bois flottant. Les deux approches SIG présentées dans ce rapport diffèrent par leur façon de modéliser le potentiel de bois flottant, mais également d'en estimer la charge. Les hypothèses qui ont été admises pour la modélisation des processus d'apport par ces deux approches sont expliquées ci-après.

Parce qu'à lui seul l'exemple de cas de la Chirel ne permet pas encore d'établir des généralités sur la qualité des résultats, il a fallu tenir compte d'autres exemples de cas (Fig. 8 et Fig. 10) pour pouvoir comparer les charges estimées par les deux approches. La comparaison montre que les charges estimées sont généralement plus élevées avec l'ASLF qu'avec l'AES (Fig. 26A). Cette tendance est moins marquée lorsque les charges de bois flottant observées sont importantes. L'estimation du scénario SH «30» produit les plus grands écarts, tandis que celle du scénario SH «300» produit les plus petits écarts. Comme indiqué précédemment, les approches SIG sont calibrées de telle sorte qu'elles ont tendance à surévaluer V_{obs} (Fig. 26B). S'agissant de l'AES, cela n'apparaît pas directement sur la Fig. 26B (les valeurs inférieures à 1 concernent tous les bassins versants partiels de la Chirel). La comparaison se réfère ici au scénario SH₁₀₀. Pour le scénario SH «300», les charges de bois flottant estimées par l'AES coïncident beaucoup mieux avec les exemples de cas de la Chirel (Fig. 8C au point 1.2). La Fig. 26C témoigne également de la surévaluation de V_{obs} pour l'ensemble des 33 périmètres étudiés par l'AES. Le ratio V_{est}/V_{obs} fluctue ici entre 0.3 et

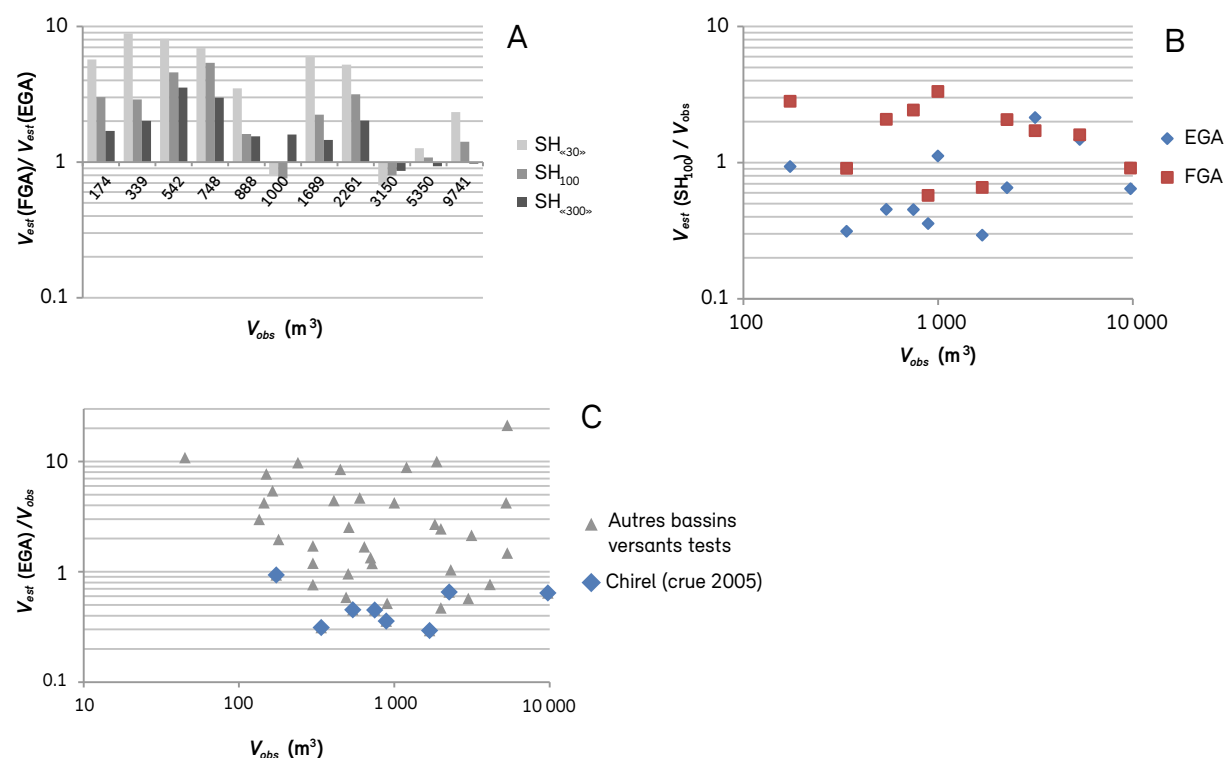
10 (ce qui correspond quasiment à deux ordres de grandeur). Comparativement aux formules d'estimation empiriques (cf. qualité d'ajustement dans les colonnes $\frac{P_{90}}{P_{10}}$ et $\frac{V_{reg}}{V_{obs}}$ du Tab. 4), les prédictions de charge par les modèles SIG sont légèrement meilleures, mais encore empreintes d'une très grande incertitude.

La part des processus d'apport dans la charge de bois flottant estimée est également différente en fonction de l'approche SIG : tandis que l'ASLF désigne fréquemment l'érosion latérale comme le processus d'apport dominant, les laves torrentielles et les glissements peuvent aussi jouer un rôle important dans les scénarios modélisés par l'AES (Fig. 8A au point 1.2 et Fig. 10A au point 1.3). De manière générale, la part des laves torrentielles est plus variable avec l'ASLF qu'avec l'AES. Rappelons ici que les approches SIG diffèrent par leur façon de déterminer les surfaces d'apport : le modèle AES utilise les zones tam-

pons définies le long des trajectoires SilvaProtect sur la base d'expertises pour déterminer l'enveloppe (surface d'apport potentiel) des laves torrentielles et des glissements, puis estime la charge de bois flottant en appliquant des facteurs de réduction globaux ; pour ces mêmes processus d'apport, le modèle ASLF considère la densité et la répartition spatiale des trajectoires SilvaProtect, puis estime la charge de bois flottant (ou plutôt les parts de surface contribuant « effectivement » à l'apport de bois flottant) à l'aide d'une matrice de décision. S'agissant du processus d'érosion latérale, SilvaProtect-CH ne fournit aucune information de base : le modèle AES admet pour chaque scénario un recul des berges proportionnel à la largeur des eaux (Steeb et al., 2019a), puis estime la charge de bois flottant en appliquant des facteurs de réduction globaux ; pour ce même processus, le modèle ASLF considère la largeur d'influence latérale, qui est fonction de la déclivité et de la sinuosité du chenal, puis estime la charge

Fig. 26 : Comparaison des charges de bois flottant estimées

(A) rapport entre V_{est} (ASLF) et V_{est} (AES) pour les trois scénarios, en fonction des charges observées ; (B) rapport entre V_{est} et V_{obs} pour le scénario SH₁₀₀, par approche SIG et en fonction des charges observées ; (C) rapport V_{est}/V_{obs} avec l'approche AES, en fonction des charges observées ; en plus des données correspondant à l'exemple de cas de la Chirel sont représentées les données des autres exemples de cas calculés avec cette méthode.



de bois flottant à l'aide d'une matrice de décision dont les règles diffèrent selon le scénario.

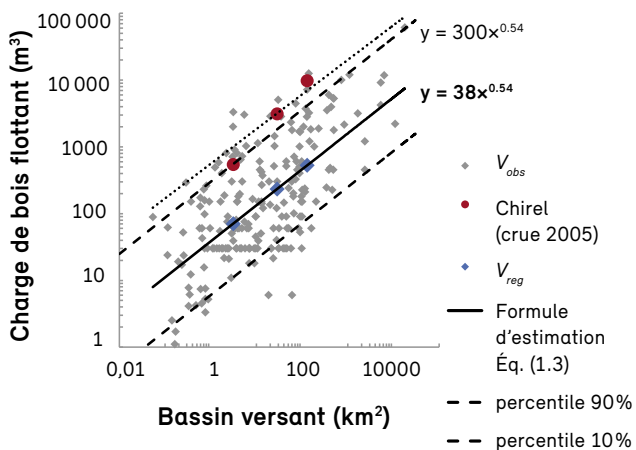
Formules d'estimation empiriques

Le cas de la Chirel lors de la crue d'août 2005 est un événement extrême, avec une charge de bois flottant spécifique exceptionnellement élevée (Fig. 27) due à l'intensité et à la durée des écoulements (Steeb et al., 2017). Comparé à d'autres épisodes de bois flottant, l'exemple de la Chirel se situe dans la tranche supérieure des observations. Les formules d'estimation générales présentées sous la forme des équations 1.3 à 1.12 ne permettent pas de reconstituer de telles charges de bois flottant. En pareil cas, mieux vaut utiliser la formule du percentile 90 % ou même la formule du scénario extrême (Tab. 7), car leurs valeurs V_{reg} sont bien plus proches des charges V_{est} sur la Fig. 24 (en particulier pour les scénarios SH₁₀₀ et SH «300»).

1.8 Recommandations et remarques importantes

Vous trouverez ci-après diverses recommandations pour l'utilisation des approches présentées au chapitre 1. Les conditions d'application pratique sont récapitulées à l'annexe A3 pour l'ensemble des outils et des approches du projet WoodFlow.

Fig. 27 : Exemple de cas de la Chirel
Comparaison du cas de la Chirel avec d'autres épisodes de bois flottant (V_{obs}) et avec les régressions calculées par l'équation 1.3.



Données et buts de l'utilisation

De manière générale, les méthodes d'estimation présentées au chapitre 1 aident à identifier les surfaces d'apport potentiel en cas de crue et à estimer la charge de bois flottant attendue. Dans la pratique, ces méthodes peuvent servir de base pour des travaux d'aménagement et/ou des mesures sylvicoles (annexe A3). Elles peuvent aussi être utilisées pour reconstituer des crues antérieures (analyses d'événement) et pour effectuer des comparaisons avec des charges de bois flottant observées, à condition de tenir compte des modifications (dans l'espace et dans le temps) de la morphologie du chenal et de la surface de végétation. Les résultats produits par les approches présentées au chapitre 1 servent par ailleurs de données d'entrée pour des travaux subséquents (blocs 2 et 3 sur la Fig. 56). Les deux approches SIG (AES et ASLF) et l'approche probabiliste (Slide/BankforMAP) effectuent une

Tab. 7 : Application de formules d'estimation à des exemples de cas
Comparaison des charges V_{obs} observées pendant la crue d'août 2005 dans trois bassins versants partiels de la Chirel et comparaison avec des formules d'estimation empiriques. Le cadre bleu contient les valeurs produites par l'équation 1.3 (ces valeurs sont reportées sur la Fig. 27).

V_{obs}		Apport	542	3102	9741
		Dépôt	325	2448	4968
		Retrait	217	654	4773
Bassins versants			Chlosegrabe	Horboden	Chirel
Équa- tion (1.3)	E	V_{reg}	70	232	524
		percentile 90 %	555	1835	4133
		percentile 10 %	11	37	83
		Scénario extrême	1008	3192	6976
Équa- tion (1.7)	F	V_{reg}	186	-	332
		percentile 90 %	1305	-	2325
		percentile 10 %	37	-	66
		Scénario extrême	2207	-	4112
Équa- tion (1.9)	Q_{max}	V_{reg}	-	-	377
		percentile 90 %	-	-	1982
		percentile 10 %	-	-	43
		Scénario extrême	-	-	3167
Équa- tion (1.12)	$E * F$	V_{reg}	143	-	574
		percentile 90 %	836	-	3117
		percentile 10 %	28	-	104
		Scénario extrême	1351	-	5467

analyse géoréférencée (Fig. 28) consistant (i) à identifier les surfaces d'apport potentiel, (ii) à calculer le potentiel de bois flottant sur la base d'indications concernant le volume de bois sur pied et (iii) à en déduire la charge de bois flottant à l'aide de différentes corrections. Il est à noter toutefois que dans le modèle AES, les surfaces d'apport et les charges de bois flottant ne sont assignées géographiquement aux différents processus d'apport que jusqu'au niveau du tronçon de cours d'eau ; pour déterminer les surfaces d'apport potentiel par tronçon de cours d'eau, l'AES doit ensuite appliquer des facteurs de réduction pour procéder à une réduction générale (non géoréférencée). Dans le modèle ASLF en revanche, les critères de décision pour la probabilité des processus sont appliqués jusqu'au niveau du pixel. Les équations empiriques présentées au point 1.5 servent à estimer les différentes variables de contrôle de la charge de bois flottant qui sont en corrélation avec V_{obs} ; elles livrent une valeur estimative générale, assignée spécifiquement à un point dans l'espace.

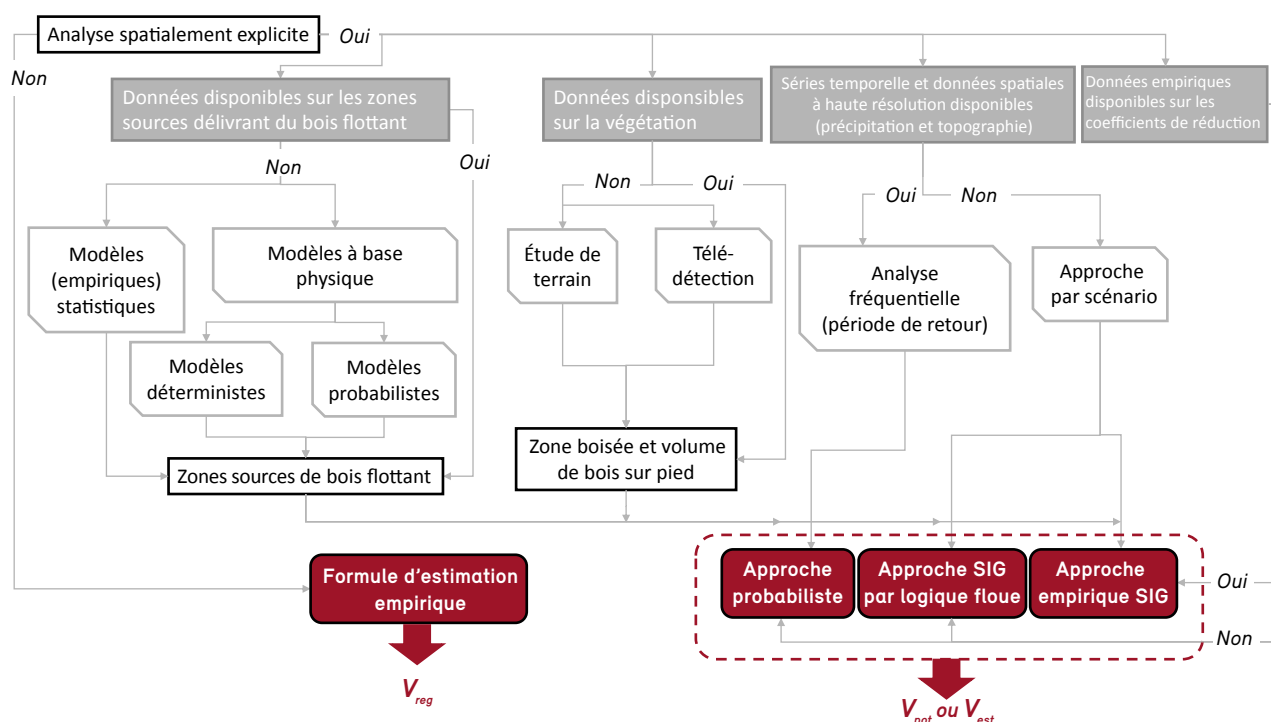
Les modèles SIG et les approches probabilistes calculent systématiquement trois scénarios différents (SH «30» | SH₁₀₀ | SH «300»), qui se distinguent par la pro-

babilité d'occurrence ou la périodicité des processus impliqués. Les deux approches SIG ne modélisent pas directement les processus d'apport : elles se basent sur des trajectoires SilvaProtect pour déterminer les processus de lave torrentielle et de glissement et sur des reculs de berge (déduts à l'aide d'une formule statistique empirique) pour déterminer les processus d'érosion latérale et de mobilisation du bois du chenal. Pour sa part, l'approche probabiliste *Slide/BankforMAP* calcule la probabilité d'érosion des berges et de glissement de manière stochastique, à l'aide de modèles basés sur des données physiques ; le temps de traitement est de fait plus important avec cette approche. Les deux approches SIG se distinguent également de l'approche probabiliste par la façon dont elles quantifient le volume de bois sur pied : *Slide/BankforMAP* utilise pour cela l'outil de reconnaissance des arbres isolés FINT, tandis que les approches SIG se réfèrent à la carte matricielle du VB-MHV. Le potentiel de bois flottant qui en résulte peut donc être différent.

Sources d'erreur potentielles

La modélisation des processus d'apport, de même que l'estimation du potentiel et de la charge de bois flottant, sont empreintes de nombreuses incertitudes. Les

Fig. 28 : Schéma décisionnel pour l'utilisation des différentes approches présentées au chapitre 1



approches du chapitre 1 permettent de quantifier l'ordre de grandeur de la charge de bois flottant attendue dans un bassin versant et d'estimer le danger dans une optique conservatrice, dans le sens où il vaut mieux surévaluer que sous-évaluer les quantités de bois. Les incertitudes qui accompagnent l'estimation de la charge de bois flottant ont plusieurs origines :

- **charge de bois flottant documentée (V_{obs})** : la charge de bois flottant « observée » n'est en réalité qu'une estimation approximative, sans grande précision. Dans le cas d'un dépôt de bois flottant, l'observation sur le terrain consiste à estimer le volume total du tas de bois et sa part de morceaux de bois (ou son volume de pores). Si V_{obs} est déterminée sur la base d'une surface de perte forestière, une hypothèse du volume de bois sur pied doit être faite. Les rapports qui décrivent un événement omettent fréquemment d'indiquer si la quantité de bois documentée est un volume foisonné ou un volume plein (or le premier peut être cinq fois supérieur au second selon le volume des pores) ;
- **perte forestière** : les événements extrêmes tels que celui d'août 2005 peuvent causer l'érosion de surfaces forestières considérables, en particulier le long des chenaux. Dans le cas d'une analyse utilisant des données spatiales collectées avant l'événement (p. ex. surface forestière polygonisée), ces surfaces de perte forestière ne doivent pas être considérées comme étant impliquées dans le potentiel de bois flottant et doivent donc être supprimées avant la modélisation. Dans le cas inverse, c'est-à-dire si les données d'entrée sont plus récentes que l'événement à reconstituer, la surface forestière manquante doit être ajoutée avant la modélisation ;
- **processus d'apport** : le bois flottant est le dernier maillon d'une longue chaîne de processus, dont chacun est modélisé avec une part d'incertitude. Il est ainsi très difficile de déterminer quelles surfaces d'apport potentiel sont effectivement activées pendant un événement et quelle est la part de chaque processus dans la charge totale de bois flottant. À des fins pratiques, la priorité ne doit pas être donnée à la répartition de la charge par processus d'apport, mais plutôt à la quantité totale de bois flottant (en ce qu'elle permet d'apprécier le danger) ;
- **volume de bois sur pied** : l'outil FINT et la carte du VB-MHV sont deux méthodes géoréférencées servant à déterminer le volume de bois sur pied dans un bassin versant. Ici aussi, la quantification n'est pas certaine. L'algorithme FINT se base sur des modèles numériques de terrain à haute résolution pour identifier les arbres en tant que points. La carte du VB-MHV, quant à elle, est une carte matricielle à l'échelle de la Suisse, qui définit une valeur de volume de bois pour chaque pixel de 25×25 m. Elle a donc tendance à estimer un potentiel de bois flottant plus important. L'année des relevés pris en compte par les différentes approches joue également un rôle important, car plus les données sont récentes (c'est-à-dire plus la forêt est ancienne), plus le volume de bois sur pied a tendance à être important (si aucune intervention sylvicole n'a eu lieu dans la forêt). Tandis que FINT utilise des modèles numériques de terrain datant de 2013, la carte du VB-MHV se réfère à des photographies aériennes prises par des appareils stéréo numériques entre 2007 et 2016 (Ginzler et al., 2019) ;
- **conversion de V_{pot} en V_{est}** : les incertitudes sont tout aussi grandes lorsqu'il s'agit de déterminer la part du potentiel de bois flottant modélisé qui est effectivement transporté dans le chenal en tant que charge de bois flottant. L'AES utilise pour cela des valeurs empiriques tirées d'événements antérieurs (auxquelles sont appliqués des facteurs de réduction différents selon le scénario), tandis que l'ASLF utilise des matrices de décision. Ces deux approches peuvent être adaptées en toute flexibilité. Pour convertir V_{pot} en V_{est} , *Slide/BankforMAP* utilisent, pour leur part, les probabilités calculées pour les glissements et l'érosion des berges ;
- **scénarios** : les modèles prennent en considération les incertitudes précitées en calculant plusieurs scénarios différents. Ils peuvent ainsi établir la fourchette des charges de bois flottant possibles. Rappelons que seul le scénario SH₁₀₀ est étayé par des données empiriques (point 1.1.3), tandis que les scénarios SH «30» et SH «300» font des hypothèses ad hoc. Comme le montre l'exemple de la crue de 2005, le débit de pointe d'un événement n'est pas le seul facteur déterminant pour la formation de la charge de bois flottant : la durée de la crue joue également un rôle important (Fig. 17 et explications au point 1.5).

Plages de validité et échelles

Les meilleurs résultats produits par l'AES sont ceux qui correspondent à des bassins versants entre 5 et 200 km². Dans les bassins plus petits, la sporadicité des processus d'apport (glissements ou laves torrentielles) peut amener l'AES à sous-évaluer la charge de bois flottant effective. Dans les bassins plus grands, le niveau d'incertitude augmente et le potentiel de bois flottant devient si important que la charge est généralement surévaluée. Il est alors utile de s'appuyer sur des appréciations d'experts ou sur des relevés de terrain pour pouvoir circonscrire les bassins versants partiels qui contribuent à l'apport de bois flottant. Des réponses doivent alors être apportées aux questions suivantes : la connectivité du cours d'eau est-elle assurée ou existe-t-il des structures retenant le bois flottant (grilles, bassins pour matériaux charriés, lacs contribuant aux dépôts de bois flottant) ? Quels secteurs sont particulièrement actifs sur le plan géomorphologique ? Dans le cas d'un bassin partiel très actif (p. ex. un torrent), il est conseillé d'évaluer plus précisément la charge possible de bois flottant en effectuant un relevé de terrain qui fournira une estimation détaillée de l'activité géomorphologique potentielle des processus, comme on le fait habituellement pour estimer la charge de matériaux charriés ou de lave torrentielle lors d'un événement concernant un torrent.

De manière générale, l'ASLF a également tendance à surévaluer la charge de bois flottant dans les bassins versants de grande taille (>100 km²). Selon l'événement considéré, la charge dans les bassins plus petits (>30 km²) est soit sous-évaluée, soit surévaluée. Comme les approches SIG présentées dans ce rapport n'ont pas vocation à reconstituer un épisode de bois flottant spécifique, les différences entre V_{obs} et V_{est} sont, dans une certaine mesure, attendues.

Comparativement aux approches SIG, les modèles *Slide/BankforMAP* sont principalement utilisés pour les modélisations de petite envergure. En raison du temps de calcul nécessaire, l'approche probabiliste se prête davantage aux bassins versants entre 1 et 50 km².

La plage de validité des formules d'estimation empiriques (point 1.5) est généralement définie par la fourchette des variables de contrôle utilisées. Celle de l'équation 1.3, par

exemple, correspond à des bassins versants entre 0.1 et 5000 km². Vous trouverez dans Steeb et al. (2019b) des indications plus précises sur la plage de validité des dix formules d'estimation empiriques.

Remarques générales sur l'approche empirique SIG

Dans le modèle AES, le rapport V_{obs}/V_{pot} a tendance à diminuer à mesure que la taille du bassin versant augmente (Fig. 8 au point 1.2). Ces ratios peuvent être comparés avec les facteurs $f_{abm} = V_{est}/V_{pot}$, qui sont présumés constants pour chaque processus partiel (et chaque scénario), ce qui signifie qu'ils sont indépendants de la taille du bassin versant considéré. Il ressort de cette comparaison que le modèle AES a tendance à surévaluer les charges de bois flottant principalement pour les bassins versants de plus de 200 km². Les hypothèses de modélisation posent un problème du fait que l'intensité des précipitations n'est pas identique dans tous les secteurs du bassin versant lorsque la taille de celui-ci augmente, certains secteurs pouvant enregistrer des valeurs ponctuelles extrêmes. Or la variabilité de l'intensité des précipitations en fonction du secteur a pour effet que les laves torrentielles et les glissements de terrain ont eux aussi une intensité variable en fonction du secteur. Pour sa part, l'érosion des berges dépend davantage du débit du cours d'eau et des caractéristiques locales du chenal. Pour cette raison, l'AES réduit généralement de 5 à 30 % les surfaces d'apport potentiel sujettes au processus de lave torrentielle. S'agissant à l'inverse des très petits bassins versants, cette réduction peut conduire à une sous-évaluation de la charge de bois flottant. Dans la plupart des cas illustrés sur la Fig. 7, on constate effectivement que les charges de bois flottant sont sous-évaluées pour les bassins jusqu'à 5 km² (scénario SH₁₀₀ avec un facteur de réduction moyen de 0.05 à 0.1) : les valeurs du ratio V_{obs}/V_{pot} sont en majorité supérieures à ce facteur moyen.

Remarques générales sur l'approche SIG par logique floue

L'ASLF permet de définir les surfaces d'apport potentiel en tenant compte de la mobilisation probable de bois flottant sur les surfaces considérées, le degré de mobilisation étant calculé par les trois scénarios. Cette approche est donc tout indiquée lorsqu'il s'agit de modéliser des fonctions non linéaires hautement complexes et de prendre

en considération des critères établis par des experts, qui plus est si les données sont imprécises et les incertitudes, grandes. Les règles de l'ASLF ont été définies sur la base de données d'entrée existantes et calibrées grâce aux charges de bois flottant observées pendant la crue d'août 2005. Comme le modèle est très flexible, les règles et les valeurs d'entrée peuvent être adaptées à tout moment. Le rapport $V_{est}/V_{obs} > 0.3$ (Fig. 26B) indique que l'ASLF produit des résultats fiables, quand bien même les volumes ont tendance à être surévalués, en particulier dans les petits bassins versants ($< 30 \text{ km}^2$). Les surfaces d'apport sujettes aux glissements superficiels et aux laves torrentielles ont été définies grâce aux trajectoires SilvaProtect (comme dans le modèle AES), mais d'autres données d'entrée sont également envisageables. Les plus grandes incertitudes sont liées à l'érosion des berges, dont le rôle est globalement surévalué dans le modèle ; des données supplémentaires pourraient aider à réduire ces incertitudes. On pourrait envisager par exemple d'utiliser des cartes géomorphologiques avec des indications sur l'épaisseur des talus de berge et sur la largeur maximale du couloir d'écoulement (en tant qu'indicateurs de la surface maximale sujette à érosion) ou des données sur les endiguements de berge capables d'empêcher les extensions latérales.

Remarques générales sur *SlideforMAP* et *BankforMAP*

Les approches *Slide/BankforMAP* modélisent la probabilité des processus de glissement superficiel ainsi que de glissement et d'érosion de berge. L'utilisation d'approches probabilistes permet de prendre en considération, jusqu'à un certain point, les limites imprécises des processus. Pour l'estimation du potentiel et de la charge de bois flottant, *SlideforMAP* et *BankforMAP* utilisent certaines données spécifiques à la végétation qui ont une influence directe sur les processus d'apport (p.ex. le renforcement du sol sous l'action des racines). En raison du petit nombre de données d'entrée requises, les approches *Slide/BankforMAP* permettent d'estimer rapidement l'apport de bois flottant dans les bassins versants de petite à moyenne taille. Les résultats de la modélisation permettent par ailleurs d'identifier les endroits dans lesquels des mesures sylvicoles sont susceptibles de réduire cet apport potentiel. Seule l'estimation de la nature du sol et de la répartition granulométrique moyenne peut demander beaucoup

de temps et ne saurait donc se substituer totalement à une inspection sur le terrain.

Remarques générales sur les formules d'estimation empiriques

Toutes les équations présentées dans ce rapport (fonctions puissance 1.3 à 1.12) estiment la charge de bois flottant en mètres cubes, alors que les anciennes équations empiriques de Rickenmann (1997) en estiment le volume foisonné. Le facteur de masse appliqué dans ce cas pour la conversion du volume foisonné en volume plein est $\alpha = 3.3$. Il est à noter que certaines équations de Rickenmann (1997) décrivent la charge de bois flottant, comme dans le présent rapport, alors que d'autres estiment le bois (mort) potentiellement mobilisable, c'est-à-dire prêt à être mobilisé dans le chenal ou dans des secteurs proches du cours d'eau. Grâce aux nombreuses données sur le bois flottant collectées dans le cadre du projet *WoodFlow* et regroupées dans une banque de données, la pertinence statistique des formules d'estimation a pu être considérablement améliorée par rapport à Rickenmann (1997). De manière générale, les jeux de données utilisés présentent toutefois une grande dispersion. Des formules d'estimation pour différentes valeurs de percentile (Tab. 4) permettent d'estimer la fourchette des charges de bois flottant possibles. Ces variantes peuvent aider à mieux apprécier l'incertitude liée au chiffrage de la quantité de bois.

Bilan

Plusieurs approches et outils permettant d'estimer le potentiel et la charge de bois flottant sont mis à disposition dans le cadre du projet *WoodFlow*. Afin que l'estimation de la quantité de bois soit fiable, les différentes approches doivent être combinées entre elles, comme cela est recommandé également pour l'évaluation des crues dans les bassins versants de petite à moyenne taille (OFEV, 2003). La méthode la plus simple et la plus rapide consiste à utiliser d'abord les formules d'estimation empiriques afin d'obtenir un premier ordre de grandeur pour la situation considérée. Les approches SIG et *Slide/BankforMAP* permettent ensuite d'obtenir une modélisation géoréférencée des surfaces d'apport potentiel ainsi qu'une estimation plus détaillée de la charge de bois flottant.

Considérant leur profondeur de traitement et leur degré de détail, les approches de modélisation géoréférencée sont celles qui correspondent le mieux à une carte indicative des dangers. En raison des incertitudes liées à la modélisation des processus, elles produisent toutefois une estimation approximative (géoréférencée) des surfaces d'apport potentiel, sans indications précises sur les intensités générées. Pour leur part, les charges de bois flottant estimées dans le cas du scénario SH₁₀₀ se fondent sur une réduction du potentiel de bois flottant basée sur les données d'événements ayant une périodicité d'environ 50 à 150 ans. Les outils présentés ici sont des aides capables de fournir une vue d'ensemble à grande échelle et d'attirer l'attention sur les secteurs géographiques qui nécessitent une évaluation plus détaillée de la situation relative au bois flottant, par exemple au moyen du typage proposé pour les cours d'eau (point 1.6) ou dans le cadre d'une estimation de la charge de matériaux solides dans des secteurs traversés par des torrents. À ce titre, les différentes approches du chapitre 1 ne sont pas à même de remplacer le travail de terrain (p. ex. relevés ou inspections par des experts), mais doivent être utilisées en complément.

2 Transport, réduction et dépôt de bois flottant

Le présent chapitre élabore des bases sur la dynamique du bois flottant dans le chenal et se concentre sur les processus géomorphologiques et fluviaux qui influencent la mobilisation, le transport et le dépôt de bois flottant dans le réseau hydrographique. Il rend compte de l'état actuel de la recherche dans ce domaine, sur lequel des travaux supplémentaires doivent être menés. Les résultats permettent d'améliorer les bases scientifiques concernant le régime et la capacité de transport (point 2.1); ils servent aussi à évaluer les dimensions du bois flottant (p. ex. longueur et diamètre) et sa réduction durant le transport (point 2.2), et peuvent être utilisés comme données d'entrée dans les calculs relatifs aux embâcles du chapitre 3. Les analyses empiriques sur le bois flottant présent dans les cours d'eau suisses (point 2.3) servent de données d'entrée dans les approches SIG du chapitre 1. Les possibilités de modélisation du transport de bois flottant à l'aide du programme Iber-Wood (point 2.4) pourraient être utilisées dans les projets qui ne prévoient pas d'essais sur des modèles physiques tels que ceux présentés au chapitre 3. Enfin, les différentes méthodes de monitoring (point 2.5) représentent une alternative aux méthodes d'estimation présentées au chapitre 1, en particulier en ce qui concerne l'évaluation de points dangereux. Les approches et les méthodes du chapitre 2 ont été soit élaborées avec des données provenant de diverses régions du monde soit testées à l'aide d'exemples de cas en Suisse (dans un premier temps les rivières Zulg, Emme et Singine).

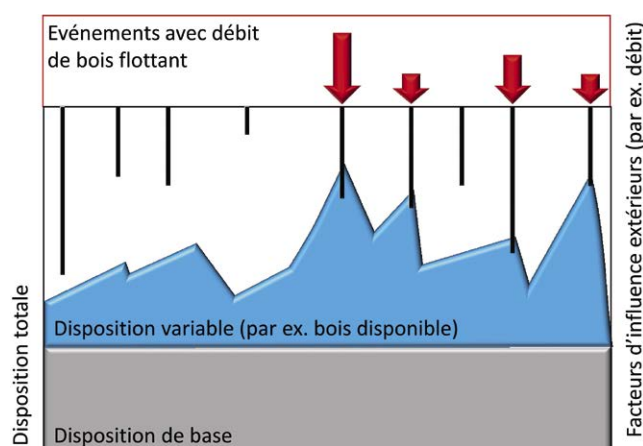
2.1 Transport de bois flottant

Le transport de bois flottant dans les cours d'eau dépend de plusieurs facteurs tels que l'hydraulique (le régime d'écoulement), la géomorphologie du chenal et de la zone riveraine ainsi que la taille et la forme des troncs. Vu qu'il est quasi impossible de mesurer directement le transport de bois flottant durant une crue, notre compréhension de ce phénomène reste lacunaire.

En 2012, 2013, 2015 et 2016, quatre crues avec d'importants transports de bois flottant (WLFs, cf. aussi point 2.1.1), dont certains avaient la forme d'un radeau de bois flottant, ont pu être observées sur la rivière Zulg (BE), fournissant une occasion unique de mieux comprendre les processus en cascade. Ces WLFs ont été analysés en détail en tenant compte des données sur les précipitations et les débits. La somme et la répartition des précipitations ayant fortement varié d'un événement à l'autre, différentes zones ont été touchées. Les analyses montrent qu'une quantité importante de bois flottant peut être emportée dans différentes conditions d'écoulement et que le transport n'est pas seulement influencé par le débit. Les régimes de mobilisation et de transport sont aussi influencés par des facteurs temporels comme le déroule-

Fig. 29 : Modèle pour la prédisposition aux WLFs d'après le concept de prédisposition pour l'occurrence de laves torrentielles de Zimmermann et al. (1997)

L'occurrence de WLFs résulte de la combinaison de prédispositions de base qui restent constantes dans le temps (p. ex. le bassin versant), de prédispositions variables qui se modifient au cours de petits intervalles temporels (p. ex. la présence de bois flottant ou l'apport de bois dans le chenal par différents processus) et de facteurs externes comme le débit dans le chenal. Les flèches rouges indiquent des WLFs de différentes importances.



ment de l'hydrogramme et l'historique des crues récentes. Après une coupe de bois, la première crue majeure joue un rôle « disproportionné » en ce qui concerne l'apport de bois flottant, alors que les événements de crue ultérieurs peuvent rester sans grand effet, indépendamment de leur intensité. Cela semble avoir été le cas de l'événement

de 2015, dont le débit était supérieur à celui de 2012 (234 vs 222 m³/s), mais au cours duquel moins de bois flottant a été transporté (350 vs 600 m³). Sur la base de ces résultats, le concept de probabilité d'occurrence de WLFs a été développé sur le modèle de la disposition (notamment temporelle) d'un bassin versant à for-

Fig. 30: Modèle pour le transport de bois flottant

(A) Relation entre le débit de crue et le transport de bois flottant (valeurs seuils expliquées dans le texte); (B) rapport entre le volume de bois (en m³ = bois de différentes tailles) et le transport de bois flottant; (C) rapport entre le débit (bleu) et le transport de bois flottant (orange). Dans ce contexte, le transport de bois flottant peut être représenté par un rapport (output/input selon la définition figurant dans Ruiz-Villanueva et al., 2016c), par le nombre de morceaux de bois flottant transportés ou par la distance de transport.

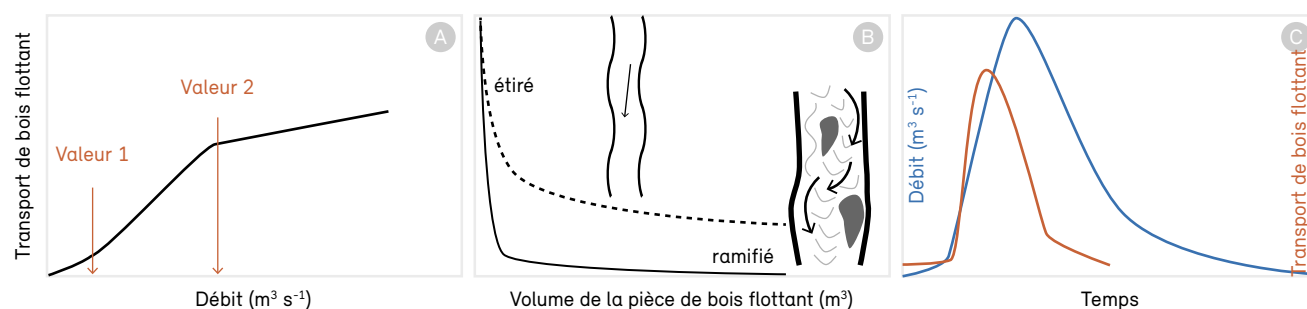
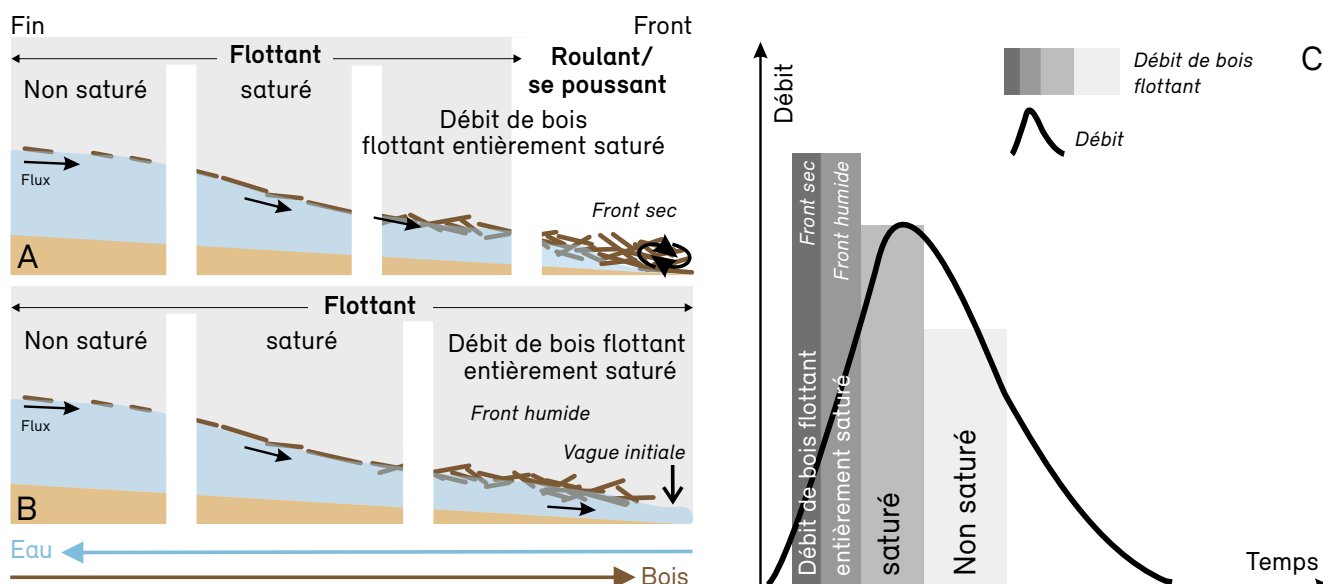


Fig. 31: Phases de l'évolution du débit de bois flottant

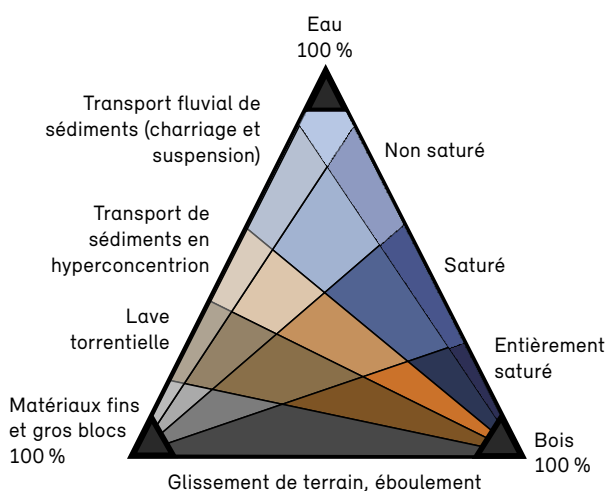
(A) Avec un front sec roulant et glissant et (B) avec un front couvert d'eau précédé par une vague initiale. (C) Rapport entre l'hydrogramme du débit et le débit de bois flottant: la phase entièrement saturée se forme avant le débit de pointe; la phase saturée est emportée juste avant ou pendant le débit de pointe; la phase non saturée est emportée pendant que le débit décroît (branche descendante de l'hydrogramme).



mer des WLFs proposé par Zimmermann et al. (1997) pour l'occurrence de laves torrentielles (Fig. 29).

Le transport de bois flottant n'augmente pas linéairement avec l'accroissement du débit, mais se développe par étapes. Il débute la plupart du temps lorsqu'un certain débit est atteint (valeur 1 sur la Fig. 30A). Il augmente ensuite graduellement jusqu'à un certain débit, qui est en général supérieur à la capacité d'écoulement du cours d'eau (valeur 2 sur la Fig. 30A), puis se stabilise. Pour qu'une nouvelle augmentation significative du transport de bois flottant ait lieu, il faudrait que le débit dépasse une nouvelle valeur seuil. Le débit nécessaire pour que le bois soit mobilisé dépend de la longueur et du diamètre des morceaux à transporter (Fig. 30B). De façon générale, les petits morceaux sont plus facilement transportés que les grands. En plus des dimensions du bois, le transport dépend des conditions d'écoulement, elles-mêmes déterminées par la morphologie du cours d'eau (Fig. 30B), de la densité du bois, qui influe sur la flottabilité, ainsi que des événements de crue précédents durant lesquels du bois a été déposé dans le chenal. Le débit de bois flottant se caractérise par une hystérèse, c.-à-d. qu'il est plus élevé pendant la phase où le débit croît (branche montante de l'hydrogramme de crue) que pendant celle où il diminue (Fig. 30C).

Fig. 32 : Diagramme triangulaire pour différents types de débits avec sédiments, eau et bois



Graphique : adapté selon Ruiz-Villanueva et al. (2019b)

2.1.1 Régime de transport : une nouvelle description du débit de bois flottant

Les résultats du projet *WoodFlow* permettent de décrire et de caractériser d'une nouvelle façon les débits de bois flottant (WLFs). Le phénomène était certes déjà connu, mais comme il était sous-estimé, la connaissance des processus en jeu était lacunaire. L'analyse systématique de vidéos amateurs (Ruiz-Villanueva et al., 2019b) permet de distinguer les phases d'écoulement dans les débits de bois flottant (Fig. 31A-B). Cette nouvelle classification est aussi utilisée au point 3.5 pour estimer la revanche partielle nécessaire pour le passage du bois flottant sous les ponts.

Débit de bois flottant entièrement saturé : Le bois est emporté sous la forme d'une masse qui occupe toute la largeur du lit du chenal et la majeure partie du profil d'écoulement. Les morceaux de bois sont en contact direct les uns avec les autres ; elles tournent sur elles-mêmes et bougent dans la masse. La plupart d'entre elles sont orientées perpendiculairement à la direction d'écoulement. Les vidéos permettent de distinguer deux catégories de débit de bois flottant entièrement saturé :

Front non couvert d'eau ou sec : Tandis que le débit s'accroît, l'eau est quasiment retenue par le front de bois dense et sec (non couvert d'eau) et pousse le bois devant elle dans le lit du cours d'eau comme un bulldozer. L'eau est alors à peine visible ou pas visible du tout depuis le devant. Derrière le front, l'eau noie les troncs ou les retourne et modifie leur position. La masse est constituée d'une ou de plusieurs couches de bois, où les morceaux de bois glissent les uns sur les autres et se recouvrent comme des écailles.

Front couvert d'eau ou humide : Le front de bois est précédé par une vague initiale. Le débit croît rapidement et le bois flottant se met à surnager. Une masse homogène de bois flottant sur l'eau commence à se former, dans laquelle les morceaux se tournent par rapport à la direction du flux et pivotent sur leur axe.

Débit de bois flottant saturé ou radeau de bois flottant compact : Il s'agit de la forme la plus connue de transport de bois flottant, dans laquelle les troncs sont serrés les uns contre les autres et se déplacent ensemble en formant

une grande surface. Braudrick et al. (1997) la définissent comme une masse de bois qui occupe au moins 33 % de la surface du chenal. Les espaces entre les troncs sont petits ; comme les troncs se touchent souvent, ils ne peuvent pas se mouvoir indépendamment de la masse et il est donc rare qu'ils se tournent ou pivotent sur leur axe. Beaucoup d'entre eux sont orientés dans la direction de l'écoulement ; certains peuvent être orientés perpendiculairement à celle-ci, en particulier sur les bords.

Débit de bois flottant semi-saturé ou radeau de bois flottant moins compact : Le régime saturé peut graduellement se transformer en un régime non saturé et passer par un régime intermédiaire semi-saturé, dans lequel des troncs se meuvent isolément ou en groupes (Braudrick et al., 1997). La quantité de bois flottant dans le profil d'écoulement diminue et la masse apparemment homogène se défait.

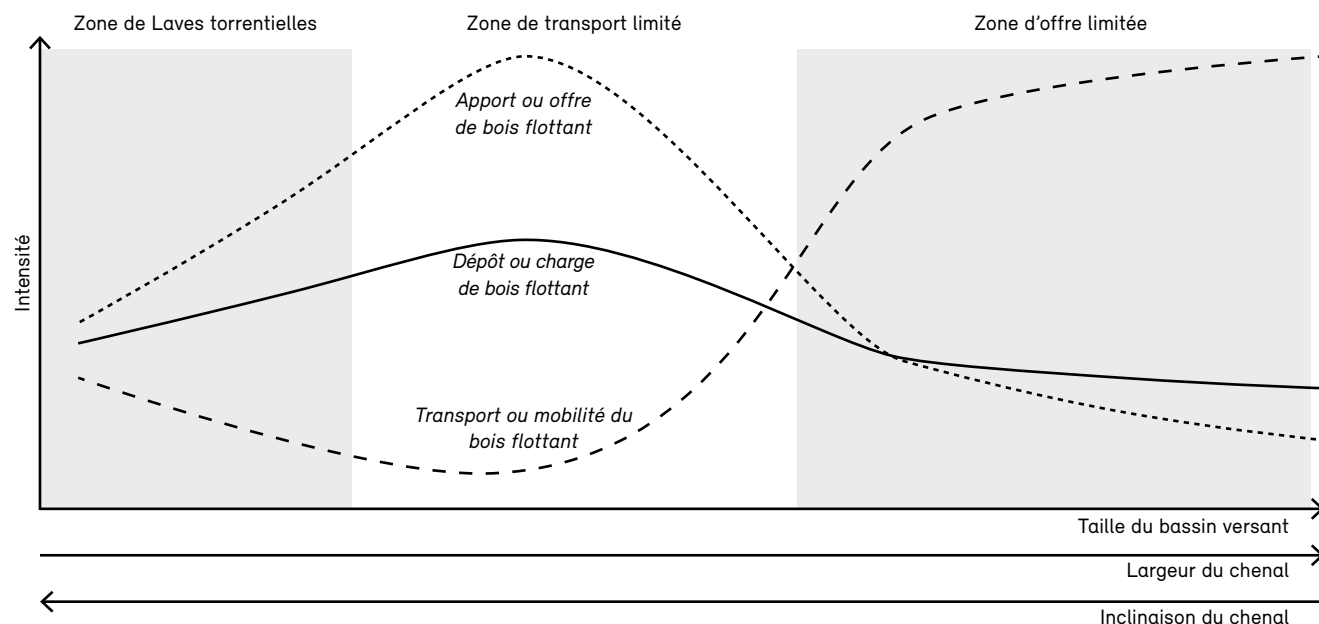
Débit de bois flottant non saturé ou morceaux de bois isolés : Selon la définition de Braudrick et al. (1997), il y a dans cette phase peu ou pas d'interaction entre les morceaux de bois et ceux-ci occupent moins de 10 % de la

surface du chenal. Les troncs réagissent aux obstacles et aux différentes vitesses d'écoulement selon la section par des rotations et de changements d'orientation, indépendamment des autres troncs.

Les résultats disponibles montrent que les WLFs peuvent survenir dans différents bassins versants. Les WLFs ont lieu fréquemment dans les chenaux à forte pente, étroits et non ramifiés. Ils sont en général instables et les mouvements des troncs sont irréguliers, ce qui s'observe aussi dans d'autres phénomènes d'écoulement charriant des sédiments. Les vidéos et les analyses montrent que dans tous les événements, le transport de bois le plus important a lieu avant le débit de pointe. Le rapport entre l'hydrogramme de crue et le débit de bois flottant peut être représenté par un modèle (Fig. 31C). Lorsque le débit de crue décroît, le débit de bois flottant est en général non saturé et contient des quantités de bois inférieures à celles emportées pour un débit similaire lorsque le débit croît. Le transport de bois flottant présente son débit maximal avant que le débit de pointe ne soit atteint (hystérèse du transport de bois flottant en fonction du débit dans le sens des aiguilles d'une montre).

Fig. 33 : Tronçons de transport et de dépôt de bois flottant dans un réseau hydrographique

Détermination des tronçons de transport et de dépôt de bois flottant au sein d'un réseau hydrographique en fonction de la taille du bassin versant et de la largeur et de l'inclinaison du chenal (modèle théorique). Les laves torrentielles dominent dans les petits bassins versants à forte inclinaison, ce qui peut favoriser le transport de bois flottant.



Étant donné que les caractéristiques du débit reflètent entre autres la teneur relative des composants de ce dernier, le bois flottant doit être pris en compte dans la classification des débits. En effet, si le bois fait partie des composants solides du débit, il faut s'attendre à des caractéristiques de débit différentes. Les débits de bois flottant peuvent être classés en fonction de leur teneur en sédiments, en eau et en bois à l'aide d'un diagramme triangulaire (Fig. 32). Pour pouvoir gérer le bassin versant et le risque de crue d'un cours d'eau, il est indispensable de connaître la prédisposition du chenal en matière de débit de bois flottant. Les types de débit représentés à la Fig. 32 constituent également une base importante pour planifier et concevoir des ouvrages de rétention du bois flottant (Lange et Bezzola, 2006 ; Piton et Recking, 2015) tels que les herses, les bassins de rétention ou les filets. Une gestion solide du risque de crue nécessite une approche globale de l'ensemble du bassin versant, qui ne se limite pas aux seules mesures d'aménagement.

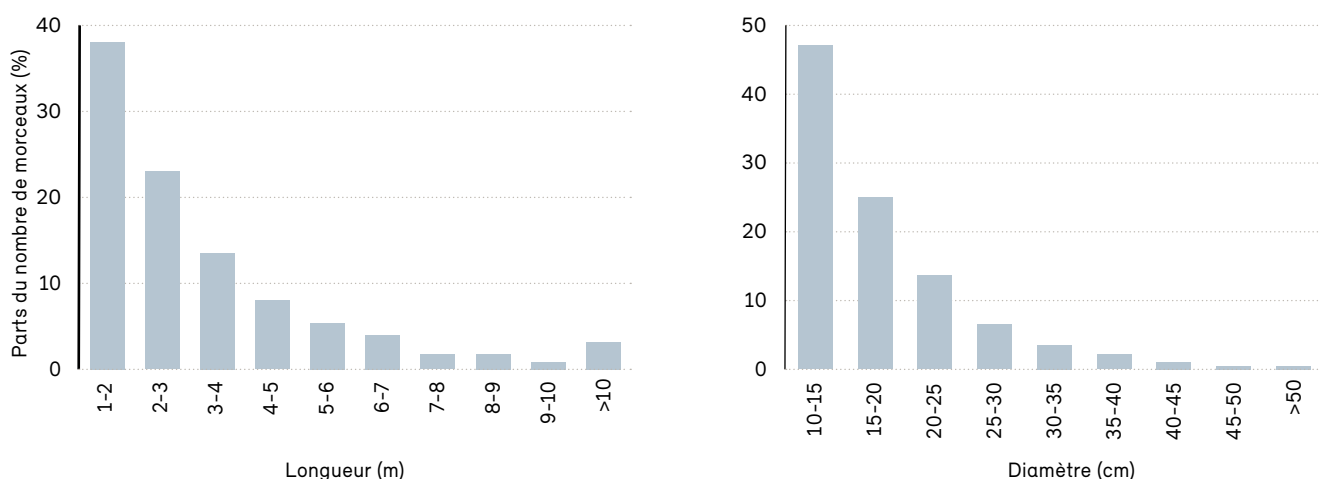
2.1.2 Capacité de transport de bois flottant

Il est également important de considérer les variations spatiales qui existent au sein d'un réseau hydrographique en matière de transport de bois flottant. Pour les analyser, il convient de se servir de la notion de capacité de transport (Wainwright et al., 2015), habituellement utilisée pour le transport des matériaux charriés. La capacité de transport se rapporte normalement à la quantité maximale de matières charriées (ou à la

taille maximale des particules) qui peut être transportée pour un débit donné dans un tronçon défini du chenal. Par ailleurs, elle peut aussi être considérée comme l'équilibre entre le taux d'apport de matériaux et le taux de transport. Dans le cas du bois flottant, le calcul de la capacité de transport nécessiterait des mesures et des données empiriques. Il existe toutefois des méthodes de calcul simples qui permettent d'estimer qualitativement le potentiel de transport d'un chenal. À cet effet, des ratios adimensionnels servant à décrire le transport du bois ont été définis, par exemple le taux relatif d'apport de bois (rapport entre le taux volumétrique d'apport de bois et le débit d'eau claire [$Q^* = Q_{\text{bois flottant}}/Q_{\text{eau}}$]), la longueur relative des troncs (rapport entre la longueur du tronc et la largeur du chenal [$L^* = L_L/B$]) et le diamètre relatif du tronc (rapport entre le diamètre du tronc et la profondeur moyenne du chenal [$D^* = d/H_{\text{chenal}}$]). De manière générale, la capacité de transport de bois flottant est plus élevée lorsque $L^* < 0.5$, mais cela dépend aussi de la morphologie du chenal, qui peut fortement varier dans le réseau hydrographique. Par ailleurs, le bois flotte aussi longtemps que D^* ne passe pas sous une valeur critique, qui dépend entre autres aussi de la densité du bois. Dans l'hypothèse d'une densité du bois d'environ 500 kg/m^3 , la valeur critique est par exemple d'environ 0.5, bien qu'elle puisse varier selon le nombre de Froude (Lange & Bezzola, 2006 ; Braudrick et Grant, 2001). Combinées aux indications relatives à l'apport de bois flottant, ces méthodes de calcul peuvent être utili-

Fig. 34 : Distribution des tailles des morceaux de bois déposés

Distribution des tailles des morceaux de bois flottant déposés ($n = 6395$) selon leur longueur (à gauche) et leur diamètre (à droite).



sées pour localiser les tronçons de transport et de dépôt le long du réseau hydrographique.

La Fig. 33 présente un schéma théorique qui permet de déterminer ces tronçons en fonction des dimensions du bassin versant et de la largeur et de la déclivité du chenal ; les torrents à forte pente où dominent les laves torrentielles sont aussi pris en considération. Le schéma montre que, dans les bassins versants de petite ou moyenne taille, il ne faut s'attendre à des charges de bois flottant d'une certaine importance qu'en cas de crues relativement fortes, puisque, même s'il y a suffisamment de bois flottant, le transport est limité par la faible capacité de transport (zones de transport limité). Dans les cours d'eau de plus grande taille, la capacité de transport augmente par contre avec l'accroissement du débit, mais l'offre de bois flottant est limitée (zones d'offre limitée).

La Fig. 33 est une simplification qui représente un modèle général ; lors d'événements extrêmes, les processus peuvent toutefois se modifier, par exemple si une quantité importante de bois flottant est transportée dans la partie supérieure du bassin versant en raison de débits élevés et que les quantités restantes y diminuent fortement. Ce modèle offre cependant une bonne première approche pour localiser les tronçons d'apport, de transport et de dépôt dans un réseau hydrographique.

2.1.3 Recommandations et remarques importantes

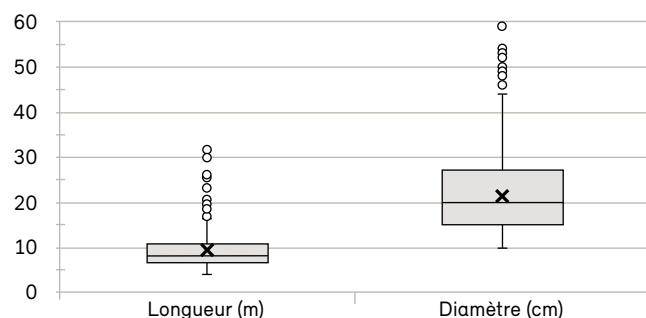
La principale difficulté soulevée par la quantification du bois flottant est le manque de données. Comme il n'existe pas d'appareil de mesure pour le monitoring du trans-

port de bois flottant, les observations systématiques manquent, tout comme les indications sur l'ampleur et la fréquence de ce phénomène. Pour combler cette lacune, il est important de considérer non seulement la quantité de bois flottant mobilisable dans un bassin versant, mais également la capacité et les différents mécanismes de transport (un transport est-il possible ? et si oui, comment le bois est-il transporté et où est-il ensuite déposé ?). Un monitoring du transport du bois flottant est donc indispensable pour mieux comprendre ces processus. À cet effet, le projet *WoodFlow* a été l'occasion de tester différentes approches telles que les mesures de terrain, la vidéosurveillance et la télédétection (point 2.5). Le transport et le dépôt de bois flottant peuvent aussi être analysés en détail à l'aide de la modélisation numérique (*Iber-Wood*, point 2.4).

2.2 Réduction de la taille du bois flottant

Le bois flottant emporté lors d'une intempérie peut avoir une influence considérable sur les processus de dommage. À cet égard, le potentiel de dommages ne dépend pas seulement de la quantité de bois flottant transporté, mais aussi du régime de transport (débit de bois flottant non saturé ou saturé) ainsi que de la forme et de la taille des morceaux de bois. Ces facteurs déterminent quand et comment le bois flottant est mobilisé et transporté et influencent aussi la probabilité d'embâcle dans les profils transversaux critiques. Pour dimensionner correctement les ouvrages de rétention (p. ex. les herse) et les ponts (revanche, écart entre les piles), il est important de pouvoir s'appuyer sur des hypothèses concernant la distribution des tailles du bois flottant attendu. Lors du projet *WoodFlow*, cette distribution a été examinée en détail avec comme objectif de quantifier la réduction du bois flottant au cours du transport fluvial. L'étude s'est concentrée sur les processus physiques de réduction qui prédominent lors d'événements de crue, notamment la rupture due à des obstacles, la fragmentation par pression de l'eau, le broiement par les matières charriées et la rupture d'un embâcle existant.

Fig. 35 : Diagrammes en boîtes présentant la distribution des longueurs et des diamètres des 10 % des morceaux de bois les plus grands par site (x = moyenne)



2.2.1 Distribution des tailles des morceaux de bois flottant

La base de données utilisée pour l'étude était constituée par les dépôts de bois flottant formés sur 27 sites différents et analysés peu de temps après un événement de crue (en particulier les crues de 2005). Au total près de 6400 morceaux de bois transportés ont été étudiés. En plus de la mesure de la longueur et du diamètre des morceaux, d'autres paramètres comme l'essence (résineux ou feuillus) et le degré d'abrasion et de désagrégation ont été documentés. Les diagrammes en barres de la Fig. 34 présentent la distribution des fréquences de tous les morceaux de bois étudiés d'une longueur ≥ 1 m et d'un diamètre ≥ 10 cm. Les petits morceaux sont de loin les plus nombreux. Près de 75 % des morceaux déposés mesurent moins de 4 m et ont un diamètre inférieur à 20 cm. Seuls 214 morceaux sur les 6395 documentés font plus que 10 m (3.3 %).

Dans l'optique de la prévention des dangers, ce sont surtout les grands morceaux qui présentent un intérêt. La distribution des longueurs et des diamètres des 10 % des morceaux les plus grands a été étudiée pour chacun des 27 sites (Fig. 35). La longueur moyenne des grands morceaux est d'environ 9 m (médiane 8 m), avec quelques valeurs aberrantes entre 15 et 32 m. La mobilité de ces

morceaux mobilité est cependant souvent limitée et ceux-ci ne peuvent être emportés que dans les grands cours d'eau qui possèdent un chenal suffisamment large et une profondeur d'écoulement suffisante. Le diamètre des grands morceaux est de 22 cm en moyenne (médiane 20 cm), avec quelques valeurs aberrantes entre 45 et 60 cm.

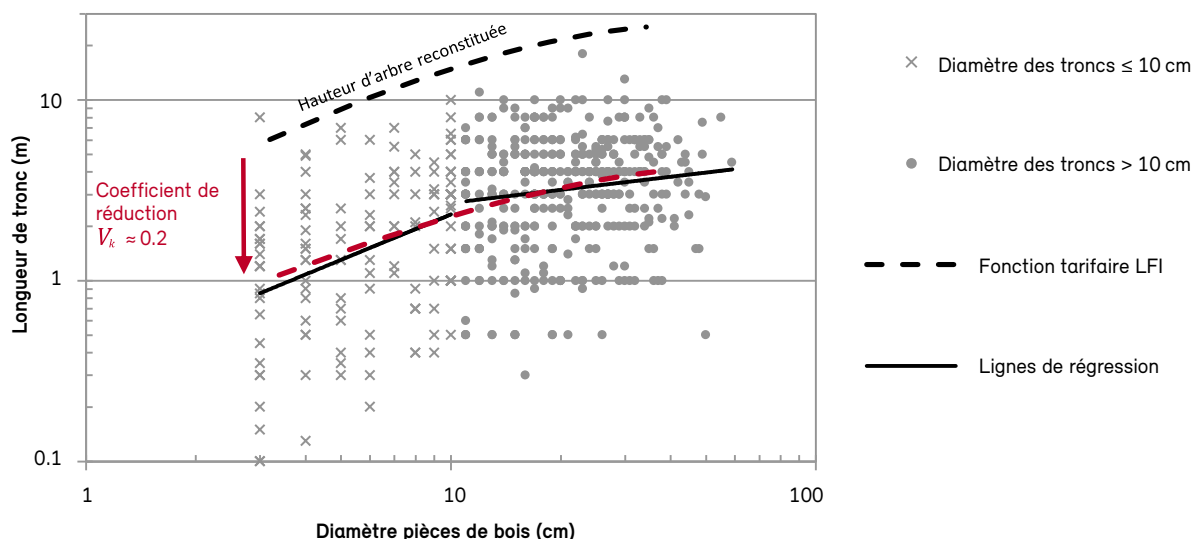
2.2.2 Coefficients de réduction

Pour chaque morceau de bois, la hauteur initiale de l'arbre a été reconstituée à l'aide du tarif de l'IFN (Kaufmann, 2001). Cette hauteur est établie en fonction du diamètre du morceau de bois flottant déposé, en partant de l'hypothèse vérifiée que le diamètre ne diminue pas de manière significative durant le transport fluvial (Steeb et al., 2019c). Le facteur de réduction est obtenu en divisant la longueur mesurée du morceau de bois par la hauteur reconstruite de l'arbre. La moyenne des facteurs de réduction de tous les morceaux déposés et mesurés sur un site donné est considérée comme la réduction moyenne du bois flottant à cet endroit. Ce coefficient de réduction moyen V_k permet de bien représenter les dimensions du bois transporté (Fig. 36).

Le coefficient de réduction V_k moyen pour les 27 sites étudiés est de 0.2 (médiane = 0.14), ce qui signifie que

Fig. 36 : Rapport entre la longueur des troncs et le diamètre des morceaux de bois flottant déposés lors des crues de 2005

Si la hauteur de l'arbre reconstituée au moyen du tarif est multipliée par un facteur de réduction $V_k = 0.2$ (ligne rouge en traitillé), les deux lignes de régression des données (lignes noires continues) peuvent être bien rapprochées. La dispersion des points illustre la grande variabilité de la longueur des troncs du bois flottant déposé.



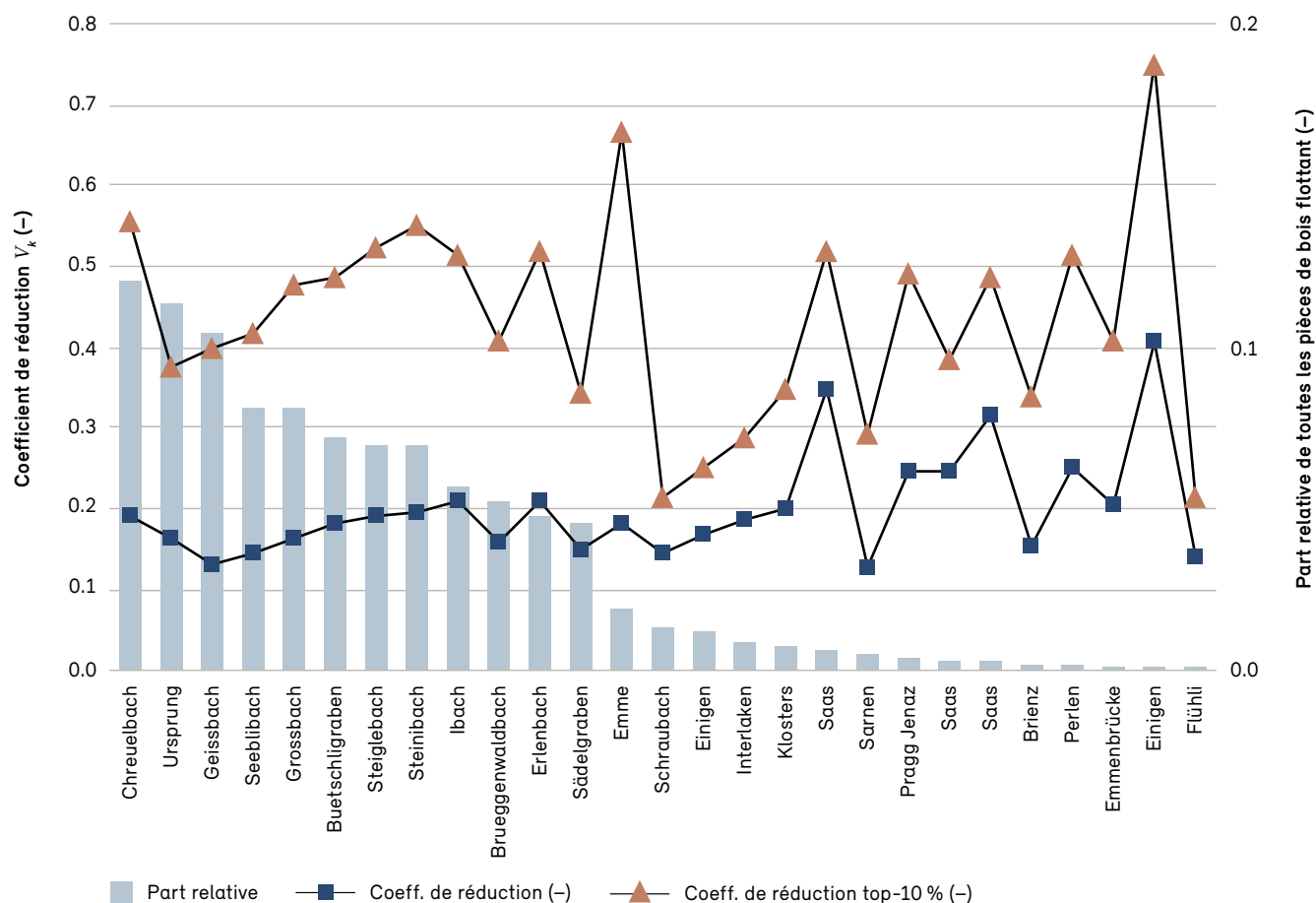
les arbres perdent environ un cinquième de leur longueur initiale durant le transport fluvial. Si seuls les 10 % des morceaux de bois les plus longs par site sont pris en considération, le coefficient de réduction $V_k = 0.43$ (médiane = 0.36). Sur les sites où le nombre de morceaux de bois flottant étudiés est faible, les coefficients de réduction présentent une variabilité élevée (Fig. 37).

La corrélation des coefficients de réduction avec certaines caractéristiques du bassin versant (distance de transport, déclivité et largeur du chenal), les processus d'apport et les facteurs d'influence spécifiquement liés à la végétation (essence, état du bois) ont également été étudiés. Les résultats montrent que les résineux

sont tendanciellement plus réduits que les feuillus, que la réduction a tendance à affecter moins le bois frais que le bois mort déjà altéré et qu'elle est plus forte dans les chenaux étroits et en pente (torrents) que dans les cours d'eau de plus grande taille, pour autant que, dans le cas des torrents, la capacité de transport pour la mobilisation du bois flottant soit atteinte. Étant donné que le bois apporté par des mouvements de masse (glissements de terrain et laves torrentielles) est déjà soumis à une action de réduction physique lorsqu'il est emporté vers le chenal, il est davantage réduit que le bois apporté en raison de l'érosion des berges. Il n'existe par contre pas de corrélation nette entre la distance de transport dans le cours d'eau et les coefficients de réduction. Comme l'a décrit Zollinger (1983), la réduction du bois flottant a

Fig. 37 : Coefficients de réduction des 27 sites étudiés

Coefficients de réduction des 27 sites étudiés avec une valeur moyenne $V_k \approx 0.2$ (bleu). Si seuls 10 % des morceaux de bois les plus grands par site sont pris en considération, la dispersion est plus grande et le coefficient de réduction moyen deux fois plus élevé ($V_k \approx 0.4$) (rouge). Les colonnes en gris représentent la part relative de tous les morceaux de bois flottant étudiés ($n = 6395$).



lieu principalement au début du transport dans le chenal, lorsque les arbres sont ébranchés et brisés après les premiers mètres.

2.2.3 Recommandations et remarques importantes

Les études montrent que l'apport et le transport de bois flottant dans le chenal peuvent fortement réduire la longueur initiale des morceaux. Le bois flottant perd en moyenne entre la moitié et un cinquième de la hauteur initiale de l'arbre ($V_k \approx 0,2-0,4$). Les études n'ont cependant pas pu mettre en évidence un processus précis qui jouerait un rôle déterminant dans la réduction de la taille du bois flottant dans les grands cours d'eau. De nouvelles observations, notamment au moyen d'un monitoring accru (point 2.5), sont nécessaires pour mieux comprendre les processus à l'œuvre et quantifier les principaux facteurs qui influent sur la réduction.

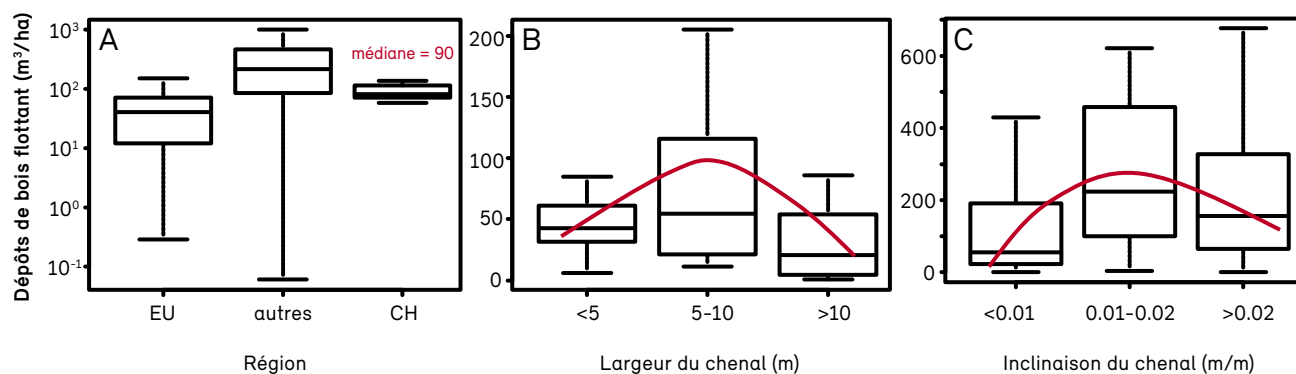
La majeure partie des morceaux de bois flottant mesurés ont moins de 2 m de longueur (38 %) et un diamètre inférieur à 0.15 cm (47 %). En général, ces morceaux relativement petits ne représentent pas un danger majeur d'embâcle, sauf si le débit de bois flottant est (entièrement) saturé (point 2.1.1). Les grands morceaux jouent en revanche un rôle crucial du point de vue de l'évaluation des dangers, puisqu'un grand tronc suffit en règle générale pour provoquer un embâcle aux points critiques tels que les ponts. Les événements de crue avec un important transport de bois flottant (comme en août 2005) sont des événements extrêmes et doivent être globalement traités

de façon très conservatrice. Si, comme l'indique la Fig. 35, les cours d'eau étudiés peuvent transporter des morceaux de plus de 10 m et d'un diamètre entre 0.4 et 0.6 m (selon la capacité de transport, cf. point 2.1.2), l'évaluation des dangers et le dimensionnement des ponts ou des ouvrages de rétention devraient partir de ces tailles maximales. À titre d'exemples d'application concrète, on peut citer le calcul de la probabilité d'embâcle (point 3.1) en fonction de la longueur des troncs ou l'estimation de l'exhaussement du niveau d'eau (point 3.3.1) et de la revanche à l'aide du diamètre des bois (point 3.5).

Dans le contexte de l'évaluation des dangers, il convient aussi de tenir compte de la largeur du chenal, qui peut limiter le transport fluvial du bois ; les morceaux de bois d'une longueur inférieure à la largeur du chenal doivent être considérés comme pouvant être mobilisés (Dixon et Sear, 2014). Dans les torrents et les rivières de montagne jusqu'à 10 m de largeur, il faudra donc compter avec des bois flottants d'une longueur correspondant à la largeur moyenne du chenal en aval de la zone contributive potentielle (par analogie à STK, 2017). Pour les grands cours d'eau, une longueur maximale supérieure à 10 m pour les bois flottants est généralement admise (STK, 2017) ; pour la limite supérieure, on peut, pour simplifier, prendre la hauteur maximale du boisement riverain. Pour estimer la situation, on peut procéder à des inspections sur le terrain ou s'aider du modèle de la hauteur de la végétation de l'IFN (Ginzler, 2018).

Fig. 38 : Dépôts de bois flottant dans les cours d'eau

Diagrammes en boîtes présentant les dépôts de bois flottant sur des sites en Suisse, dans l'Union européenne et dans d'autres régions du monde (390 sites au total) (A) ; dépôts de bois flottant sur des sites européens selon la largeur du chenal (B) et la déclivité du chenal (C).



2.3 Dépôt de bois flottant dans le lit du cours d'eau

Comme l'ont montré de nombreuses études menées sur différents bassins versants, la quantité de bois flottant déposée dans le lit du cours d'eau (dépôts de bois flottant) peut considérablement varier selon l'emplacement dans le bassin versant. Lors du projet *WoodFlow*, on a procédé à une analyse de la base de données constituée par la littérature scientifique sur le thème du bois flottant dans les cours d'eau, en particulier les dépôts de bois flottant exprimés en volume de bois par hectare de lit de cours d'eau (m^3/ha). L'analyse a porté sur 390 sites dans diverses régions du monde (Ruiz-Villanueva et al. 2016c), avec une attention particulière accordée aux sites européens et suisses (Fig. 38). Les dépôts de bois flottant dans le chenal sont un facteur clé pour quantifier la charge de bois flottant en cas de crue. Ils ont été répartis en trois classes selon la largeur du chenal (Fig. 38B) et utilisés comme variable d'entrée pour les approches SIG développées au chapitre 1.

Dans les cours d'eau suisses, la médiane des dépôts de bois flottant est d'environ $90 \text{ m}^3/\text{ha}$ (moyenne = $102 \text{ m}^3/\text{ha}$). Cette valeur est du même ordre de grandeur que dans les cours d'eau européens, mais elle est inférieure à celle des cours d'eau d'autres pays (p. ex. USA, Canada, Chili ou Australie). Cette différence s'explique par le fait que l'influence de l'homme sur les cours d'eau est moins forte aux USA, en Amérique du Sud et en Australie qu'en Europe et que ces derniers y sont plus proches de leur état naturel. Pour la Suisse, l'analyse a porté sur seulement dix cours d'eau, ce qui ne permet pas de rendre compte de la variabilité élevée des cours d'eau du pays. La relation entre les dépôts de bois flottant et la taille du bassin versant ainsi que la largeur et la déclivité du chenal est non linéaire. Les dépôts de bois flottant les plus importants se trouvent dans les bassins versants présentant une largeur et une déclivité de chenal moyennes. Le dépôt augmente lorsque le chenal s'élargit et que sa déclivité diminue. Les dépôts de bois flottant peuvent être influencés par d'autres variables comme la limitation latérale (c.-à-d. le rapport entre la largeur du chenal et celle du fond de la vallée), la sinuosité, la rugosité du chenal, les activités sylvicoles comme les coupes de bois et d'autres interventions humaines sur le chenal qui influencent les

caractéristiques du débit. Il est important de noter que les dépôts de bois flottant se modifient au fil du temps, raison pour laquelle les relevés doivent être répétés. Pour pouvoir le quantifier de façon différenciée, il faudrait procéder à l'observation systématique de plusieurs cours d'eau présentant des morphologies, des végétations riveraines et des régimes de courant variables et faisant l'objet de différentes interventions humaines.

2.4 Iber-Wood : modélisation numérique 2D du transport et du dépôt du bois flottant

2.4.1 Description du modèle et données d'entrée

Iber-Wood est un modèle Euler-Lagrange bidimensionnel qui combine le transport de morceaux de bois flottant individuels avec l'hydrodynamique (Bladé et al., 2014 ; Ruiz-Villanueva et al., 2014a). *Iber-Wood* ayant été décrit dans plusieurs publications, nous traitons ici seulement des nouveautés et du guide de l'utilisateur élaboré à l'occasion du projet *WoodFlow*. *Iber-Wood* utilise la méthode des volumes finis pour résoudre les équations 2D de Saint-Venant pour l'hydrodynamique, les équations RANS pour les turbulences et les équations d'Exner pour le transport des sédiments. *Iber-Wood* simule des morceaux de bois cylindriques individuels (troncs d'arbre) avec et sans racine (Comper et al., 2018), dont le mouvement initial est déterminé par le calcul de l'équilibre des forces qui agissent sur le centre de gravité du tronc. Le calcul de l'entraînement initial est par conséquent entièrement dynamique. Les principaux paramètres des équations déterminantes sont la densité du bois, l'orientation du tronc par rapport à la direction de l'écoulement, la longueur et le diamètre du tronc, le coefficient de frottement entre le tronc et le lit du cours d'eau et le coefficient de résistance du tronc dans l'eau. Deux mécanismes de transport sont possibles selon la flottabilité et les conditions de courant : dans l'un, les troncs flottent, et dans l'autre, ils sont charriés le long du fond du lit. Les troncs peuvent se tourner en s'adaptant au champ de vitesse du courant. Ils peuvent aussi interagir entre eux et avec les berges et les ouvrages situés dans le cours d'eau ou au bord de celui-ci (pour des détails voir Ruiz-Villanueva et al., 2014b). Des valeurs standard sont proposées pour les coefficients et les variables utilisés dans les calculs du transport du bois. Les valeurs qui figurent dans la litté-

rature courante sont également indiquées dans le guide de l'utilisateur *Iber-Wood*.

Pour réaliser une simulation avec *Iber-Wood*, il faut disposer des données d'entrée habituelles pour un modèle hydraulique et des données d'entrée pour le bois :

1. Établir ou importer la géométrie à l'aide d'un MNT
2. Attribuer les paramètres d'entrée (p.ex. valeurs de rugosité)
3. Définir les conditions limites (input et output) et initiales pour le débit, le bois flottant et éventuellement le transport de sédiment (s'il est pris en considération). Pour les conditions initiales, la position exacte de chaque tronc d'arbre, les dimensions de celui-ci (longueur et diamètre), sa densité et son orientation pour le premier intervalle de temps (ou un intervalle quelconque) constituent les données d'entrée.

4. Fixer les autres paramètres de simulation (p.ex. durée du calcul, paramètres du schéma numérique, exigences pour des modules supplémentaires, etc.).

Les principaux résultats d'*Iber-Wood* concernant l'hydraulique et le bois sont :

- la profondeur d'écoulement, la vitesse d'écoulement, la hauteur d'eau spécifique, le nombre de Froude, le diamètre critique, la contrainte de cisaillement du fond du lit (pour chaque intervalle temporel et les valeurs maximales pour l'ensemble de la situation),
- la position, l'angle et les caractéristiques de chaque tronc pour chaque intervalle temporel et le nombre définitif des troncs déposés et emportés.

Le projet *WoodFlow* a permis d'améliorer les capacités d'*Iber-Wood* et de résoudre certaines limitations liées au programme initial. Une des principales améliorations est

Fig. 39 : Comparaison des résultats des essais en laboratoire et de la modélisation numérique avec *Iber-Wood*

Distance de transport (médiane) des morceaux de bois flottant selon leur longueur et leur diamètre, morceaux de bois de même taille, mais avec un débit variable et morceaux de bois avec et sans racine.

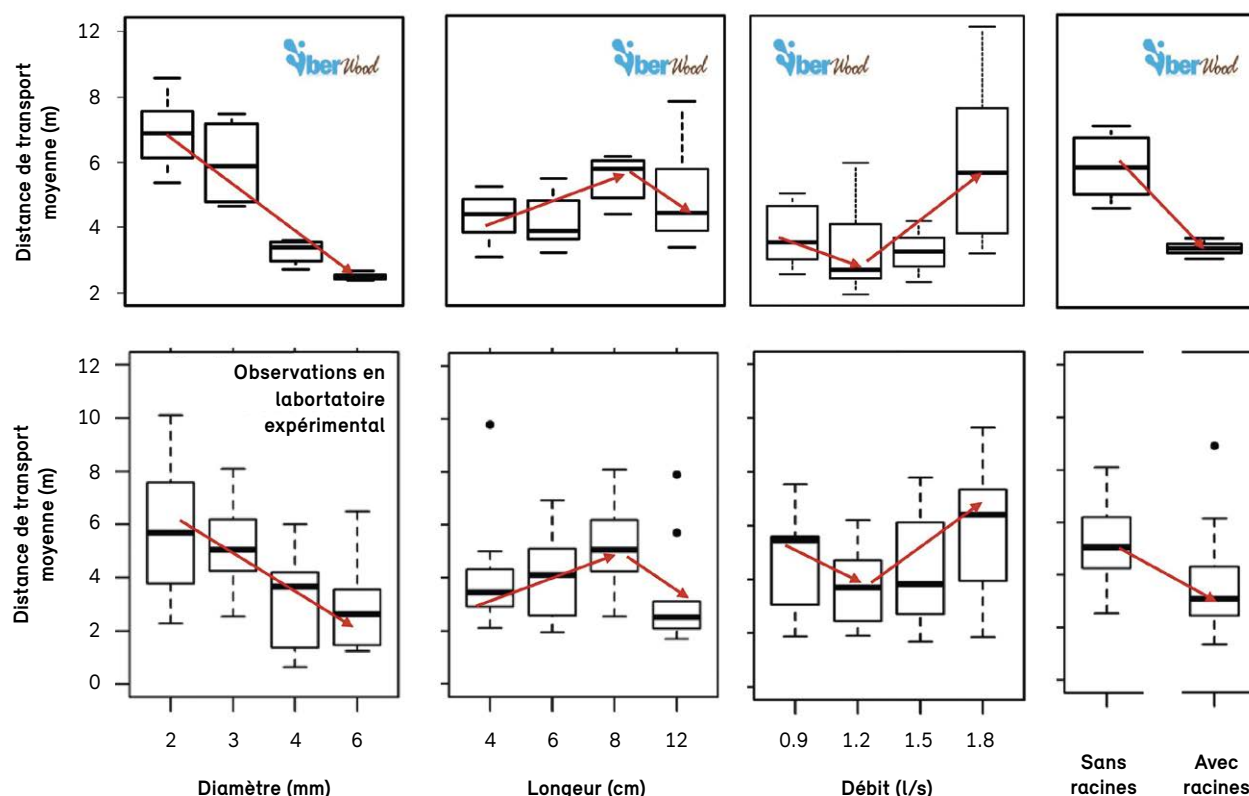
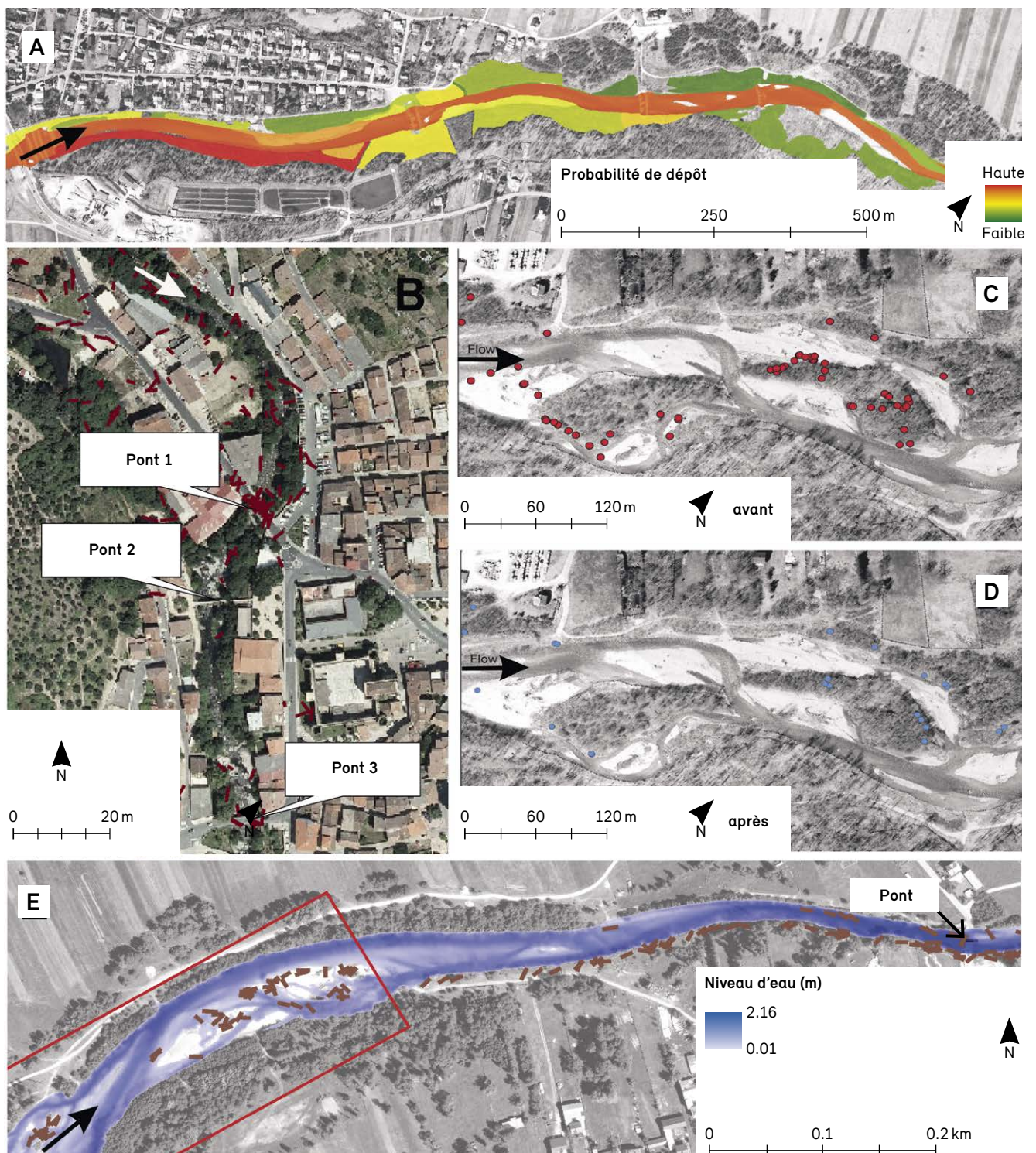


Fig. 40: Exemples de résultats de simulations réalisées avec Iber-Wood

(A) Probabilité de dépôt sur la base de calculs probabilistes d'ensemble pour différents scénarios (Ruiz-Villanueva et al., 2016a); (B) identification de profils transversaux critiques (Ruiz-Villanueva et al., 2014c); (C-D) remobilisation de bois dans le chenal (points rouges et bleus) après un événement de crue (Ruiz-Villanueva et al., 2016b); (E) modèles de dépôt de morceaux de bois flottant (traits bruns) et identification d'un tronçon du chenal à capacité de rétention élevée (rectangle rouge) (Ruiz-Villanueva et al., 2017).



qu'il est désormais possible de simuler les troncs non plus seulement sous la forme de cylindre (sans racines), mais aussi avec leur souche. Les autres améliorations concernent les interactions entre les troncs, considérées jusqu'ici comme élastiques, et l'estimation des dépôts. Le projet *WoodFlow* a en outre permis d'entièrement valider le transport des troncs sur le fond du lit. Il a en outre été l'occasion d'étudier en détail la dynamique de transport dans des conditions instables et l'interaction entre les troncs d'arbre et les aménagements et d'intégrer les résultats dans *Iber-Wood* (voir en complément sur ce point Ruiz-Villanueva et al., 2019c et le point 3.4.). *Iber-Wood* est disponible sur demande (www.woodflow.ch).

2.4.2 Exemples d'application

Au cours des dernières années, *Iber-Wood* a permis à plusieurs reprises de modéliser avec succès le transport de bois flottant et fourni des résultats très satisfaisants et fiables. L'étape suivante a consisté dès lors à tester la capacité d'*Iber-Wood* de simuler le transport du bois flottant dans un chenal à géométrie complexe, dans lequel les troncs sont emportés non seulement par flottement, mais aussi sur le fond du lit. Avec leurs cheminements d'écoulement complexes et dynamiques, leurs bancs de gravier et leurs zones peu profondes, les cours d'eau ramifiés offrent une occasion unique d'étudier les phénomènes complexes par lesquels le bois flottant est apporté, reste accroché et se dépose dans le chenal. Alors qu'ils sont importants pour la gestion du bois flottant, ces aspects posent des difficultés considérables à la modélisation. Comme il n'existe pas de données provenant de mesures, un modèle physique avec des données d'entrée détaillées a été utilisé pour valider les résultats de la modélisation (cf. aussi point 3.4). Lors du projet *WoodFlow*, la modélisation numérique a été utilisée pour (1) réaliser une analyse de sensibilité des principales variables d'entrée, (2) fournir des résultats pouvant être reproduits et comparés lors d'essais en laboratoire et (3) élargir les scénarios simulés en laboratoire de façon à pouvoir approfondir notre compréhension de la dynamique du bois flottant dans des paysages fluviaux ramifiés présentant des conditions non stationnaires (à l'instar de la dynamique observée sur la Singine). Au terme d'essais menés avec succès, la modélisation numérique a pu être précisée et affinée pour être encore plus proche de la réalité, notamment en ce qui concerne l'interaction entre les troncs et le lit du cours d'eau dans le cas d'un régime de transport le

long de celui-ci et la formation de grandes accumulations comptant plus de trois troncs. La distance parcourue par les troncs a servi de variable de comparaison. Les résultats montrent qu'*Iber-Wood* peut reproduire de façon satisfaisante les observations effectuées en laboratoire (Fig. 39).

2.4.3 Recommandations et remarques importantes

Pour procéder correctement à une simulation hydrodynamique, des connaissances en hydraulique, en dynamique d'écoulement et en modélisation numérique sont nécessaires. *Iber-Wood* est un modèle hydrodynamique bidimensionnel qui se base sur l'hypothèse d'une répartition hydrostatique des pressions et d'une vitesse égale à toutes les profondeurs de l'eau. L'hypothèse d'une pression hydrostatique est posée pour les cours d'eau et les courants de marée dans les embouchures non stratifiées et celle d'une répartition homogène de la vitesse, pour les cours d'eau et les embouchures à condition que des couches ne se forment pas en raison de la teneur en sel, de la température ou du vent. Les modèles bidimensionnels ne permettent pas de bien reproduire les systèmes fluviaux complexes, l'écoulement autour d'obstacles ou les vitesses d'écoulement qui dépendent de la profondeur. La gestion des fronts secs ou humides dans *Iber-Wood* est stable, conservative et non diffuse, ce qui signifie que les fronts ne mènent pas à des instabilités numériques même lorsque les berges sont abruptes. Comme *Iber-Wood* simule seulement l'écoulement de l'eau claire (avec ou sans transport de sédiment), le modèle ne doit pas être utilisé pour simuler d'autres écoulements comme les laves torrentielles ou les avalanches.

Iber-Wood peut être utilisé pour analyser le danger lié au bois flottant et modéliser le transport et le dépôt de bois flottant. Il permet de reconstituer la manière dont se forme un dépôt de bois et d'identifier les sites présentant une probabilité d'embâcle élevée (Ruiz-Villanueva et al., 2014b) ainsi que les infrastructures critiques situées dans les cours d'eau et au bord de ceux-ci (Ruiz-Villanueva et al., 2014c). Il peut en outre être utilisé pour reconstruire des événements de crue passés, tester des hypothèses (p.ex. analyser les facteurs qui influencent le transport de bois flottant dans différentes morphologies de cours d'eau) ou analyser les scénarios de crue possibles pour différentes périodes de récurrence ou utilisations du sol.

Le temps de calcul pour une simulation peut aller de quelques minutes à plusieurs heures; cela dépend de l'ordinateur utilisé, de la taille du modèle (p. ex. de la longueur du cours d'eau), de la taille et du nombre des éléments du maillage de calcul, des conditions hydrauliques (p. ex. la durée de l'hydrogramme) et du nombre de troncs inclus dans la simulation. Les résultats de la modélisation peuvent être analysés directement dans *Iber-Wood* ou exportés dans un logiciel SIG pour produire des cartes ou procéder à d'autres analyses spatiales. Il est aussi possible de réaliser différents types de graphiques. La Fig. 40 présente différents résultats obtenus avec *Iber-Wood*, retravaillés sur un fond cartographique.

2.5 Monitoring du bois flottant : vue d'ensemble des méthodes

Ce point donne une vue d'ensemble des approches qui permettent de relever et d'estimer les dépôts, la mobilisation et le transport de bois flottant : les inspections sur le terrain, la vidéosurveillance et l'analyse systématique de photos aériennes (y c. celles réalisées par des drones). Des exemples de cas illustrent ensuite ces différentes approches. Les données fournies par le monitoring du bois flottant sont particulièrement utiles pour l'analyse des événements, l'entretien des cours d'eau après un événement et le relevé périodique de l'état d'un cours d'eau. Ces démarches ont donc aussi un caractère préventif destiné à éviter l'apparition d'une charge de bois flottant inattendue en cas d'événement.

2.5.1 Inspections sur le terrain : relevé des caractéristiques des cours d'eau et du bois

Les mesures de terrain servent essentiellement à quantifier les dépôts de bois, à identifier les zones d'origine et les processus d'apport (p. ex. glissement de terrain, lave torrentielle, érosion des berges) et à décrire la morphologie du cours d'eau et la végétation riveraine. Les dépôts de bois peuvent être mesurés de différentes façons. Waldner et al. (2009) ont par exemple utilisé l'échantillonnage en ligne, tandis que Rickli & Bucher (2006) ont relevé et inventorié tous les morceaux de bois d'un tronçon donné. Lors d'une campagne de mesures, le temps ne suffit souvent pas pour mesurer chaque morceau de bois. Une méthode efficace consiste à diviser la surface de dépôt en plusieurs

zones présentant des densités de dépôt différentes. Dans chaque zone, une ou plusieurs surfaces partielles représentatives peuvent ensuite être délimitées et tous les morceaux de bois qui s'y trouvent, mesurés. Le volume de bois déposé dans la zone concernée peut ensuite être estimé à partir de la densité mesurée.

Le volume des morceaux de bois mesurés est normalement déterminé avec la formule du cylindre (Thévenet et al., 1998). Le volume d'un dépôt de bois peut être calculé selon sa géométrie (surface et hauteur) et en tenant compte de sa porosité, à savoir des interstices d'air. Dans la littérature spécialisée, les valeurs pour la porosité vont de 50 % à 80 % (Thévenet et al., 1998). Lorsque le relevé porte sur tout le cours d'eau, il est recommandé d'indiquer le volume de bois par distance ou par surface (p. ex. $\text{m}^3 \text{ } 100^{-1} \text{ m}$, $\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ou nombre 100^{-1} m) pour faciliter la comparaison entre les différents sites et régions. Le traçage de troncs individuels peut fournir des informations très précieuses pour comprendre la dynamique du bois flottant; cette méthode n'a cependant pas été utilisée dans le cadre du projet *WoodFlow*. Le traçage fournit des résultats très précis, en particulier lorsque les distances de transport sont courtes. Les troncs sont souvent marqués avec une couleur; une plaque métallique localisable avec un détecteur de métaux peut aussi y être fixée. Le bois peut aussi être suivi à l'aide d'émetteurs (émetteur radioélectrique RFID actif et passif) (MacVicar et al., 2009) et par GPS (Ravazzolo et al., 2015). Les indications obtenues lorsque le bois flottant est ressorti des eaux, par exemple au niveau des herses (Lyn et al., 2003), dans les lacs d'accumulation (Moulin et Piégay, 2004; Seo et al., 2008), les lacs (Waldner et al., 2009) ou les bras d'un cours d'eau ramifié (Boivin et al., 2015), peuvent être utiles pour estimer le volume de bois flottant. Les données relevées lors de l'enlèvement du bois sont déjà systématiquement documentées dans certains endroits de Suisse. Comme elles représentent une information très précieuse, leur saisie continue et standardisée devrait être encouragée; le cas échéant, il faut veiller à utiliser toujours les mêmes unités de mesure. Des données de ce type ont été utilisées par exemple pour définir les formules d'estimation empiriques au point 1.5. Lors de leur utilisation, il faut tenir compte d'un facteur de masse, car les indications portent la plupart du temps sur un amas de morceaux de bois présentant une certaine porosité.

Recommandations et remarques importantes

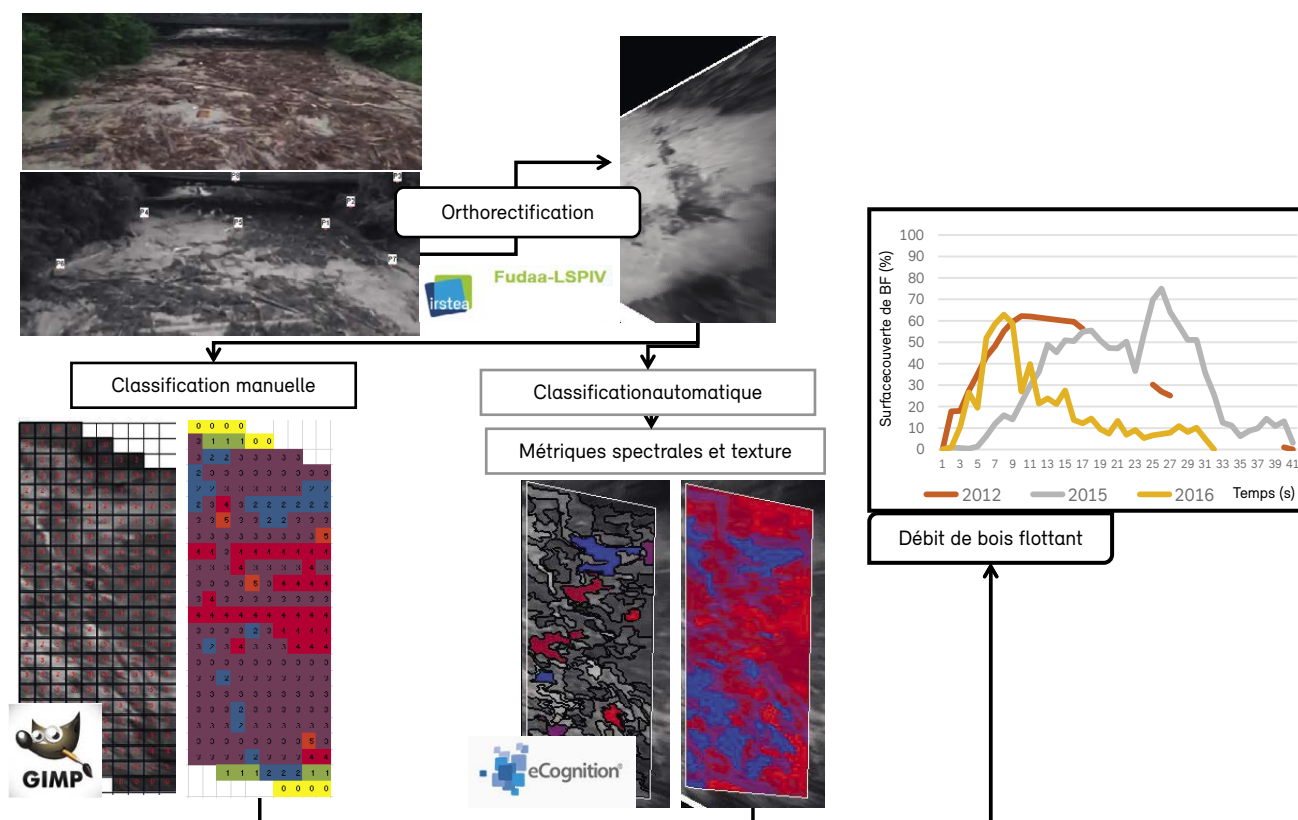
Des recommandations sur les variables à mesurer sur le terrain ont été formulées par Wohl et al. (2010) et Máčka et al. (2011). Les principales de ces variables peuvent être désormais relevées à l'aide d'un procès-verbal de terrain (annexe 5) élaboré lors du projet *WoodFlow*. Les formulaires peuvent être utilisés pour le relevé des troncs et des amoncellements et pour classer les morceaux selon leur taille; chaque morceau trouvé sur le tronçon étudié est attribué à une classe selon son diamètre et sa longueur (Rickli et al., 2016). Le procès-verbal de terrain en annexe propose sept classes pour le diamètre (entre > 10 cm et > 40 cm) et neuf classes pour la longueur (entre < 2 m et > 16 m). Ces classes peuvent être adaptées en fonction de la situation.

2.5.2 Vidéosurveillance et photographies : estimation du débit de bois flottant

Le transport de bois flottant peut aussi être observé par vidéosurveillance et au moyen de la photographie en accéléré (time-lapse). En Suisse, des caméras vidéo et des appareils de photo ont été installés le long de plusieurs cours d'eau, par exemple les appareils de la société Steiner Energie AG sur la Petite Emme et la Reuss, plusieurs appareils dans le canton d'Uri et l'installation d'observation sur la Zugl gérée par la société Geopraevent. Ces appareils ont été utilisés pour le projet *WoodFlow*, avec quelques difficultés, liées notamment à la courte période de sauvegarde de certaines données (p.ex., dans le canton d'Uri, les enregistrements vidéo et les photographies sont effacés après dix jours) et au fait que les données ne sont pas transmises en temps réel. Sur la Sihl, la nouvelle caméra vidéo installée pour contrôler la herse récemment construite permet de récolter des

Fig. 41 : Traitement des vidéos à l'exemple des crues de la Zugl en 2015

Les photos sont orthorectifiées à l'aide de points de contrôle au sol relevés par GPS et classées au moyen d'une méthode manuelle et d'une méthode automatique afin de quantifier le bois flottant.



informations quantitatives sur le transport de bois flottant en cas de crue. Sur la Zulg, l'appareil a été spécialement réglé pour observer le bois flottant. Lorsque le débit est bas, il ne prend que deux prises de vue par jour et fonctionne de façon continue seulement à partir d'un certain niveau d'eau. Ces réglages fonctionnent bien pour surveiller le transport de bois flottant, mais l'enregistrement et le transfert des données restent coûteux et doivent être encore optimisés.

Les vidéos montrant des transports de bois flottant mises en ligne par des particuliers sont toujours plus nombreuses et devraient permettre d'élargir notre compréhension des processus en jeu. Elles fournissent de nombreuses informations sur les caractéristiques du débit (niveau de l'eau, vitesse et direction approximatives), mais aussi sur les inondations et sur la façon dont le bois flottant est transporté et en quelle quantité (Ruiz-Villanueva et al., 2019b). Pour obtenir ces informations, les vidéos sont traitées en quatre étapes : (i) extraction des images ; (ii) stabilisation de la vidéo ; (iii) orthorectification et (iv) analyse quantitative (manuelle et automatique). Une fois les images individuelles extraites des vidéos, les mouvements qui pourraient déranger l'analyse sont corrigés ; divers programmes comme GIMP ou Windows Movie Maker ont été testés à cet effet. La troisième étape, l'orthorectification des images, a été réalisée avec le programme Fudaa-LSPiV (Le Coz et al., 2014 ; Hauet et al., 2014). La proportion des surfaces recouvertes de bois est ensuite estimée visuellement dans chaque image à l'aide d'une analyse statistique, avec comme objectif de déduire ensuite la quantité de bois flottant. Cette étape peut être effectuée manuellement avec le logiciel GIMP ; dans ce cas, une grille est appliquée sur les prises de vue et chaque champ est classé selon le contenu de bois flottant. Cette étape peut aussi être automatisée à l'aide du logiciel eCognition, qui détermine et classe des surfaces homogènes en s'appuyant sur des informations spectrales et la texture des pixels. Cette démarche a permis de reconstruire les débits de bois flottant sur la Zulg pour les années 2012, 2015 et 2016 (Fig. 41). L'analyse a cependant été fortement limitée par la mauvaise qualité des vidéos. Des vidéos de meilleure qualité seront nécessaires afin d'optimiser leur traitement ultérieur et développer une méthode automatique. Ce premier essai montre néanmoins les

possibilités offertes par la vidéosurveillance pour quantifier le taux de transport du bois flottant.

Recommandations et remarques importantes

Comme l'ont montré les études, l'emplacement et la conception des stations d'observation revêtent une importance primordiale. L'orientation de l'appareil, la zone couverte et le mode de transmission des données (direct ou par téléchargement manuel) influencent considérablement les coûts et la gestion de l'installation. Pour installer efficacement l'appareil, il est recommandé de tenir compte des points suivants : (i) installer l'appareil de façon à couvrir un champ maximal, avec si possible un pont ou une construction existante disposée en travers du cours d'eau ; (ii) choisir un emplacement où le bois se dépose et fixer l'appareil de façon à ce que l'angle de prise de vue soit le plus perpendiculaire possible au cours d'eau (choisir un endroit aussi élevé que possible) afin de réduire les déformations spatiales dans l'image ; (iii) tenir compte de la végétation riveraine et de son éventuelle influence sur les prises de vue (ombre, réflexions), qui pourrait être à l'origine d'incertitudes lors de la classification. Le traitement manuel des images vidéo demande beaucoup de temps. À cet égard, il serait souhaitable de pouvoir disposer de processus automatiques, par exemple de nouvelles technologies basées sur des systèmes en réseau de vision numérique, ce qui permettrait d'identifier, de suivre et d'analyser le transport du bois flottant en temps réel.

2.5.3 Télédétection : images aériennes et exploration par drones

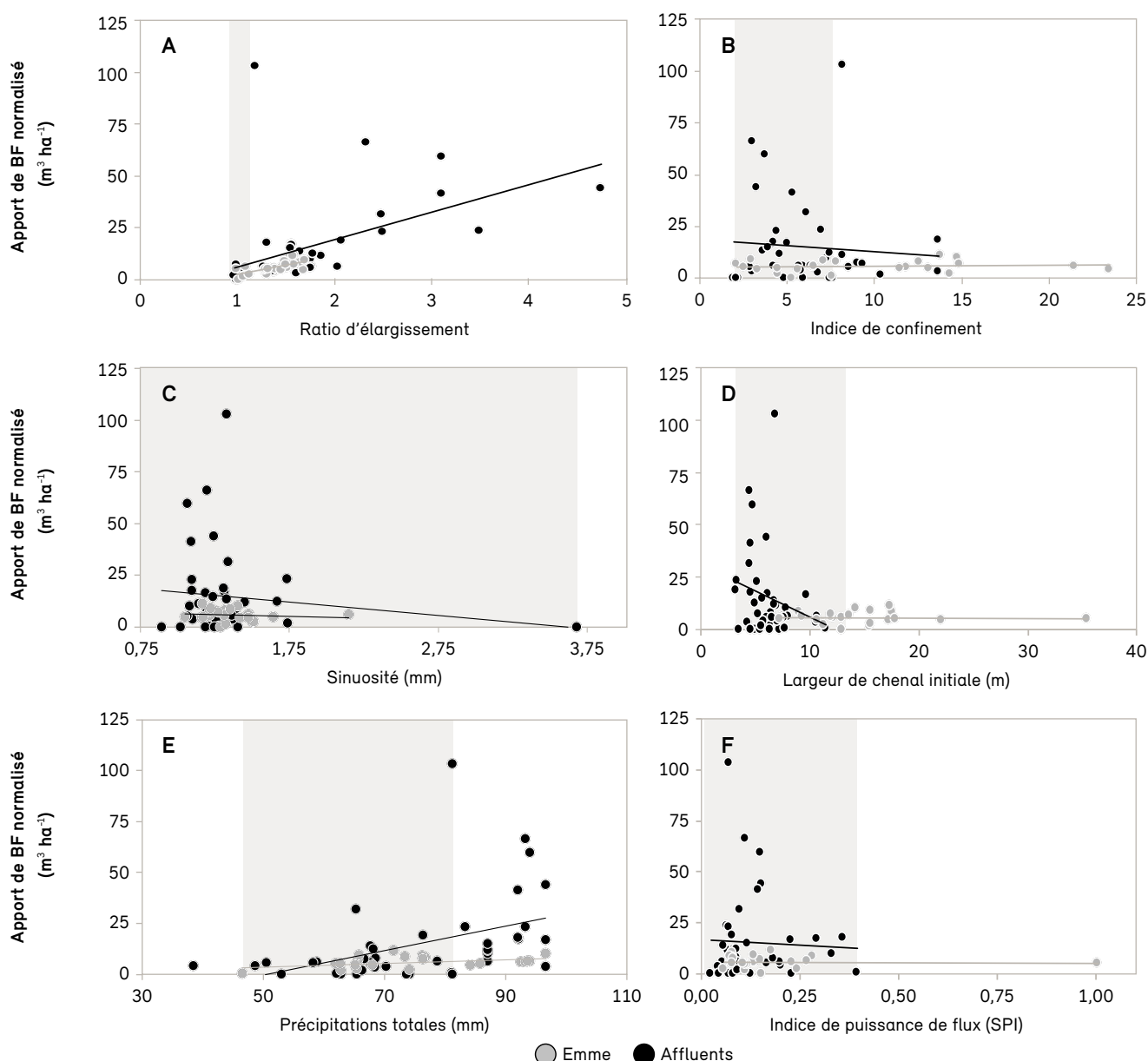
Les drones sont de plus en plus utilisés pour réaliser des prises de vue à haute résolution des cours d'eau. Les images permettent de réaliser un inventaire détaillé du bois flottant présent dans le chenal et d'analyser les modifications spatiales et temporelles des dépôts. Sur les photos aériennes et satellites, la végétation est normalement bien visible et elle peut être cartographiée à l'aide d'un SIG. Les séries chronologiques permettent d'observer les changements entre l'état antérieur et postérieur à un événement de crue. Lorsque la densité de la forêt (m^3/ha) est connue, le volume de bois flottant peut être déduit à partir de la surface de végétation érodée. Les principaux résultats de l'analyse des photos aériennes existantes de l'Emme, de la Singine et de la Zulg effectuée lors du projet *WoodFlow* sont présentés ci-après.

Les études menées sur l'Emme (analyse de la crue de 2014; Ruiz-Villanueva et al., 2018) avaient comme objectif de mieux comprendre les processus d'apport et de dépôt de bois flottant et d'identifier les facteurs qui les régissent. Les premiers résultats montrent que ces processus dépendent de certaines valeurs seuils. L'analyse des événements passés montre que la variabilité des

apports s'explique en grande partie par les précipitations. Cette variable influence aussi les principaux processus d'apport du bois comme l'érosion latérale. Les données présentent des écarts importants, ce qui signifie que la réaction des cours d'eau varie. Les résultats indiquent que la déclivité, la sinuosité et la largeur du chenal avant la crue jouent un rôle important dans l'élargissement

Fig. 42 : Apport de bois en fonction des caractéristiques et des modifications du chenal

Rapports entre le volume de bois apporté (normalisé selon la surface du chenal [$\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$]) et le coefficient d'élargissement (A), les passages étroits dans le chenal (B), la sinuosité (C), la largeur du chenal avant la crue (m) (D), la somme des précipitations (E) et la puissance d'écoulement en fonction des précipitations par mètre de largeur du chenal (SPI) (F). D'après Ruiz-Villanueva et al., 2018.



de ce dernier. De façon générale, l'apport de bois flottant augmente de manière significative dès que le rapport entre la largeur du chenal actif avant et après une crue (ratio d'élargissement) est supérieur à 2 (Fig. 42). Les passages étroits du chenal peuvent jouer un rôle important, même si l'étude de l'Emme et de ses affluents n'a pas permis d'identifier un modèle homogène. Il en va de même pour d'autres variables. Des corrélations négatives entre le volume de bois apporté et les passages étroits, la sinuosité et la largeur du chenal (avant la crue) ont ainsi été observées. Ces corrélations n'étaient cependant pas significatives et s'expliquent par le fait que l'apport principal provient des affluents, qui sont en général plus étroits et plus droits. Une corrélation positive statistiquement significative existe entre la somme des précipitations et le volume de bois apporté.

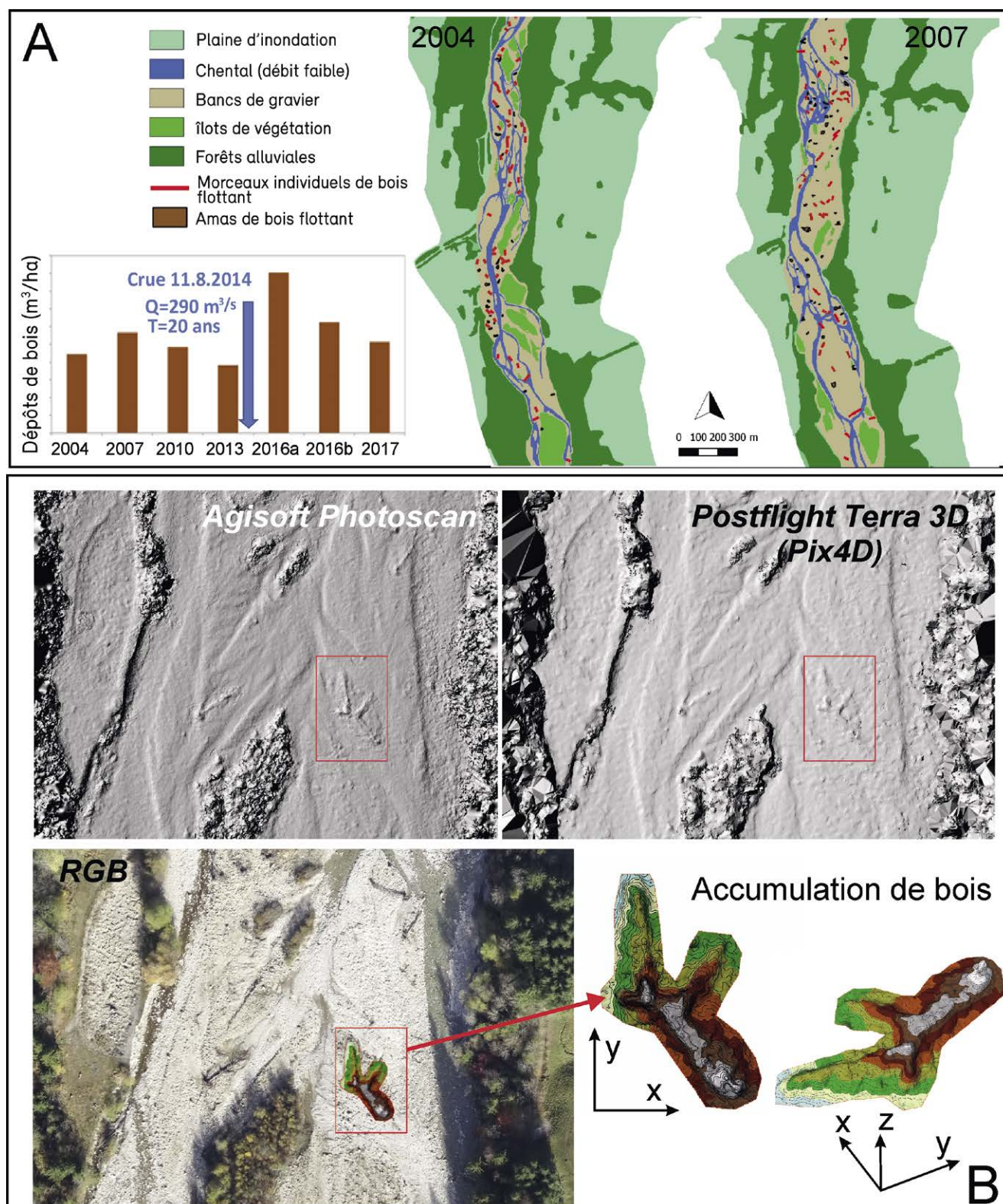
Dans le cas de la Zug, les photos aériennes montrent qu'environ 300 m³ de bois (meilleure estimation) provenant des pentes bordant le cours d'eau et des berges ont été apportés dans le chenal avant l'événement de juillet 2012 (estimations minimales et maximales : 150 et 600 m³ en fonction de la densité de végétation). Durant la période entre 2012 et 2015, la quantité de bois apportée a été d'environ 1400 m³ (meilleure estimation ; estimations minimales et maximales : 800 et 2430 m³). Une partie de ce matériel a été emporté durant la crue de juillet 2012, avec un volume de transport estimé entre 500 et 700 m³. L'analyse des photos aériennes de la Zug a aussi montré que les quantités de bois déposées dans le chenal varient considérablement. Les plus grands volumes de bois de ces dernières années ont été observés sur les images aériennes prises en 2010. Après l'événement de 2012, riche en bois flottant, la quantité de bois déposée a été nettement plus petite qu'avant. Cela confirme l'hypothèse selon laquelle la quantité de bois dans le chenal varie dans le temps et atteint son maximum entre les événements de crue. De plus, les dépôts de bois flottant le long de la Zug sont étroitement liés à l'aspect géomorphologique des tronçons. Au milieu du bassin versant, la Zug coule à travers une gorge qui représente une zone d'accumulation potentielle pour le bois flottant et joue un rôle important dans la formation de débits de bois flottant. Les dépôts et la répartition du bois flottant reflètent avant tout les taux et les sites d'apport. Étant donné que la capacité de transport augmente en aval, le transport de bois flot-

tant sur ces tronçons est davantage limité par la présence de bois que par les conditions de transport.

Pour la Singine, étudiée à la hauteur de Planfayon, l'analyse de photos aériennes historiques a été associée à des vols de drone réalisés pour le projet. L'objectif était de comprendre les facteurs qui influencent le dépôt de bois flottant dans le chenal et de décrire le rapport entre le dépôt de bois flottant d'une part et la fréquence et la puissance des crues d'autre part. La variabilité temporelle et spatiale des dépôts de bois flottant, les modifications de la végétation riveraine et de la morphologie ont également été analysées. Dans certains cas, les dimensions du bois flottant ont pu être estimées (Fig. 43A). Les résultats montrent que les événements de crue importants peuvent entraîner des modifications du couvert végétal et provoquer l'érosion de grandes surfaces. Ils montrent aussi que des événements de crue moins puissants, mais fréquents provoquent aussi de l'érosion et partant un apport de bois flottant. Les dépôts de bois dans les cours d'eau ramifiés présentent un aspect typique : le bois flottant est dispersé sur les bancs de gravier, se dépose à leur sommet ou se prend dans leur végétation. Les morceaux de bois sont le plus souvent isolés et les accumulations de plusieurs troncs sont rares.

Lors du projet *WoodFlow*, des drones (eBee senseFly RTK) ont été utilisés pour réaliser des images à haute résolution et effectuer un relevé de la topographie. La photogrammétrie SfM (Structure from Motion) permet de générer des MNS à haute résolution à partir de prises de vue RVB, grâce auxquels il est possible, non seulement, d'identifier les dépôts de bois, mais aussi, d'estimer leur volume. S'inspirant d'une méthode développée et testée au Chili (Sanhueza et al., 2019), une approche similaire pour les bassins versants en Suisse a été mise au point à l'aide de différentes méthodes et programmes. Étant donné que l'estimation des volumes de bois exige des photos aériennes à très haute résolution, le prétraitement et le traitement ultérieur des images est ici important. La Fig. 43B montre deux MNS établis avec deux logiciels différents à partir des mêmes clichés RVB pris lors d'un vol de drone effectué en novembre 2016.

Fig. 43 : Modifications spatiales et temporelles de la morphologie du cours d'eau, de la végétation riveraine et des dépôts de bois flottant
 Cartes de l'analyse par télédétection avec les unités géomorphologiques, la végétation et les dépôts de bois flottants. (A) Variabilité temporelle des dépôts dans la zone étudiée pour la période considérée; (B) mosaïque de photos RVB prises lors d'un vol de drone en novembre 2016: MNS obtenus avec les programmes Agisoft Photoscan et Postflight Terra 3D (Pix4D) et exemple d'une estimation du volume d'une accumulation de bois à l'aide d'applications SIG.



Recommandations et remarques importantes

Les prises de vue aériennes permettent de résoudre le problème des échantillons non représentatifs souvent rencontré lors des relevés de terrain, où le temps à disposition et donc la zone étudiée sont limités. Pour pouvoir mesurer précisément les morceaux de bois individuels, il faut disposer d'images à haute résolution (c.-à-d. une résolution d'au moins 10 cm selon Pecorari et al. [2007] et Comiti et al. [2008]). Les techniques modernes de télédétection (qui utilisent des photos aériennes comme LiDAR ou la photogrammétrie) peuvent être utilisées pour produire plusieurs générations de photos aériennes ainsi que des modèles numériques de terrain et de surface. Ces modèles fournissent des informations tridimensionnelles sur le terrain (MNT, sans structure de la végétation) ou sur la surface (MNS, avec structure de la végétation) pour une date de relevé donnée. L'Office fédéral de topographie swisstopo récolte depuis deux décennies des informations à haute résolution de ce type. L'utilisation accrue de drones permet de réaliser des photos aériennes et de produire dans un délai court des MNT et des MNS avec lesquels il est possible de relever et d'analyser efficacement la situation avant et après les événements par bassin versant (partiel).

3 Embâcle de bois flottant

Le présent chapitre porte sur les processus d'embâcle de bois flottant et leurs répercussions sur les ouvrages situés dans les cours d'eau. La probabilité d'embâcle contre des piles de pont a été analysée à l'aide d'essais sur des modèles physiques réalisés au Laboratoire de recherches hydrauliques, hydrologiques et glaciologiques (VAW) de l'EPF Zurich. Les mesures existantes destinées à réduire le risque d'embâcle ont aussi été analysées et développées. L'exhaussement du niveau d'eau et l'affouillement local dus à un embâcle de bois flottant ont également été étudiés sur des modèles physiques. Les résultats des essais ont servi à élaborer des modèles de prévision et à valider la modélisation numérique réalisée avec Iber-Wood. Une description détaillée des processus et des résultats se trouve dans Schalko (2018).

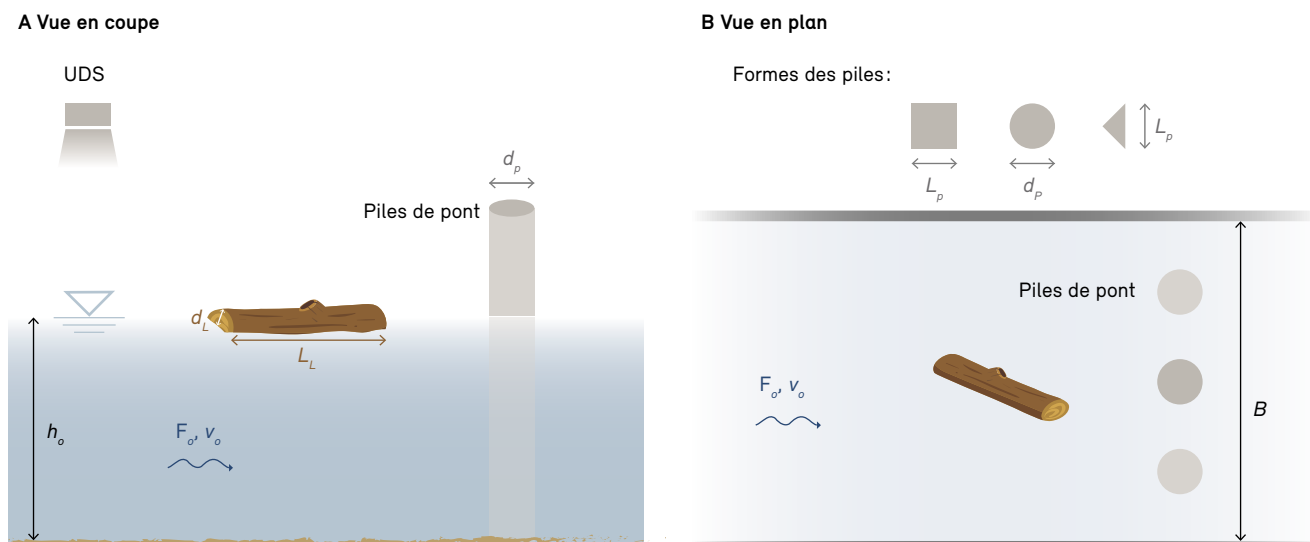
3.1 Probabilité d'embâcle contre les piles de pont

Des connaissances précises sur la probabilité d'embâcle du bois flottant (p.ex. contre des piles de pont) sont nécessaires pour améliorer l'évaluation des dangers en cas d'événements de crue. La probabilité d'embâcle contre le tablier d'un pont peut être déterminée avec les équations proposées par Lange et Bezzola (2006) ou Schmocker et Hager (2011). La probabilité d'embâcle p contre une pile de pont a été étudiée sur des modèles physiques (échelle 1:20) en variant les paramètres sui-

vants : les conditions d'écoulement en amont (F_o , h_o et v_o), les dimensions (L_L et d_L), et les caractéristiques du bois (troncs individuels ou amas de bois, densité du bois, bois avec ou sans branche) et les caractéristiques des piles (diamètre d_p , rugosité, forme et nombre). L'influence sur p d'un affouillement au pied de la pile a également été étudiée. Le dispositif d'essai est représenté de façon schématique à la Fig. 44.

Les morceaux de bois ont été introduits au milieu du canal à 1 m en amont de la pile, perpendiculairement à la direction de l'écoulement. Lorsqu'un morceau de bois restait

Fig. 44: (A) Vue en coupe et (B) en plan du dispositif d'essai avec une ou deux piles



bloqué contre la pile, le résultat était considéré comme un embâcle et le morceau était retiré du canal. L'expérience a été répétée 40 fois pour chaque condition d'essai de façon à pouvoir calculer une probabilité d'embâcle statistiquement significative avec une précision de $\pm 10\%$. Pour observer le transport d'amas de bois, 3 et 5 morceaux de bois ont été introduits, puis 40 morceaux les uns après les autres. Des photos de différentes conditions d'essai sont reproduites à la Fig. 45.

En résumé, les résultats montrent que p augmente

- lorsque la longueur du bois augmente,
- lorsque la vitesse d'écoulement amont diminue,
- lorsqu'il s'agit d'un transport d'amas de bois,
- lorsque le nombre de piles augmente.

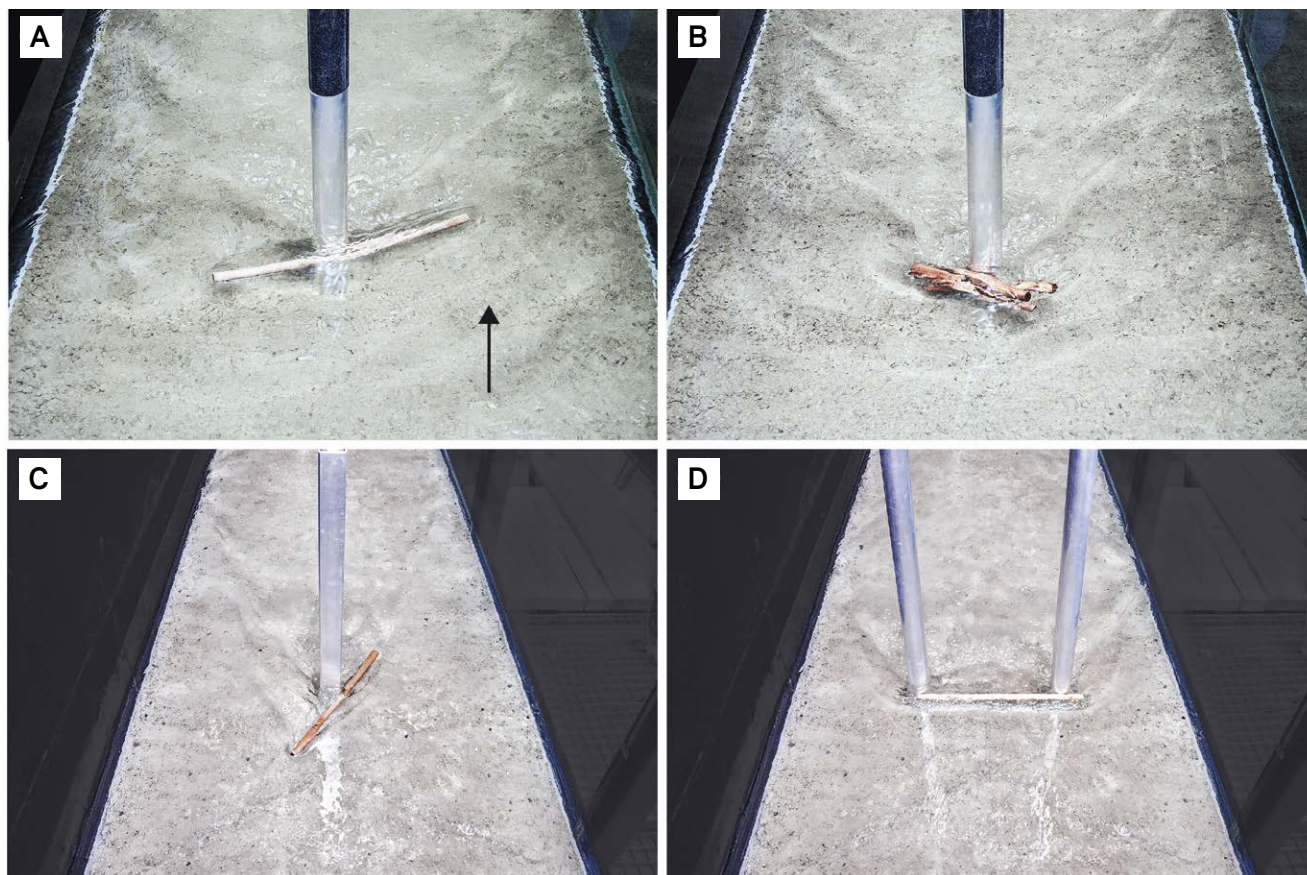
Lorsque le bois transporté flotte, la profondeur d'eau amont n'a aucune influence sur p , puisque le morceau de bois n'est pas en contact avec le fond. Les essais ont en outre montré que le diamètre et la densité du bois, la présence de branches, la rugosité et la forme de la pile ainsi que l'affouillement au pied de la pile n'influencent que faiblement la probabilité d'embâcle. Un compte rendu détaillé sur la probabilité d'embâcle se trouve dans Schalke (2018, p. 83 ss).

3.1.1 Recommandations

Pour pouvoir identifier les sections transversales de pont menacées et prendre des mesures de protection appropriées, les résultats des essais ont été résumés dans une équation d'estimation. La probabilité d'embâcle p contre une pile de pont pour le transport de troncs individuels

Fig. 45: Photos de modèles physiques visant à déterminer la probabilité d'embâcle contre une pile de pont

Essais sur modèles physiques pour déterminer la probabilité d'embâcle contre une pile circulaire pour un tronc individuel (A) et pour un amas de bois (B), contre une pile rectangulaire (C) et en présence de deux piles circulaires (D).



ou pour le transport d'amas de bois peut être estimée à l'aide de LW_p (adimensionnel) et pour $F_0 = 0.08 \dots 1.2$ et $0 \leq LW_p \leq 0.53$ ($R^2 = 0.83$):

$$p = e^{-12.7LW_p} \quad (3.1)$$

avec

$$LW_p = x_n \left(\frac{v_o^2}{2gL_L} \right)^{0.43} \left(\frac{d_p}{L_L} \right)^{0.60}, \quad (3.2)$$

où

$x_n = 1.00$ pour le transport de bois individuel

$x_n = 0.65$ pour le transport de bois encombré

Selon l'équation (3.2), c'est L_L qui influe le plus sur p , suivie par x_n , v_o et d_p .

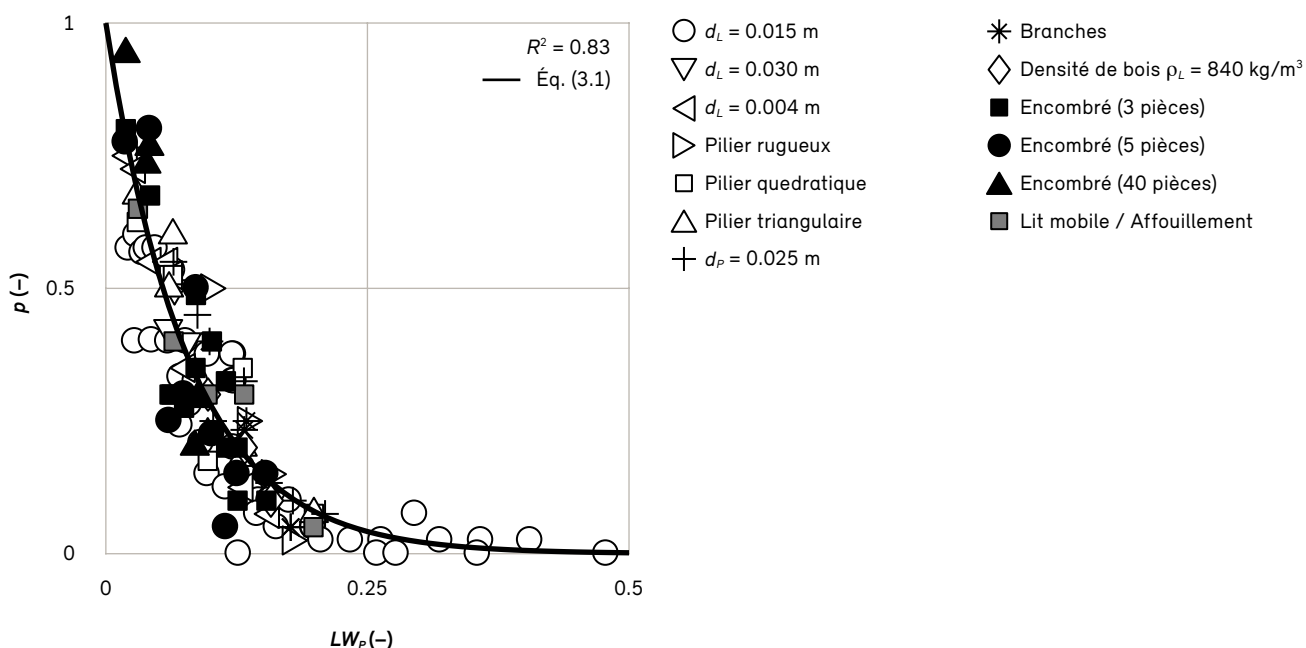
La Fig. 46 montre les valeurs que prend p en fonction de LW_p selon l'équation (3.1), LW_p variant en fonction des différents paramètres. Dans la pratique, il est recommandé, lorsque $p \geq 30\%$ et qu'un embâcle important peut avoir lieu (p. ex. sur toute la largeur du chenal), de calculer aussi l'exhaussement du niveau d'eau dû à l'embâcle de bois flottant (point 3.3) et de comparer l'élévation de l'eau pro-

voquée avec les hauteurs des berges ou des digues de protection contre les crues.

Lorsqu'il y a plus d'une pile, il s'agit de tenir compte des recommandations suivantes en fonction du rapport entre la longueur du bois et l'écartement des piles :

- $L_L > \text{écartement des piles}$: pour des valeurs v_o de 0.2 m/s à ≈ 1 m/s (échelle 1:20), $p \geq 50\%$ pour le transport de troncs individuels et $p \geq 75\%$ pour le transport d'amas de bois. Puisque les sections transversales avec deux piles ou plus représentent un risque d'embâcle accru, l'évaluation des dangers nécessite d'approfondir l'analyse; dans un tel cas, il est recommandé d'évaluer l'exhaussement du niveau d'eau dû à l'embâcle de bois flottant (point 3.3).
- $L_L < \text{écartement des piles}$: la probabilité d'embâcle peut être estimée avec l'équation (3.1). Lorsque $p \geq 30\%$ et qu'il est possible qu'un embâcle occupe toute la largeur du chenal, il est recommandé d'évaluer l'exhaussement du niveau d'eau dû à l'embâcle de bois flottant (point 3.3).

Fig. 46 : Probabilité d'embâcle contre une pile de pont selon l'équation (3.1) (ligne noire)



3.2 Mesures destinées à diminuer la probabilité d'embâcle contre les piles de pont

Pour diminuer p contre la pile d'un pont, des déflecteurs de bois flottant (Fig. 47a) et des seuils (Fig. 47b) ont été testés. Fixés à la pile et la « prolongeant » côté amont, les déflecteurs servent à orienter les morceaux de bois parallèlement à la direction de l'écoulement de façon à diminuer p . Cette solution est déjà utilisée dans certains cours d'eau du pays (Sihl, Thur). Placés légèrement en amont de la pile, les seuils génèrent, d'une part, un courant perpendiculaire à leur orientation et, d'autre part, des vagues superficielles qui peuvent éventuellement remettre en mouvement les troncs bloqués. Une présentation détaillée des mesures se trouve dans Schalko (2018, p. 154 ss).

Lors des essais en laboratoire, l'utilisation de déflecteurs dans diverses configurations n'a pas eu pour effet une diminution de p , mais a provoqué des embâcles contre le déflecteur. Les deux seuils parallèles ont par contre entraîné une diminution de p pouvant aller jusqu'à 30 % selon Δx par rapport à la pile (Fig. 48). L'influence d'un lit mobile n'a pas été étudiée en laboratoire ; il se pourrait en effet que des dépôts ou des affouillements diminuent l'efficacité de ces mesures. À noter encore que l'efficacité n'a pu être démontrée que pour certaines profondeurs d'eau et certaines conditions d'écoulement en amont. La mise en œuvre de mesures de ce type ne convient donc que dans certaines situations et doit être examinée de cas en cas.

Fig. 48 : Influence des seuils sur la probabilité d'embâcle
 Probabilité d'embâcle p en fonction de F_o pour $v_o = 0.5 \text{ m/s}$ et $L_L = 0.4 \text{ m}$ avec deux seuils parallèles ($\Delta x = 0 \dots 0.3 \text{ m}$) par rapport à l'essai de référence sans seuil.

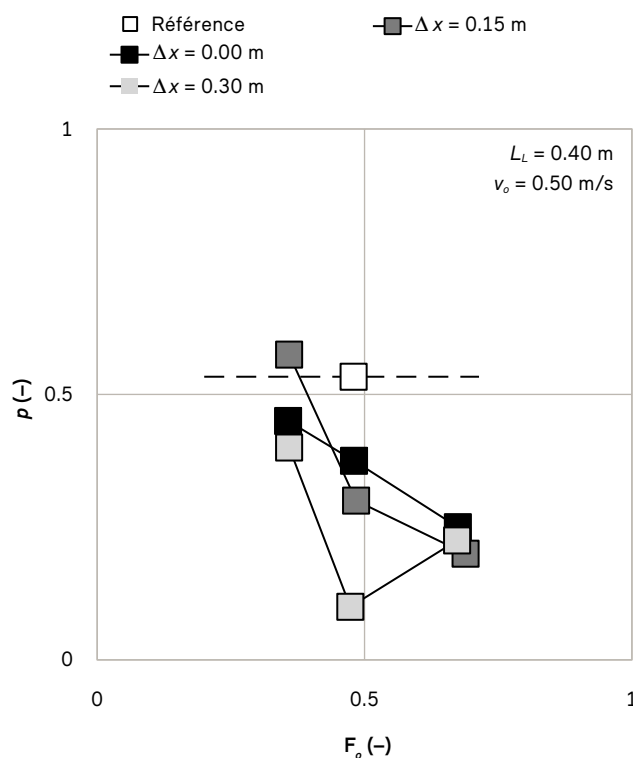
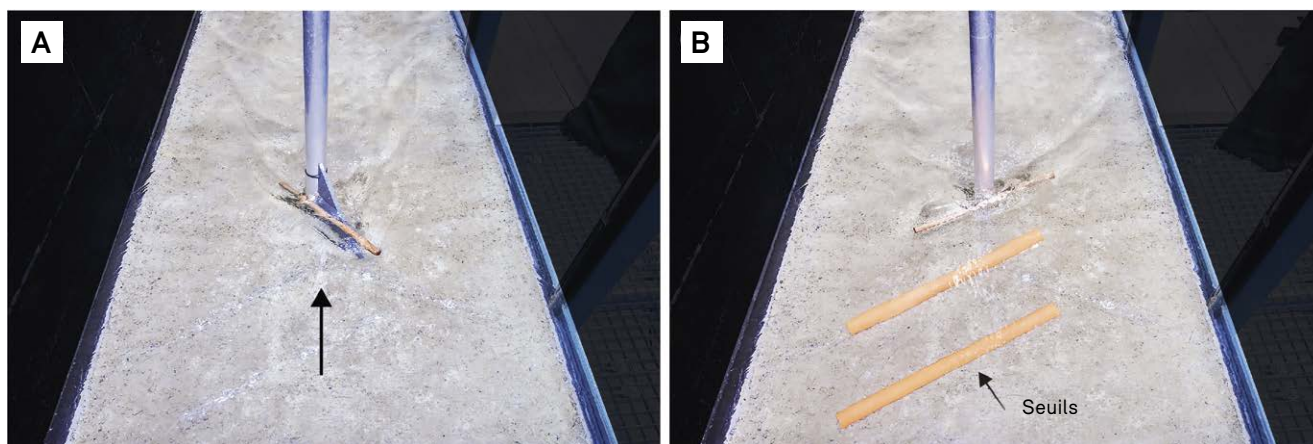


Fig. 47 : Mesures visant à diminuer la probabilité d'embâcle contre les piles de pont

(A) Déflecteurs de bois flottant et (B) seuils destinés à diminuer la probabilité d'embâcle contre des piles de pont.



3.3 Exhaussement du niveau d'eau et affouillement local dus à un embâcle de bois flottant

Lors d'un événement de crue, le transport de bois flottant peut provoquer des embâcles contre des ponts ou des barrages. Le rétrécissement de la section d'écoulement peut, d'une part, entraîner un exhaussement du niveau d'eau susceptible de causer des inondations et, d'autre part, provoquer des affouillements ou endommager l'ouvrage. Ces deux phénomènes ont été étudiés lors de trois séries d'essai (A-C) réalisées au VAW (Fig. 49a-c). L'embâcle contre un ouvrage a été simulé de manière simplifiée sous la forme d'un embâcle contre une grille. Les résultats peuvent donc aussi être utilisés pour calculer l'exhaussement du niveau d'eau immédiatement à l'amont d'une herse.

Série A : embâcle prédéfini avec un fond de lit fixe

La série A a servi à déterminer sous une forme générale (Fig. 49a) l'exhaussement du niveau d'eau résultant de différentes configurations de bois flottant. L'embâcle défini par avance a été construit entre deux grilles. Trois échelles géométriques ont été utilisées (facteur d'échelle $\lambda = 6, 30, 50$) dans le but de vérifier la similarité des modèles avec la réalité, en particulier en ce qui concerne les matériaux fins. Les conditions initiales (h_o , Q_o et F_o) et les caractéristiques de l'embâcle (L_A , d_L , $a = V_l/V_{sl}$, MF) ont été variées de façon systématique et l'exhaussement a été déterminé dans chaque configuration.

Pour les résultats relatifs à Δh résultant d'un embâcle de bois flottant prédéfini (série A), l'exhaussement relatif $\Delta h/h_o$ augmente

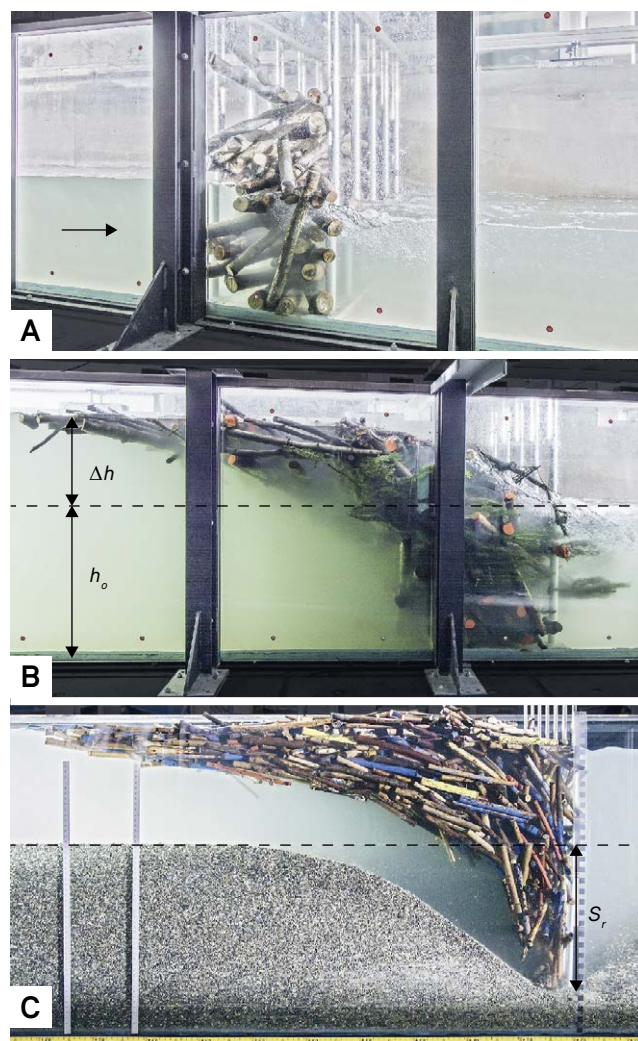
- lorsque F_o augmente,
- lorsque a diminue ou que l'embâcle devient plus compact,
- lorsque d_L diminue,
- lorsque L_A augmente dans le sens longitudinal du courant, et
- lorsque MF croît.

Une famille de modèles a été utilisée pour vérifier dans quelle mesure les résultats sont transposables aux conditions rencontrées dans la réalité (prototype). Les tests ont été effectués sur des modèles de différentes échelles

(1:6, 1:30 et 1:50), les conditions aux limites restant identiques par ailleurs. Si les résultats des modèles à plus petite échelle (1:30 ou 1:50) présentent un écart important avec ceux du modèle à l'échelle 1:6, plus proche des conditions rencontrées dans la réalité, il en résulte que les dimensions du modèle influent sur le résultat. Selon les échelles, les exhaussements du niveau d'eau présentaient des écarts moyens variant entre 3 % et 22 % pour des conditions aux limites identiques. Comme les écarts ne présentent pas de tendance claire et restent dans le

Fig. 49 : Embâcles de bois flottant contre une grille

Photos des essais sur des modèles physiques : (A) embâcle prédéfini entre deux grilles de rétention avec un fond de lit fixe; (B) embâcle naturel avec un fond de lit fixe; (C) embâcle naturel avec un fond de lit mobile et affouillement au niveau du pied de la grille $S_r \approx S_{max}$.



Images : VAW (2018)

domaine de la reproductibilité, il y a lieu de supposer que les effets d'échelle potentiels pour les petites échelles sont insignifiants.

Série B : embâcle naturel avec un fond de lit fixe

Dans la série de tests B (Fig. 49b), une grille a été ôtée et le bois flottant a été introduit par paquet, de sorte que des embâcles naturels se sont formés selon les conditions d'écoulement en amont. L'exhaussement du niveau d'eau devant la grille a été mesuré après chaque apport d'un paquet de bois flottant. Les essais ont été effectués pour deux échelles de modèles (1:6 et 1:30) en faisant varier F_o et la teneur en matériaux fins.

Les résultats relatifs à Δh résultant d'un embâcle naturel de bois flottant (série B) confirment les paramètres déterminants de la série A. Lorsque l'embâcle se forme naturellement, la surface de la grille obstruée par le bois est plus petite que dans le cas d'un embâcle prédéfini (série A), ce qui explique pourquoi l'exhaussement relatif $\Delta h/h_o$ est environ deux fois moins élevé pour des conditions aux limites identiques par ailleurs.

Série C : embâcle naturel avec un fond de lit mobile

La série C (Fig. 49c) part également d'une situation d'embâcle naturel contre une grille. Pour étudier, outre l'exhaussement du niveau d'eau, l'influence d'un éventuel affouillement, les essais ont été effectués avec un fond de lit mobile constitué d'un matériau formé de grains de même taille, dont d_m a varié. L'exhaussement du niveau d'eau et l'affouillement au pied de la grille ont été mesurés après chaque apport de paquet de bois flottant, comme dans la série B. Lorsque tout le bois flottant a été introduit, la topographie du fond du lit a été relevée.

En raison de l'affouillement, la surface d'écoulement obstruée par le bois diminue encore par rapport à la série A. Les conditions aux limites étant identiques par ailleurs, l'exhaussement du niveau d'eau ne représente que le tiers de celui mesuré dans les essais de la série A. Les résultats montrent que l'affouillement local augmente lorsque :

- q augmente,
- d_m diminue, et
- que le volume de bois flottant augmente.

3.3.1 Recommandations : exhaussement du niveau d'eau dû à un embâcle de bois flottant

L'exhaussement relatif $\Delta h/h_o$ mesuré peut être résumé au moyen de LW_A (adimensionnel) et décrit comme suit avec un rapport linéaire pour $F_o = 0.2 \dots 1.4$ ($R^2 = 0,95$) (Fig. 50) :

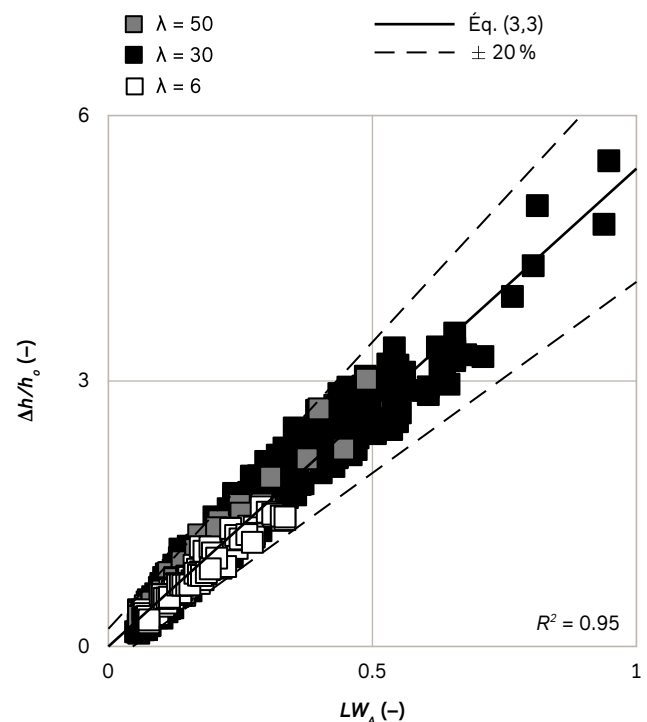
$$\frac{\Delta h}{h_o} = 5.4 LW_A = 5.4 \frac{F_o u^{1/3} (9FM + 1)}{a^{4/3}} = 5.4 \frac{F_o (L_A/d_L)^{1/3} (9FM + 1)}{a^{4/3}}. \quad (3.3)$$

Le rapport entre la longueur de l'embâcle et le diamètre du bois est décrit au moyen de u . Pour simplifier, L_A peut être déterminée à l'aide d'un embâcle rectangulaire (B) et en tenant compte de $a = V_l/V_s$:

$$L_A = \frac{V_l}{h_o B} \quad \text{et} \quad u = \frac{L_A}{d_L} = \frac{V_l}{h_o B d_L} = \frac{a V_s}{h_o B d_L}. \quad (3.4)$$

Le facteur f_A permet de prendre en considération les différentes formes d'embâcle des séries A-C (Fig. 49a-c).

Fig. 50 : Exhaussement relatif $\Delta h/h_o$ en fonction de LW_A et de l'équation (3.3) pour la série A ($\lambda = 50$, $\lambda = 30$, $\lambda = 6$) et pour un écart de $\pm 20\%$



L'exhaussement relatif $\Delta h/h_o$ peut dès lors être déterminé avec l'équation suivante :

$$\frac{\Delta h}{h_o} = 5.4 f_A \frac{F_o (a V_s / (h_o B d_L))^{1/3} (9FM + 1)}{a^{4/3}} = 5.4 f_A \frac{F_o (V_s / (h_o B d_L))^{1/3} (9FM + 1)}{a}, \text{ avec (3.5)}$$

$f_A = 1.0$ pour un embâcle prédéfini avec un fond de lit fixe (série A),

$f_A = 0.55$ pour un embâcle naturel avec un fond de lit fixe (série B), et

$f_A = 0.3$ pour un embâcle naturel avec un fond de lit mobile (série C).

Comme le montrent les équations (3.3) et (3.5), ce sont a , F_o et MF qui ont le plus d'influence sur Δh . Pour un volume de bois flottant donné V_s , $\Delta h/h_o$ peut être calculé après avoir choisi la valeur à donner à f_A en fonction du scénario retenu parmi les trois suivants :

- *scénario extrême* : pour déterminer l'exhaussement du niveau d'eau maximal, on part d'un embâcle de forme rectangulaire, avec $f_A = 1$ dans l'équation (3.3).
- *scénario intermédiaire* : lorsque l'ouvrage possède une fondation qui empêche un affouillement, on part de l'hypothèse d'un embâcle naturel avec un fond de lit solide, avec $f_A = 0.55$. Ce scénario est celui qui correspond le plus aux conditions existant dans la réalité et il est recommandé d'utiliser $f_A = 0.55$ comme valeur de départ.
- *scénario optimiste* : dans le cas d'un ouvrage où un affouillement est attendu et tolérable (p.ex. lorsque l'ouvrage est composé d'éléments possédant chacun leur fondation), on peut partir de $f_A = 0.30$ et donc d'un exhaussement du niveau d'eau moins important.

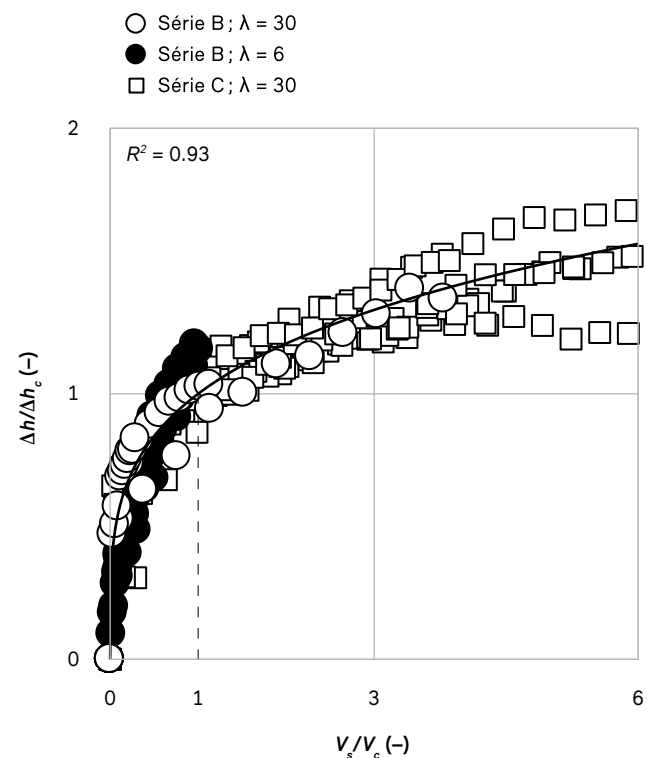
Partant des données tirées d'événements de crue passés (Bezzola et Hegg, 2007), il convient de choisir a entre $a = 2 \dots 5$. La proportion des MF peut être prise en compte à l'aide d'une analyse de sensibilité et on peut partir de valeurs entre $MF = 2 \dots 20\%$. Les données relatives aux conditions d'écoulement en amont (nombre de Froude amont F_o , vitesse et profondeur d'écoulement) peuvent être choisies sur la base de données de mesure relevées lors d'événements de crue passés (débit, géométrie du

profil transversal, niveau de l'eau). Le volume de bois flottant attendu (volume plein ou volume foisonné effectifs) peut être déterminé soit avec les formules d'estimation empiriques (point 1.5) soit avec les approches SIG géo-référencées (points 1.2 à 1.4).

Le volume de bois flottant caractéristique V_c , qui est à l'origine de l'exhaussement du niveau d'eau déterminant, peut être estimé en fonction du nombre de Froude amont et du matériau du fond du lit. Le rapport $V_c/(B h_o^2)$ (V_c relatif) correspond au volume nécessaire pour bloquer une section rectangulaire idéale de dimensions $B \times h_o \times h_o$. Pour un fond de lit fixe et $F_o = 0.3 \dots 1.5$ ($R^2 = 0.89$), V_c peut être déterminé avec l'équation

$$\frac{V_c}{B h_o^2} = 3.1 F_o \quad (3.6)$$

Fig. 51 : Ratio d'exhaussement $\eta = \Delta h/\Delta h_c$ et volume relatif de bois flottant V_s/V_c avec l'équation (3.8)



et pour un fond de lit mobile et $F_o = 0.5 \dots 1.5$ ($R^2 = 0,98$) avec l'équation

$$\frac{V_c}{Bh_o^2} = 3.1F_o \left(\frac{h_o}{d_m} \right)^{-0.20} \quad (3.7)$$

L'influence du volume de bois flottant sur l'exhaussement du niveau d'eau peut être calculée avec $\eta = \Delta h / \Delta h_c$ pour $F_o = 0.3 \dots 1.5$ ($R^2 = 0.93$); elle est présentée dans la Fig. 51

$$\eta = \frac{\Delta h}{\Delta h_c} = \left(\frac{V_s}{V_c} \right)^{1/4} \quad (3.8)$$

Pour une première estimation, Δh peut être déterminé avec les équations (3.3) ou (3.5). Pour déterminer l'influence que différents volumes peuvent avoir sur Δh , on peut utiliser l'équation (3.8) en choisissant un rapport V_s/V_c , par exemple entre 0.5 et 2. Si $V_s/V_c = 0.5$, alors $\eta = 0.84$, alors que si $V_s/V_c = 2$, $\eta = 1.19$. La variation du volume de bois flottant permet de procéder à une estimation du risque basée sur un scénario, ce qui est surtout utile pour la pratique. Il est ainsi possible d'estimer l'exhaussement du niveau d'eau résultant d'un embâcle de bois flottant pour les événements de crue avec un transport de bois important. Les équations de dimensionnement peuvent en outre être utilisées pour déterminer la hauteur des poutres des herse (barrage-peigne). Des développements détaillés sur l'exhaussement du niveau d'eau se trouvent dans Schalko (2018, p. 110 ss).

3.3.2 Recommandations : affouillement local dû à un embâcle de bois flottant

La profondeur d'affouillement maximale S_{max} (= profondeur d'affouillement contre la grille) peut être décrite avec l'équation suivante en fonction de différents paramètres :

$$S_{max} = S_A d_{90} = 0.86 \left(\frac{q}{\sqrt{(s-1)gd_m^3}} \right)^{0.85} \left(\frac{V_s}{V_c} \right)^{0.30} d_{90}, \quad (3.9)$$

où $s \approx 2,65$. La profondeur d'affouillement maximale relative S_{max}/d_{90} peut ainsi être calculée pour $F_o = 0.5 \dots 1.5$, $S_A = 0 \dots 120$ et $S_{max}/d_{90} > 2$ ($R^2 = 0,97$). L'affouillement dû à un embâcle de bois flottant peut être déterminé pour différentes conditions d'écoulement en amont, différents matériaux du fond de lit et différents volumes de bois flottant. Il est recommandé d'utiliser l'équation (3.9) pour cal-

culer l'affouillement local dû à un embâcle de bois flottant sur toute la largeur, par exemple contre une herse, et non pour un affouillement au pied d'une pile. Les paramètres d'entrée pour les conditions d'écoulement en amont peuvent être déterminés, comme pour Δh et les valeurs de référence pour le fond du lit, sur la base des analyses granulométriques. Dans un premier temps, S_{max} doit être comparée avec l'affouillement maximal possible et admissible. Si un affouillement est possible et tolérable, on peut choisir $f_A = 0.3$ pour calculer Δh avec l'équation (3.5). Des développements détaillés sur l'affouillement local sont présentés dans Schalko (2018, p. 142 ss).

3.4 Modélisation numérique du processus d'embâcle

Le programme 2D *Iber-Wood* (point 2.4) a été utilisé pour simuler un choix d'essais réalisés sur modèle physique portant sur la probabilité d'embâcle (point 3.1) et sur l'exhaussement du niveau d'eau dû à un embâcle (point 3.3) (Fig. 52). Les principaux enseignements que l'on peut tirer de ces simulations sont les suivants.

- Le transport de bois flottant et son orientation peuvent être bien reproduits.
- Comme dans les essais sur modèle physique, les simulations numériques doivent être répétées pour réduire les incertitudes en ce qui concerne l'estimation de p .
- En moyenne, *Iber-Wood* sous-estime p ; on observe des écarts de $\approx 33\%$ par rapport aux essais en laboratoire.
- *Iber-Wood* permet de bien prendre en compte l'influence du bois flottant ou des embâcles sur l'hydrodynamique. L'exhaussement du niveau d'eau était plus élevé de $\approx 40\%$ par rapport aux essais sur modèles physiques. Il tend à être surestimé étant donné qu'un modèle 2D ne peut pas reproduire la compacité d'un embâcle et, partant, ses caractéristiques tridimensionnelles. *Iber-Wood* pourrait éventuellement être approprié pour une première estimation conservatrice de l'exhaussement.

En résumé, on peut dire qu'*Iber-Wood* est un programme de simulation très prometteur pour estimer le transport et le dépôt de bois flottant et l'influence d'un embâcle sur l'hydrodynamique. Des tests de validation systéma-

tiques sont cependant encore nécessaires avant de pouvoir passer à une application pratique. On trouvera des développements détaillés sur la modélisation numérique dans Schalko (2018, p. 162 ss).

3.5 Revanche partielle en raison du transport de bois flottant dans le cas des ponts

La revanche est définie comme la distance entre le niveau de l'eau et le sommet d'une berge ou le bord inférieur d'un pont (KOHS, 2013). Selon Hunzinger (2014), elle est un paramètre essentiel pour évaluer la capacité d'écou-

lement et pour améliorer l'évaluation des dangers et le dimensionnement des mesures de protection.

En Suisse, on a longtemps utilisé pour la revanche une grandeur fixe (p.ex. 1 m) ou l'énergie cinétique ($v^2/2g$). En 2013, la CIPC et l'AASAE a élaboré une méthode de façon à pouvoir déterminer la revanche nécessaire de façon harmonisée. Dans cette approche, f_e réunit trois composantes :

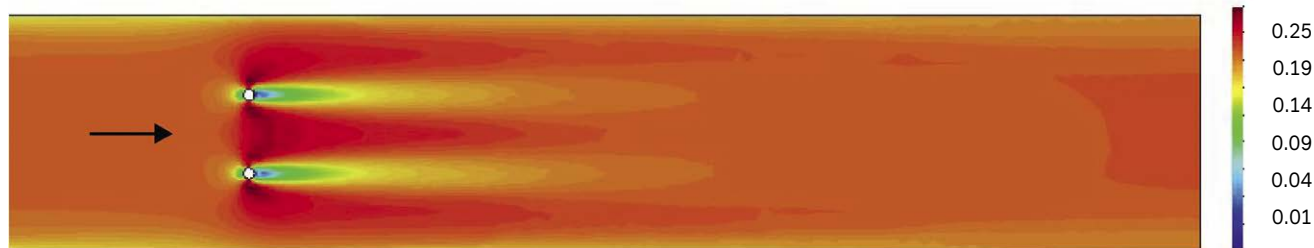
1. f_w : revanche partielle en raison d'incertitudes dans l'estimation de la ligne d'eau (p. ex. pronostic de la cote de fond, rugosité, etc.)

Fig. 52 : Processus d'embâcle dans le cas de deux piles de pont simulé avec *Iber-Wood*

Vitesse d'écoulement avant l'introduction de bois (a) et après (b); (c) profondeur de l'eau qui en résulte.

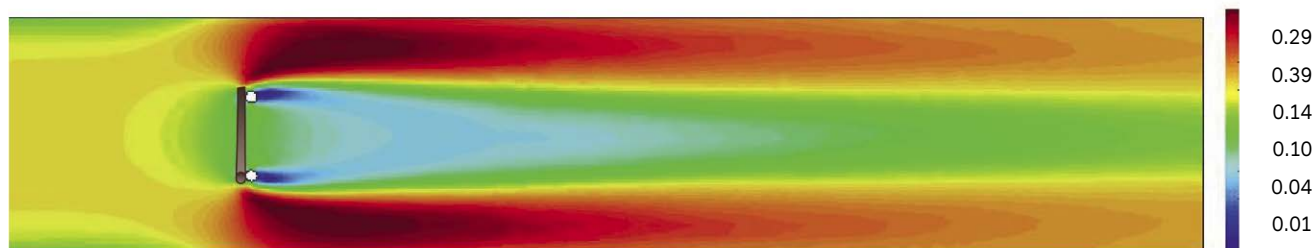
(a) Intervalle temporel : 150 s (avant l'addition de bois flottant)

Vitesse d'écoulement en direction x [m/s]



(b) Intervalle temporel : 300 s (après l'addition de bois flottant)

Vitesse d'écoulement en direction x [m/s]



(c) Intervalle temporel : 300 s (après l'addition de bois flottant)

Profondeur d'eau [cm]



2. f_v : revanche partielle en raison de la formation de vagues et de l'exhaussement du niveau d'eau causé par des obstacles,
3. f_t : revanche partielle en raison d'une section d'écoulement supplémentaire nécessaire pour le passage des troncs ou des débris de bois flottant sous les ponts et au niveau des berges à proximité des ponts contre les piles desquels se forment par exemple des embâcles ou des exhaussements du niveau d'eau.

La revanche nécessaire se calcule comme suit :

$$f_e = \sqrt{f_w^2 + f_v^2 + f_t^2} \quad (3.10)$$

Les revanches partielles f_w et f_v sont clairement définies et peuvent être calculées au moyen d'équations. Pour la revanche partielle f_t , on part de valeurs entre 0.3 m et 1 m (tab. 1 dans Hunzinger, 2014). Ce système de classe fait qu'il est difficile de fixer f_t de façon transparente.

3.5.1 Recommandations

L'approche présentée ci-après utilise un arbre de décision pour déterminer f_t à l'aide de quatre paramètres :

$$f_t = f(\text{Typ}, K, C, d), \quad (3.11)$$

- **Type** : on distingue deux types de bois, les souches et les troncs (Fig. 53).
- **Facteur de transport du bois flottant K** : le transport de bois flottant peut porter sur des troncs individuels ou sur des amas de bois (Braudrick *et al.*, 1997, point 2.1). Pour les souches, on peut choisir $K = 1.5$ pour les deux modes de transport. Pour les troncs, $K = 1.5$ pour le transport de troncs individuels et $K = 2$ pour le transport d'amas de bois.
- **Facteur de probabilité d'embâcle C** : ce facteur dépend des conditions d'écoulement en amont, de la longueur du bois, des dimensions de la section et des caractéristiques du pont. La probabilité d'embâcle p pour un tablier de pont peut être calculée avec les équations proposées par Schmocker et Hager (2011) ou Lange et Bezzola (2006). Pour les piles, p (point 3.1.) peut être déterminée selon Schalko (2018). Lorsque $p \leq 30\%$, $C = 1$; avec $30\% < p < 70\%$, $C = 1.25$ et avec $p \geq 70\%$, $C = 1.50$. Lorsque la probabilité d'embâcle n'est pas connue ou ne peut pas être calcu-

lée, il est recommandé d'estimer C en fonction de deux paramètres : (1) le rapport entre la longueur du bois et la largeur effective de la section L_L/W_{eff} , avec une valeur limite de 0.5 (Fig. 54), et (2) la rugosité du pont (selon Schmocker & Hager, 2011). Lorsque $L_L/W_{eff} \leq 0.5$ et que le pont a un revêtement rugueux, C s'accroît.

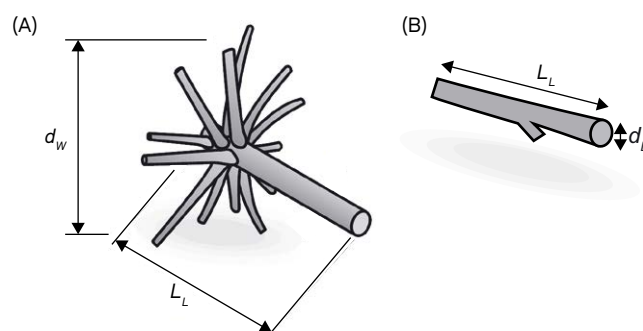
- **Diamètre du bois d** : le diamètre caractéristique est à déterminer pour les deux types de bois. Pour les souches, il est recommandé de calculer un diamètre moyen d_w^* selon Lange et Bezzola (2006), avec $d_w^* = (d_{w,max} d_{w,min} L_L)^{1/3}$. Pour les troncs, d_L peut être déterminé sur la base des données de l'IFN.

Conçu à partir des enseignements du projet *WoodFlow*, l'arbre de décision représenté à la Fig. 54 doit permettre de simplifier le choix des paramètres. La revanche partielle f_t peut être calculée ainsi :

$$f_t = \max\{K C d; 0.3\} \text{ en (m)}. \quad (3.12)$$

La revanche partielle minimale pour le bois flottant est donc de 0.3 m, comme dans KOHS (2013). La procédure est présentée étape par étape dans l'exemple d'application (point 3.6).

Fig. 53 : Mesurage du bois flottant



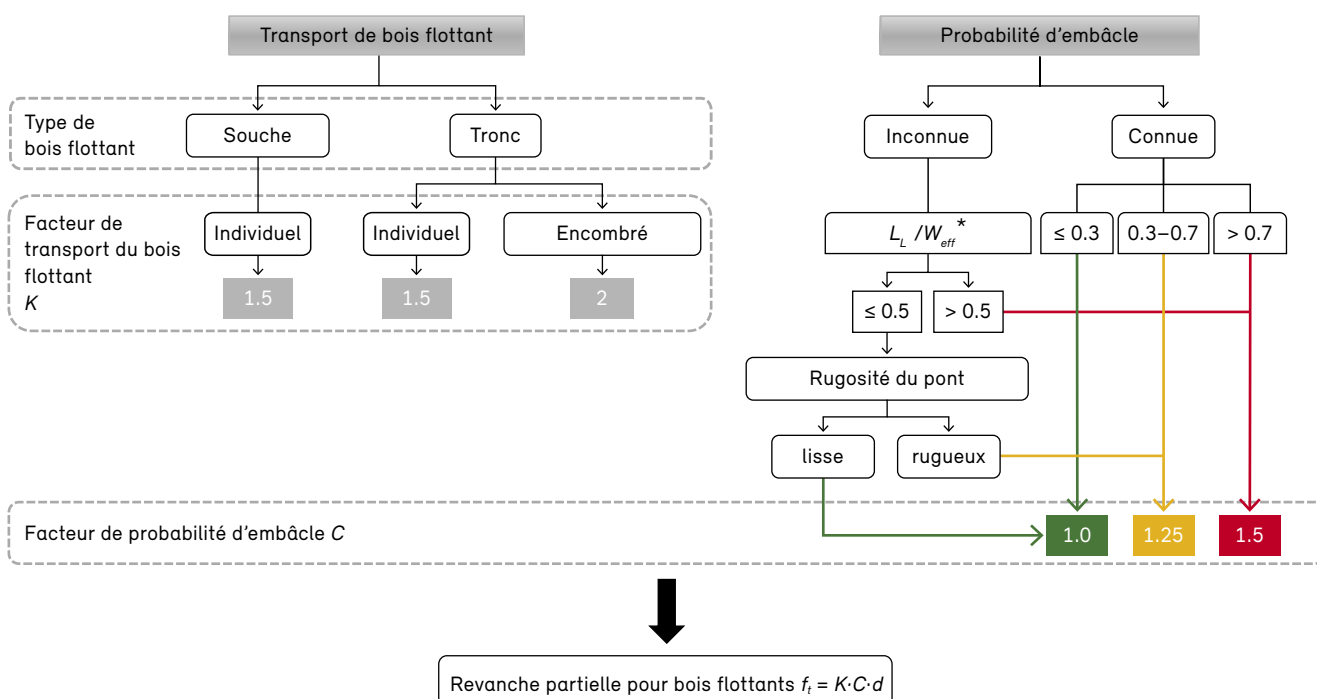
Graphique : selon Lange und Bezzola (2006)

3.6 Exemple d'application : embâcle de bois flottant sur la Glatt (Zurich)

La Glatt coule dans le canton de Zurich. Elle prend sa source dans le lac de Greifen et se jette dans le Rhin après avoir parcouru 37.5 km. En ville de Zurich, elle est enjambée par l'Überlandstrasse, soutenue par une série de piles de pont (Fig. 55). À cet endroit, il existe un risque d'embâcle et un potentiel de dommages accrus du fait de la présence combinée de piles et de conduites, de végétation riveraine et de zones industrielles et résidentielles proches. Pour mieux connaître les risques et l'éventuelle nécessité d'agir, la probabilité d'embâcle et l'exhaussement du niveau d'eau dû à un embâcle de bois flottant sont estimés pour ce site à l'aide des équations présentées aux points 3.1 et 3.3. Les données d'entrée sont les suivantes :

- Conditions d'écoulement en amont (Scherrer AG, 2002)
Débit $HQ_{100} = 93 \text{ m}^3/\text{s}$
 $v_o = 1.6 \text{ m/s}$
 $h_o = 3.9 \text{ m}$
 $F_o = 0.32$
- Dimensions du pont et de la section
 $d_p = 1.2 \text{ m}$
 $B = 12 \text{ m}$
 $W_{\text{eff}} = 6 \text{ m}$
Revanche existante pour HQ_{100} $f_{\text{vorh}} = 0.36 \text{ m}$
- Dimensions du bois (cf. aussi point 2.2 en ce qui concerne la réduction de la taille du bois flottant)
 $L_L = 3...6 \text{ m}$ (estimation)
 $d_L = 0.10 \text{ m}$ (selon Bezzola et Hegg, 2007)

Fig. 54 : Arbre de décision pour le calcul de f_i



* L_L / W_{eff} : Longueur de bois / largeur transversale effective du chenal

(1) La probabilité d'embâcle p peut être calculée avec l'équation (3.1) pour le transport de troncs individuels ou pour le transport d'amas de bois flottant. On notera ici que la longueur ce dernier constitue le paramètre incertain des données d'entrée. Pour le transport de troncs individuels ($x_n = 1.00$) et en fonction de la longueur du bois choisie, on aura pour p :

$$p_{L_L=3} = e^{-12.7 \cdot x_n \left(\frac{V_o^2}{2gL_L} \right)^{0.43} \left(\frac{d_p}{L_L} \right)^{0.60}} = e^{-12.7 \cdot 1.0 \left(\frac{1.6^2}{2 \cdot 9.81 \cdot 3} \right)^{0.43} \left(\frac{1.2}{3} \right)^{0.60}} = 10\% \text{ et } p_{L_L=6} = 40\%$$

Si l'on part de l'hypothèse d'un transport d'amas de bois ($x_n = 0.65$), p augmente comme suit :

$$p_{amas, L_L=3} = 30\% \text{ et } p_{amas, L_L=6} = 60\%.$$

La probabilité d'embâcle maximale $p_{max} = 60\%$. La conduite située légèrement en amont de la pile aggrave la situation et peut, en cas d'embâcle contre la pile, entraîner un embâcle sur toute la largeur du cours d'eau. La probabilité d'embâcle étant élevée ($p_{max} = 60\%$), il est nécessaire de calculer l'exhaussement du niveau d'eau dû à un embâcle de bois flottant.

(2) **Exhaussement du niveau d'eau dû à un embâcle de bois flottant** : la pile et la conduite accroissent le risque d'embâcle. L'exhaussement résultant d'un embâcle peut être estimé pour différents scénarios (équation (3.5)).

Les données d'entrée nécessaires sont choisies sur la base de mesures (F_o , h_o) et d'hypothèses appropriées à la situation. Pour déterminer L_A (équation (3.4)), il faut estimer le volume foisonné effectif $V_{l,eff}$. À cette fin, on peut, dans un premier temps, calculer le volume plein effectif $V_{s,eff}$ en fonction de la longueur boisée du cours d'eau L_W (équation (1.5), point 1.5); cette dernière peut être déterminée à l'aide de l'analyse SIG présentée au chapitre 1 (Steeb et al., 2019a) et s'élève à $L_W \approx 1.6$ km. Pour le volume plein effectif, $V_{s,eff} = 49$ et $L_W^{0.5} = 62 \text{ m}^3$. Si l'on part de l'hypothèse que $a = 4.5$, on obtient pour le volume foisonné effectif $V_{l,eff} = V_{s,eff} a = 279 \text{ m}^3$. Selon l'équation (3.4), $L_A = V_{l,eff}/(h_o B) = 279/(3.9 \cdot 12) \approx 6.0$ m. La proportion des matériaux fins est estimée à 2.5 %. Dans l'hypothèse d'un embâcle de forme rectangulaire, $f_A = 1$, l'exhaussement relatif vaut :

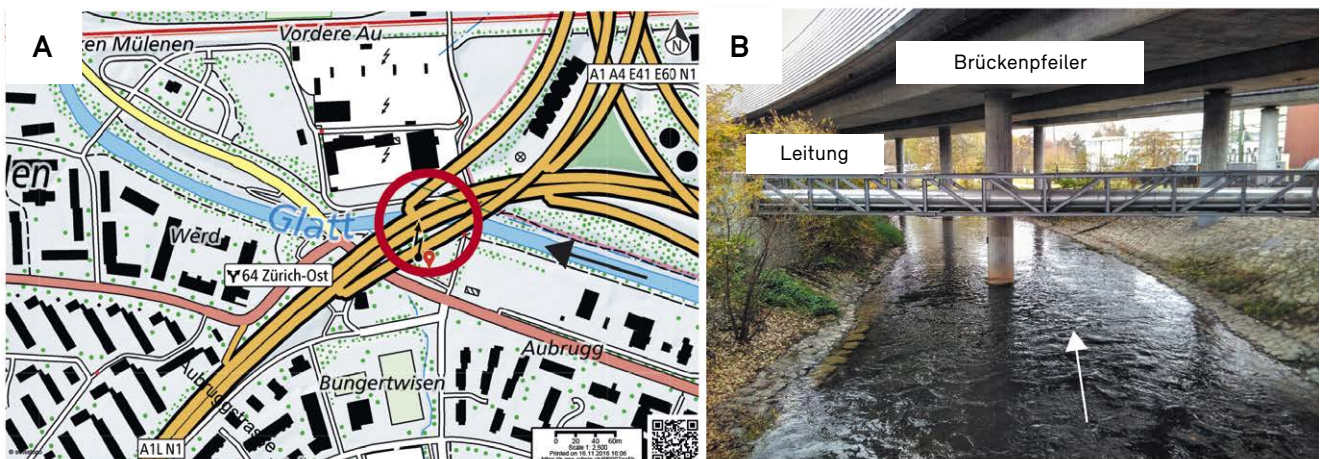
$$\frac{\Delta h}{h_o} = 5.4 f_A \frac{F_o u^{1/3} (9FM + 1)}{a^{4/3}} \text{ avec } a = 4.5 \text{ et } u = \frac{L_A}{d_L} = \frac{6.0 \text{ m}}{0.1 \text{ m}} = 60$$

$$\frac{\Delta h}{h_o} = 5.4 \cdot 1.0 \frac{0.32 \cdot 60^{1/3} (9 \cdot 0.025 + 1)}{4.5^{4/3}} = 1.11.$$

Pour un embâcle naturel avec un fond de lit fixe et $f_A = 0.55$, l'exhaussement relatif $\Delta h/h_o$ diminue et passe à 0.61. Pour un affouillement et avec $f_A = 0.3$, $\Delta h/h_o = 0.33$. La profondeur d'écoulement tenant compte de l'exhaussement du niveau d'eau est alors de $h_o + \Delta h$. Dans tous

Fig. 55: Exemple d'application : embâcle de bois flottant sur la Glatt (Zurich)

(A) Extrait de carte de la Glatt, ville de Zurich (swisstopo, 2017), (B) section d'écoulement avec la pile de pont.



Images : (A) swisstopo (2017); (B) VAW (2018)

les scénarios, la profondeur d'écoulement en cas d'embâcle est plus élevée que la hauteur des berges (4.26 m). Dès lors, la revanche obtenue (f = hauteur des berges – profondeur d'écoulement) est négative pour tous les scénarios (-4.0 m pour $f_A = 1.0$, -2.0 m pour $f_A = 0.55$, et -0.9 m pour $f_A = 0.3$). Du fait du risque d'embâcle, le risque qu'il y ait des débordements s'accroît fortement.

Le **volume de bois flottant caractéristique** V_c , qui provoque l'exhaussement du niveau d'eau déterminant, peut être calculé avec l'équation (3.6). Dans l'hypothèse d'un fond de lit fixe, V_c est calculé comme suit :

$$\frac{V_c}{h_o^2 B} = 3.1 F_o = 3.1 \cdot 0.32 = 1.00 \rightarrow V_c = 1.00 \cdot h_o^2 B = 1.00 \cdot 3.90^2 \cdot 12.0 = 181.8 \text{ m}^3$$

La valeur de 181.8 m^3 est donc moindre que la quantité de bois flottant attendue $V_{l,eff}$ de 279 m^3 , celle-ci étant toutefois fortement dépendante du facteur de masse. L'exhaussement du niveau d'eau correspondant Δh_c est alors de 3.7 m (équation (3.5)) avec $f_A = 1.0$ et $L_A = V_c / (B h_o) = 3.9 \text{ m}$. En conséquence, $\eta = \Delta h / \Delta h_c = 1.17$. Ainsi, Δh calculé avec $f_A = 1.0$ est un peu plus élevé que Δh_c .

Un **affouillement** potentiel dû à un **embâcle de bois flottant** ne peut pas être calculé avec l'équation (3.9), car $F_o = 0.32$ est en dehors du domaine d'application et l'équation (3.9) ne convient pas pour un affouillement au pied d'une pile.

(3) Calcul de la revanche en tenant compte du transport de bois flottant

Pour déterminer la revanche partielle nécessaire en raison du bois flottant, on choisit d'abord le tronc comme *type de bois*. De plus, on peut partir de l'hypothèse que les troncs forment un amas et choisir $K = 2$. Avec l'équation (3.1), on obtient une probabilité d'embâcle maximale $p_{max} = 60 \%$, ce qui donne $C = 1.25$. Si la valeur de p est inconnue, $L_w / W_{eff} \approx 0.75 > 0.5$ et par conséquent $C = 1.5$ selon la Fig. 54. Pour $d = 0.1 \text{ m}$, on obtient une revanche partielle due au transport de bois flottant près des ponts telle que :

$$f_t = \max \{ K C d; 0.3 \} = \max \{ 2 \cdot 1.25 \cdot 0.10 = 0.25 \text{ m}; 0.3 \text{ m} \} = 0.30 \text{ m}$$

(ou $f_t = 2 \cdot 1.5 \cdot 0.1 = 0.3 \text{ m}$).

Pour la revanche partielle en raison des incertitudes dans l'estimation de la ligne d'eau f_w on a :

$$f_w = \sqrt{\sigma_{wh}^2 + \sigma_{wz}^2} = \sqrt{(0.06 + 0.06 h_o)^2 + 0.10^2} =$$

$$f_w = \sqrt{(0.06 + 0.06 \cdot 3.9)^2 + 0.10^2} = \sqrt{0.29^2 + 0.10^2} = 0.31 \text{ m}$$

Pour la revanche partielle en raison de la formation de vagues et des remous d'exhaussement sur des obstacles f_v on a :

$$f_v = \frac{v_o^2}{2g} = \frac{1.6^2}{2g} = 0.13 \text{ m}.$$

Pour cette section de la Glatt, la revanche nécessaire f_e est donc de

$$f_e = \sqrt{f_w^2 + f_v^2 + f_t^2} = \sqrt{0.31^2 + 0.13^2 + 0.30^2} = 0.45 \text{ m}.$$

Puisque f_e est plus élevée que $f_{existante}$, il s'agit ici d'un point faible pour lequel il faut prendre des mesures.

Bibliographie

Bezzola, G.R., Hegg, C. 2007. Ereignisanalyse Hochwasser 2005 Teil 1: Prozesse, Schäden und erste Einordnung. Office fédéral de l'environnement (OFEV), Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage WSL. *Connaissance de l'environnement*, N° 0825, 429 p.

Bladé, E., Cea, L., Corestein, G. 2014. Numerical modelling of river inundations. *Ingeniería del agua* 18, 68. doi: 10.4995/ia.2014.3144

Bloemer, S., Fernandes, J.P., Florineth, F., Geitz, P., Gerstgraser, C., Graf, F., Hacker, E., Johannsen, R., Kovalev, N., Markart, G., Molon, M., Rauch, H.P., Palmeri, F., Prokop, A., Sangalli, P., Sauli, G., Stowasser, A., Studer, R., Sabatzus, A., Weibel, T., Witt, K.J. 2015. European Guidelines for Soil and Water Bioengineering. European Federation for Soil and Water Bioengineering.

Boivin, M., Buffin-Bélanger, T., Piégay, H. 2015. The raft of the Saint-Jean River, Gaspé (Québec, Canada): A dynamic feature trapping most of the wood transported from the catchment. *Geomorphology* 231, 270-280. doi: 10.1016/j.geomorph.2014.12.015

Braudrick, C.A., Grant, G.E. 2001. Transport and deposition of large woody debris in streams: a flume experiment. *Geomorphology* 41, 263-283. doi: 10.1016/S0169-555X(01)00058-7

Braudrick, C.A., Grant, G.E., Ishikawa, Y., Ikeda, H. 1997. Dynamics of wood transport in streams: A flume experiment. *Earth Surface Processes and Landforms* 22, 669-683. doi: 10.1016/S0169-555X(01)00058-7

OFEV (Office fédéral des eaux et de la géologie). 2003. Évaluation des crues dans les bassins versants de Suisse. Rapports de l'OFEV, Série Eaux, Berne, 115 p.

Comiti, F., Mao, L., Preciso, E., Picco, L., Marchi, L., Borga, M. 2008. Large wood and flash floods: evidence from the 2007 event in the Davča basin (Slovenia). *Monit. Simulation, Prev. Remediat. Dense Debris Flows II*, WIT Transactions on Engineering Sciences I, 173-182. doi: 10.2495/DEB080181

Comper, T., Picco, L., Bladé, E., Ruiz-Villanueva, V. 2018. Numerical modelling of large wood dynamics in the braided Piave River (Italy): the important role of roots. 5th IAHR Europe Congress – New Challenges in Hydraulic Research and Engineering. doi: 10.3850/978-981-11-2731-1_210-cd

Dazio, E., Conedera, M., Schwarz, M. 2018. Impact of different chestnut coppice managements on root reinforcement and shallow landslide susceptibility. *Forest Ecology and Management* 417, 63-76. doi: 10.1016/j.foreco.2018.02.031

Dixon, S.J., Sear, D.A. 2014. The influence of geomorphology on large wood dynamics in a low gradient headwater stream. *Water Resources Research* 50, 9194-9210. doi: 10.1002/2014WR015947

Dorren, L. 2017. FINT – Find individual trees. User manual. ecorisQ paper (www.ecorisq.org), 1-6.

Fischenich, C. 2001. Stability thresholds for stream restoration materials. ERDC-TN-EMRRP-SR-29.

Frehner, M., Wasser, B., Schwitter, R., 2005. Gestion durable des forêts de protection. Soins sylvicoles et contrôle des résultats: instructions pratiques. *L'environnement pratique*. Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP), Berne, 564 p.

Gasser, E., Schwarz, M., Simon, A., Perona, P., Phillips, C., Hübl, J., Dorren, L. 2019. A review of modeling the effects of vegetation on large wood recruitment processes in mountain catchments. *Earth Science Reviews* 194, 350-373. doi: 10.1016/j.earscirev.2019.04.013

Giadrossich, F., Schwarz, M., Pirastu M., Niedda, M. 2014. Stabilization's mechanisms of hillslopes due to root reinforcement. *Quaderni di idronomia montana* 31, 353-362.

Ginzler, C., Price, B., Bösch, R., Fischer, C., Hobi, M.L., Psomas, A., Rehush, N., Wang, Z., and Waser, L.T. 2019. Remote Sensing: Area-wide Products. In: Fischer, C.

-
- and Traub, B. (Ed.), 2019. Swiss National Forest Inventory – Methods and Models of the Fourth Assessment, Springer Series: Managing Forest Ecosystems. Springer (in press).
- Ginzler C. 2018. Vegetation Height Model NFI. National Forest Inventory (NFI). doi: 10.16904/1000001.1
- Ginzler, C. & Hobi, M.L. 2016. Das aktuelle Vegetationshöhenmodell der Schweiz: spezifische Anwendungen im Waldbereich. *Journal forestier suisse (JFS)*. 167(3), 128-135. doi: 10.3188/szf.2016.0128. Résumé en français: Le modèle actuel de la hauteur de la végétation suisse: applications spécifiques dans le domaine forestier.
- Haeberli, W., Rickenmann, D., Zimmermann, M., 1991: Murgänge. Ursachenanalyse der Hochwasser 1987. Ergebnisse der Untersuchungen. Mitteilung des Bundesamtes für Wasserwirtschaft Nr. 4 / Mitteilung der Landeshydrologie und -geologie Nr. 14, 77-88.
- Hauet, A., Jodeau, M., Le Coz, J., Marchand, B., Die, M.A., Le Boursicaud, R., Dramais, G. 2014. Application de la méthode LSPIV pour la mesure de champs de vitesse et de débits de crue sur modèle réduit et en rivière. *La Houille Blanche* 3, 16-22.
- Hunzinger, L. 2014. Freeboard analysis in river engineering and flood mapping — New recommendations: S. 31-37. 7th River Flow Conference, Lausanne, Switzerland.
- Jensen, H., Lang, H. & Rinderknecht, J. 1997. Extreme Punktregen unterschiedlicher Dauer und Wiederkehrperioden 1901-1970. Hydrologischer Atlas der Schweiz – Tafel 2.4². <https://hydrologischeratlas.ch/>
- Julien, P.Y. 2002. River Mechanics. Cambridge University Press, 434 S. doi: 10.1017/CBO9781139164016
- Kaufmann, E. 2001. Estimation of Standing Timber, Growth and Cut. In: Brassel, P., & Lischke, H. (Eds.). (2001). Swiss National Forest Inventory: methods and models of the second assessment: S. 162-206. Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf.
- KOHS, 2013. Freibord bei Hochwasserschutzprojekten und Gefahrenbeurteilungen. Empfehlung der Kommission für Hochwasserschutz (KOHS). *Wasser Energie Luft* 105(1), 43-50.
- Kuratli, B. 2017. Eine GIS-basierte Schätzung des potentiellen Schwemmhölzeintrages in alpine Fließgewässer und Vergleich mit effektiv transportierten Schwemmhölzfrachten. Masterarbeit, Geographisches Institut Universität Zürich, 90 S.
- Lange, D., Bezzola, G.R. 2006. Schwemmhölz: Probleme und Lösungsansätze. *VAW-Mitteilung* 188 (H.-E. Minor, ed.). ETH Zürich, Schweiz.
- Le Coz, J., Magali, J., Hauet, A., Marchand, B., Le Boursicaud, R. 2014. Image-based velocity and discharge measurements in field and laboratory river engineering studies using the free FUDAA- LSPIV software. *River Flow*, Lausanne.
- Leopold, L.B. & Maddock, T. 1953. The Hydraulic Geometry of Stream Channels and Some Physiographic Implications. USGS Professional Paper No. 252, 1-57.
- LLE Diemtigtal. 2006. Hochwasser 2005 im Diemtigtal. Lokale lösungsorientierte Ereignisanalyse (LLE) im Auftrag des Tiefbauamts des Kantons Bern, 57 S.
- Losey, S. & Wehrli, A. 2013. Forêt protectrice en Suisse. Du projet SilvaProtect-CH à la forêt protectrice harmonisée. Office fédéral de l'environnement, Berne. 29 p. et annexes. Office fédéral de l'environnement, Berne.
- Lyn, D., Cooper, T., Yi, Y.-K., 2003. Debris Accumulation at Bridge Crossings: Laboratory and Field Studies. Publ. FHWA/IN/JTRP-2003/10. Jt. Publication FHWA/IN/JTRP-2003/10. Joint Transportation Research Program, Indiana Department of Transportation and Purdue University, West Lafayette, Indiana. doi: 10.5703/1288284313171

- Máčka, Z., Krejčí, L., Loučková, B., Peterková, L. 2011. A critical review of field techniques employed in the survey of large woody debris in river corridors: a central European perspective. *Environmental monitoring and assessment* 181, 291-316. doi: 10.1007/s10661-010-1830-8
- MacVicar, B.J., Henderson, A., Comiti, F., Oberlin, C., Pecorari, E. 2009. Quantifying the temporal dynamics of wood in large rivers: field trials of wood surveying, dating, tracking, and monitoring techniques. *Earth Surface Processes and Landforms* 2046, 2031-2046. doi: 10.1002/esp
- Magilligan, F.J. 1992. Thresholds and the spatial variability of flood power during extreme floods. *Geomorphology* 5(3-5), 373-390. doi: 10.1016/0169-555X(92)90014-F
- Mazzorana, B., Fuchs, S. 2010. Fuzzy Formative Scenario Analysis for woody material transport related risks in mountain torrents. *Environmental Modelling & Software* 25, 1208-1224. doi: 10.1016/j.envsoft.2010.03.030
- Menk, J., Dorren, L., Heinzel, J., Marty, M., Huber, M. 2017. Evaluation automatischer Einzelbaumerkennung aus luftgestützten Laserscanning-Daten. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 168(3), 151-159. Résumé en français : Efficacité du balayage laser aéroporté pour la détection automatique d'arbres individuels.
- Moulin, B., Piégay, H. 2004. Characteristics and temporal variability of large woody debris trapped in a reservoir on the River Rhone (Rhone): Implications for river basin management. *River Research and Applications* 20, 79-97. doi: 10.1002/rra.724
- Pecorari E., Comiti F., Rigon E., Picco L., Lenzi M.A. 2007. Caratterizzazione e quantificazione del legname in alveo in corsi d'acqua di grandi dimensioni: risultati preliminari sul fiume Piave, Italia. *Quaderni di Idronomia Montana* 27, 477-488.
- Piton, G., Recking, A. 2016. Design of Sediment Traps with Open Check Dams. II: Woody Debris. *J. Hydraul. Eng.* 142(2), 04015046. doi: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001049
- Ravazzolo, D., Mao, L., Picco, L., Lenzi, M.A. 2015. Tracking log displacement during floods in the Tagliamento River using RFID and GPS tracker devices. *Geomorphology* 228, 226-233. doi: 10.1016/j.geomorph.2014.09.012
- Rickenmann, D. 1997. Schwemmholz und Hochwasser. *Wasser Energie Luft* 89 (5-6), 115-119.
- Rickli, C., Badoux, A., Rickenmann, D., Steeb, N., Waldner, P. 2018. Large wood potential, piece characteristics, and flood effects in Swiss mountain streams. *Physical Geography* 39(6), 542-564. doi:10.1080/02723646.2018.1456310
- Rickli, C., Böckli, M., Badoux, A., Rickenmann, D., Zurbrugg, S., Ruiz-Villanueva, V., Stoffel, M. 2016. Schwemmholztransport während des Hochwasserereignisses vom 24. Juli 2014 im Einzugsgebiet der Emme. *Wasser Energie Luft* 108(3), 225-231.
- Rickli, C., Graf, F. 2009. Effects of shallow landslides – Case studies in Switzerland. *Forest, Snow and Landscape Research* 82(1), 33-44.
- Rickli, C., Bucher, H. 2006. Einfluss ufernaher Bestockungen auf das Schwemmholzvorkommen in Wildbächen. Projektbericht zuhanden des Bundesamtes für Umwelt BAFU. Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf, 94 p.
- Ruiz-Villanueva, V., Scorpio, V., Bachmann, A., Brousse, G., Cavalli, M., Comiti, F., Crema, S., Fernández, E., Furdada, G., Hajdukiewicz, H., Hunzinger, L., Lucia, A., Marchi, L., Moraru, A., Piton, G., Rickenmann, D., Righini, M., Roab, Y., Stoffel, M., Surian, N., Wyżga, B. 2019a. Channel widening during floods: outcomes from a European meta-analysis. (*in prep.*)
- Ruiz-Villanueva, V., Mazzorana, B., Bladé, E., Bürkli, L., Iribarren-Anacona, P., Mao, L., Nakamura, F., Ravazzolo, D., Rickenmann, D., Sanz-Ramos, M., Stoffel, M., Wohl, E. 2019b. Characterization of wood-laden flows in rivers. *Earth Surface Processes and Landforms* 44(9), 1694-1709.

- Ruiz-Villanueva, V., Gamberini C., Bladé, E., Stoffel, M., Bertoldi, W. 2019c. Numerical modelling of instream wood transport on braided morphologies under unsteady conditions: sensitivity and high-resolution quantitative model validation. *Water Resources Research* (under review).
- Ruiz-Villanueva, V., Stoffel, M. 2018. Application of fuzzy logic to large organic matter recruitment in forested river basins. 5th IAHR Europe Congress — New Challenges in Hydraulic Research and Engineering. Trento, Italy, June 2018.
- Ruiz-Villanueva, V., Badoux, A., Rickenmann, D., Böckli, M., Schläfli, S., Steeb, N., Stoffel, M., Rickli, C. 2018. Impacts of a large flood along a mountain river basin: the importance of channel widening and estimating the large wood budget in the upper Emme River (Switzerland). *Earth Surf. Dyn.* 6, 1115-1137. doi: 10.5194/esurf-6-1115-2018
- Ruiz-Villanueva, V., Wyżga, B., Mikuś, P., Hajdukiewicz, M., Stoffel, M. 2017. Large wood clogging during floods in a gravel-bed river: the Długopole bridge in the Czarany Dunajec River, Poland. *Earth Surf. Processes and Landforms* 42, 516-530. doi: 10.1002/esp.4091
- Ruiz-Villanueva, V., Wyżga, B., Hajdukiewicz, H., Stoffel, M. 2016a. Exploring large wood retention and deposition in contrasting river morphologies linking numerical modelling and field observations. *Earth Surface Processes and Landforms* 41, 446-459. doi: 10.1002/esp.3832
- Ruiz-Villanueva, V., Wyżga, B., Mikuś, P., Hajdukiewicz, H., Stoffel, M. 2016b. The role of flood hydrograph in the remobilization of large wood in a wide mountain river. *Journal of Hydrology* 541, 330-343. doi: 10.1016/j.jhydrol.2016.02.060
- Ruiz-Villanueva, V., Piégay, H., Gurnell, A.A., Marston, R.A., Stoffel, M. 2016c. Recent advances quantifying the large wood dynamics in river basins: New methods and remaining challenges. *Reviews of Geophysics* 54, 611-652. doi: 10.1002/2015RG000514
- Ruiz-Villanueva, V., Díez-Herrero, A., Ballesteros-Canovas, J.A., Bodoque, J.M. 2014a. Potential large woody debris recruitment due to landslides, bank erosion and floods in mountain basins: a quantitative estimation approach. *River Research and Applications* 30, 81-97. doi: 10.1002/rra
- Ruiz-Villanueva, V., Bladé, E., Sánchez-Juny, M., Marti-Cardona, B., Díez-Herrero, A., Bodoque, J.M. 2014b. Two-dimensional numerical modeling of wood transport. *Journal of Hydroinformatics* 16, 1077-1096. doi: 10.2166/hydro.2014.026
- Ruiz-Villanueva, V., Bodoque, J.M., Díez-Herrero, A., Bladé, E. 2014c. Large wood transport as significant influence on flood risk in a mountain village. *Natural Hazards* 74, 967-987. doi: 10.1007/s11069-014-1222-4
- Sanhueza, D., Picco, L., Ruiz-Villanueva, V., Iroumé, A., Ulloa, H., Barrientos, G. 2019. Quantification of fluvial wood using UAVs and structure from motion: strengths and potential limitations. *Geomorphology* 345, 106837. doi: 10.1016/j.geomorph.2019.106837.
- Schalko, I. 2018. Modeling hazards related to large wood in rivers. *VAW-Mitteilung* 249, (R.M. Boes, ed.), ETH Zürich, Schweiz.
- Scherrer AG, 2002. Der Einfluss der Siedlungsentwicklung auf die extremen Hochwasser der Glatt (ZH). *Rapport technique*. Suisse.
- Schmocker, L., Hager, W.H. 2011. Probability of drift blockage at bridge decks. *Journal of Hydraulic Engineering* 137(4): 480-492. doi: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000319
- Schwarz, M., Hilfiker, K., Dazio, E., Soldati, M. 2018. Was bringen Entlastungsschläge in rutschgefährdeten Hängen? *Wald Holz* 2, 16-19.
- Schwarz, M., Phillips, C., Marden, M., Douglas, G., McIvor, I., Watson, A. 2016. Modelling of root reinforcement and erosion control by 'Veronese' poplar on pastoral hill country in New Zealand. *New Zealand Journal of Forestry* 46:4. doi: 10.1186/s40490-016-0060-4

- Schwarz, M., Giadrossich, F., Cohen, D. 2013. Modeling root reinforcement using a root-failure Weibull survival function. *Hydrology and Earth System Sciences* 17(11), 4367-4377.
- Schwarz, M., Cohen, D., Or, D. 2012. Spatial characterization of lateral root reinforcement. *Geomorphology* 171-172, 190-200. doi: 10.1016/j.geomorph.2012.05.020
- Schwarz, M., Lehman, P., Or, D. 2010. Quantifying lateral root reinforcement in steep slopes – from a bundle of roots to tree stands. *Earth Surface Processes and Landforms* 35, 354-367. doi: 10.1002/esp.1927
- Seo, J. Il, Nakamura, F., Nakano, D., Ichiyangi, H., Chun, K.W. 2008. Factors controlling the fluvial export of large woody debris, and its contribution to organic carbon budgets at watershed scales. *Water Resources Research* 44. doi: 10.1029/2007WR006453
- Steeb, N., Badoux, A., Rickli, C., Rickenmann, D. 2019a. Detailbericht zum Forschungsprojekt *WoodFlow*: Empirischer GIS-Ansatz. Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf.
- Steeb, N., Badoux, A., Rickli, C., Rickenmann, D. 2019b. Detailbericht zum Forschungsprojekt *WoodFlow*: Empirische Schätzformeln. Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf.
- Steeb, N., Badoux, A., Rickli, C., Rickenmann, D. 2019c. Detailbericht zum Forschungsprojekt *WoodFlow*: Verkleinerung von Schwemmholtz. Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf.
- Steeb, N., Rickenmann, D., Badoux, A., Rickli, C., Waldner, P. 2017. Large wood recruitment processes and transported volumes in Swiss mountain streams during the extreme flood of August 2005. *Geomorphology* 279, 112-127. doi: 10.1016/j.geomorph.2016.10.011
- CSB (Comité suisse des barrages) 2017. Bois flottant aux évacuateurs de crues des barrages. Rapport du comité suisse des barrages sur l'état du problème lié au bois flottant pour les évacuateurs de crues (EDC) des barrages, Groupe de travail sur le bois flottant aux EDC des barrages, 2017.
- swisstopo. 2017. <https://map.geo.admin.ch/>. Reproduit avec l'autorisation de swisstopo (JA100120).
- Tal, M., Gran, K., Murray, A.B., Paola, C., Hicks, D.M. 2004. Riparian vegetation as a primary control on channel characteristics in multi-thread rivers. In: Riparian vegetation and fluvial geomorphology, 43-58. doi: 10.1029/008WSA04
- Thévenet, A., Citterio, A., Piégay, H. 1998. A new methodology for the assessment of large woody debris accumulations on highly modified rivers (example of two French piedmont rivers). *Regulated Rivers: Research & Management* 14, 467-483. doi: 10.1002/(SICI)1099-1646(1998110)14:6<467 : AID-RRR514>3.0.CO;2-X
- Uchiogi, T., Shima, J., Tajima, H., Ishikawa, Y. 1996. Design methods for wood-debris entrapment. International Symposium Interpraevent, Garmisch-Partenkirchen. Tagungspublikation, Band 5, 279-288.
- Wainwright, J., Parsons, A.J., Cooper, J.R., Gao, P., Gillies, J.A., Mao, L., Orford, J.D., Knight, P.G. 2015. The concept of transport capacity in geomorphology. *Reviews of Geophysics* 53, 1155-1202. doi: 10.1002/2014RG000474
- Waldner, P., Köchli, D., Usbeck, T., Schmocker, L., Suter, F., Rickli, C., Rickenmann, D., Lange, D., Hilker, N., Wirsch, A., Siegrist, R., Hug, C., Kaennel, M. 2009. Schwemmholtz des Hochwassers 2005. Schlussbericht des WSL-Teilprojekts Schwemmholtz der Ereignisanalyse BAFU/WSL des Hochwassers 2005. Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf, 72 S.
- Wohl, E., Cenderelli, D. A., Dwire, K. A., Ryan-Burkett, S. E., Young, M. K., Fausch K. D. 2010. Large in-stream wood studies: a call for common metrics. *Earth Surface Processes and Landforms* 35, 618-625. doi: 10.1002/esp.1966
- Wohl, E., Jaeger, K., 2009. A conceptual model for the longitudinal distribution of wood in mountain streams.

Earth Surface Processes and Landforms 34, 329–344.
doi: 10.1002/esp

WSL, 2016. Inventaire forestier national IFN. Résultats des inventaires 2004/06 (IFN3) et 2009/13 (IFN4). Markus Huber 06.06.2016. Institut fédéral de recherche WSL, Birmensdorf.

Wynn, T.M., Mostaghimi, S., Alphin, E.F. 2004. The effects of vegetation on stream bank erosion. In: 2004 ASAE Annual Meeting. American Society of Agricultural and Biological Engineers.

Zimmermann, M., Mani, P., Gamma, P., Gsteiger, P., Heiniger, O., Hunziker, G. 1997. Murganggefahr und Klimaänderung – ein GIS-basierter Ansatz. In: Schlussbericht Nationales Forschungsprogramm, NFP 31. Zürich: vdf Hochschulverlag AG an der ETH, 161 p.

Zollinger, F. 1983. Die Vorgänge auf einem Geschiebeablagerungsplatz – Ihre Morphologie und die Möglichkeiten einer Steuerung. Dissertation, Nr. 7419. ETH, Zürich.

Annexe 1 Symboles et Abréviations

Symboles

a	facteur de masse $a = V_l/V_s$ (-)	p	probabilité d'embâcle (-)
B	largeur du chenal du cours d'eau (m)	P_h	durée des précipitations (h)
C	facteur de probabilité d'embâcle (-)	P_{mm}	quantité moyenne des précipitations (mm)
d	diamètre d'un morceau de bois flottant (m)	P_{vol}	volume total des précipitations (m ³)
d_L	diamètre d'un tronc/d'un morceau de bois (m)	q	débit spécifique par largeur du cours d'eau (m ² /s)
d_m	diamètre moyen des grains (m)	Q_{max}	débit de pointe (m ³ /s)
d_P	diamètre de la pile d'un pont (m)	Q_o	débit (m ³ /s)
d_W	diamètre d'une souche (m)	Q_{spez}	débit spécifique (m ³ s ⁻¹ km ⁻²)
D^*	diamètre relatif des troncs	Q^*	taux relatif d'apport de bois
E	superficie du bassin versant (km ²)	r	coefficient de corrélation (-)
F	charge sédimentaire (volume solide transporté) (m ³)	s	densité relative des sédiments ≈ 2.65 (-)
F_o	nombre de Froude de l'écoulement amont (-)	S	profondeur d'affouillement (m)
f_A	facteur de forme de l'embâcle (-)	S_A	facteur d'affouillement (-)
f_{abm}	facteur de réduction $f_{abm} = V_{est}/V_{pot}$ (-)	SH_{100}	scénario avec période de retour de 50 à 150 ans pour calculer le potentiel de bois flottant
f_e	revanche (m)	$SH_{\ll 30 \gg}$	scénario avec période de retour d'environ 30 ans pour calculer le potentiel de bois flottant
F_{combi}	surfaces d'apport potentiel qui se superposent (ha)	$SH_{\ll 300 \gg}$	scénario avec période de retour d'environ 300 ans pour calculer le potentiel de bois flottant
MF	proportion de matériaux fins (-)	S_{max}	profondeur maximale de l'affouillement (m)
F_{pot}	zones d'apport potentiel (ha)	S_r	profondeur d'affouillement près du râtelier (m)
f_t	revanche partielle due au transport de bois flottant près des ponts (m)	u	facteur de déviation $u = L_A/d_L$ (-)
f_v	revanche partielle en raison de la formation de vagues et de l'exhaussement du niveau d'eau causé par les obstacles (m)	V_c	volume de bois flottant caractéristique (m ³)
f_w	revanche partielle en raison d'incertitudes dans l'estimation de la ligne d'eau (m)	V_{est}	charge de bois flottant estimée avec les approches SIG en cas de crue (m ³)
g	accélération gravitationnelle (m/s ²)	V_k	coefficient de réduction (-)
h	profondeur d'eau due à l'exhaussement du niveau d'eau (m)	V_{combi}	charge de bois flottant provenant des surfaces d'apport potentiel qui se superposent (approche empirique SIG) (m ³)
h_o	profondeur d'eau amont (m)	V_l	volume foisonné (m ³)
K	facteur de transport de bois flottant (-)	v_o	vitesse de l'écoulement amont (m/s)
L	longueur du chenal (km)	V_{obs}	charge de bois flottant effectivement transportée lors d'une crue (m ³)
L_A	longueur de l'embâcle (m)	V_{pot}	potentiel de bois flottant (m ³)
L_L	longueur du morceau de bois (m)	V_{reg}	charge de bois flottant estimée par régressions empiriques lors d'une crue (m ³)
L_P	longueur de la pile d'un pont (m)	V_s	volume plein (m ³)
L_W	longueur de chenal boisée (km)	V_w	volume d'eau écoulé (m ³)
LW_A	facteur d'exhaussement du bois flottant (-)	W	surface forestière (km ²)
LW_P	facteur de probabilité d'embâcle dû au bois flottant (-)	W_{eff}	largeur transversale effective de la section d'écoulement (m)
L^*	longueur relative du tronc	x_n	transport de bois (morceaux individuels ou amas de bois) (-)
M	nombre de Melton (-) = densité du réseau hydrographique	Δh	exhaussement du niveau d'eau (m)

Δh_c	exhaussement du niveau d'eau pour le volume caractéristique V_c (m)
Δx	distance dans la direction x (m)
η	ratio d'exhaussement du niveau d'eau $\Delta h/\Delta h_c$ (-)
λ	facteur d'échelle (-)
ρ_L	densité de bois (kg/m^3)

Abréviations

OFEV	Office fédéral de l'environnement
swissALTI3D	Modèle altimétrique numérique
MNS	Modèle numérique de surface
MNT	Modèle numérique de terrain
AES	Approche empirique SIG
ESRI	Environmental Systems Research Institute
ASLF	Approche SIG par logique floue
FINT	Find Individual Trees (logiciel)
SIG	Système d'information géographique
HADES	Atlas hydrologique de la Suisse HADES
CIPC	Commission Protection contre les crues
IFN	Inventaire forestier national
LiDAR	Light Detection And Ranging = détection par laser
NaiS	Gestion durable des forêts de protection. Soins sylvicoles et contrôle des résultats
RANS	équations Reynolds Averaged Navier Stokes (modélisation statistique de la turbulence)
RVB	Couleurs primaires rouge, vert et bleu
SPI	Stream Power Index (indice de précipitation standardisé/normalisé)
CSB	Comité suisse des barrages
ASAE	Association suisse pour l'aménagement des eaux
UDS	Ultrasonic Distance Sensor = détecteur de distance à ultrasons
VB-MHV	Volume de bois d'après le modèle de la hauteur de la végétation (raster 25×25 m)
WLF	Wood-Laden Flow (radeau de bois flottant)

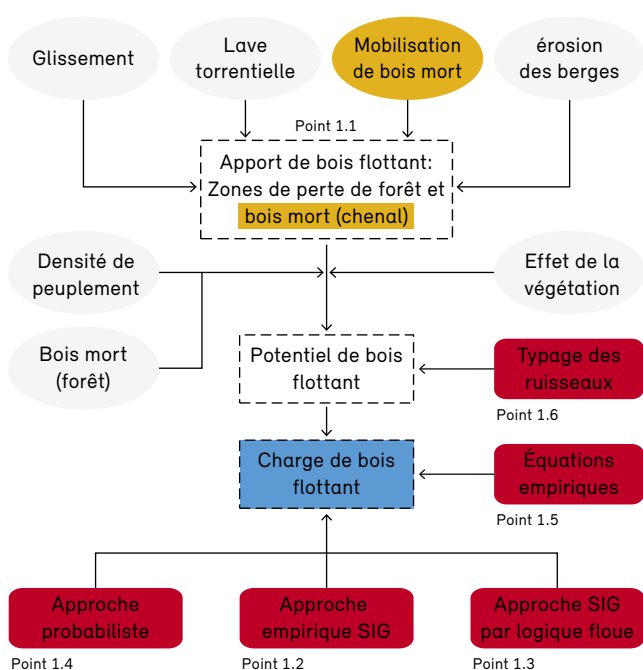
Annexe 2 Schéma de recherche

WoodFlow

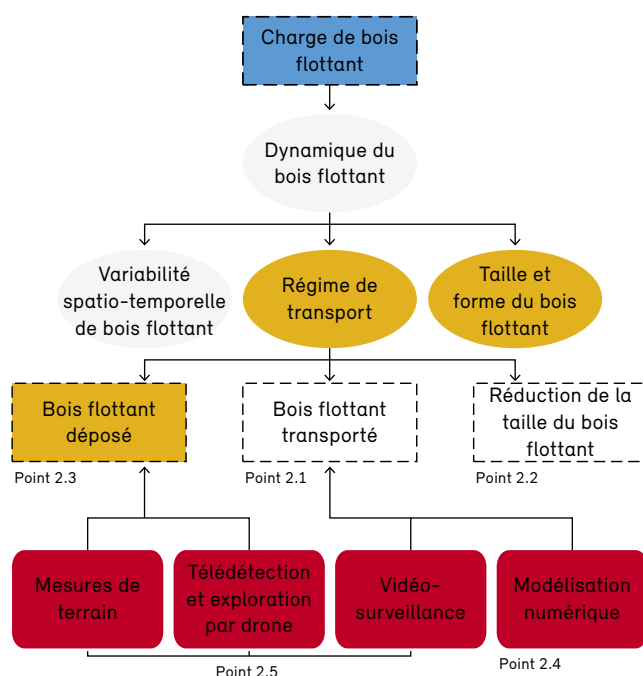
Fig. 56: Interaction des différents blocs de recherche

Les symboles ovales représentent les inputs, les symboles rectangulaires représentent les variables analysées et les résultats. La couleur bleue représente les résultats du chapitre 1, la couleur jaune ceux du chapitre 2, qui sont utilisés comme inputs pour les approches qu'ils sous-tendent. Le rouge représente les outils et méthodes d'application pratique développés à la suite du programme de recherche.

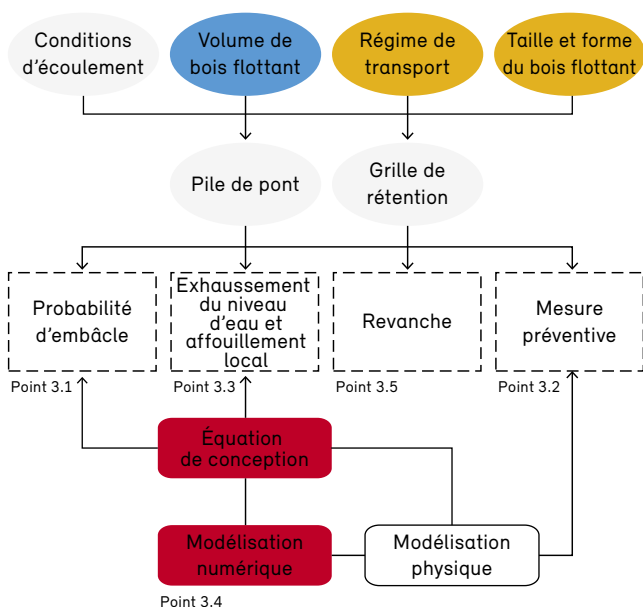
Chapitre 1



Chapitre 2



Chapitre 3



Annexe 3 Tableau récapitulatif des outils et approches *WoodFlow*

Approche/ Outil	But	Input	Output	Logiciel et matériel nécessaires	Domaine de vali- dité/limites	Incertitudes	Échelles	Temps de travail néces- saire	Application pratique* cf. description à la fin de l'annexe A3
Approche empirique SIG (point 1.2)	Estimation par scé- narios (SH _{«30-»} , SH ₁₀₀ , SH _{«300-»}) des zones d'apport potentiel et des quantités de bois flottant	Superficie du bas- sin versant; réseau hydrographique; surface forestière; trajectoires Silva- Protect; carte matricielle du volume de bois sur pied VB-MHV	Tableau des quan- tités de bois flot- tant V_{pot} et V_{est} ; shapefiles des surfaces d'apport	ArcGIS ou autres	Identification des surfaces d'apport (géoréférences); différenciation par processus d'apport	Potentiel de bois flottant (V_{pot}) vs charge de bois flot- tant (V_{est}); choix des facteurs de réduction; volume de bois sur pied	Bassin versant 5 à 200km ²	Selon la taille du bassin versant, environ 15 à 60 minutes	1) 3) 5) 6)
Approche SIG par logique floue (Fuzzy) (point 1.3)	Estimation par scé- narios (SH _{«30-»} , SH ₁₀₀ , SH _{«300-»}) des surfaces d'apport potentiel et des quantités de bois flottant	Superficie du bas- sin versant; réseau hydrographique; surface forestière; données sur les secteurs concernés par les glissements de terrain et les laves torrentielles (p.ex. trajectoires SilvaProtect); carte matricielle du volume de bois sur pied VB-MHV	Tableau des charges de bois flottant V_{est} ; carte matricielle des surfaces d'apport; carte matricielle des quantités de bois flottant	Outil déve- loppé pour ArcGIS; la même approche pourrait aussi être suivie avec un autre logiciel SIG (p. ex. QGIS) ou un autre logiciel statis- tique (p. ex. R, Matlab).	Domaine de vali- dité: approprié pour les données entachées d'in- certitudes; méthode souple; permet diffé- rentes espèces d'informations d'entrée	Fuzzy- membership; Fuzzy sets values; sur- faces d'éro- sion des berges	Théorique- ment illimi- tées; l'incerti- tude est plus grande avec de grands bassins ver- sants	Variable: entre 1 et plusieurs heures	
SlideforMAP & Bankfor- MAP (point 1.4)	Estimation par scé- narios (SH _{«30-»} , SH ₁₀₀ , SH _{«300-»}) de l'apport potentiel de bois flottant dû à l'érosion des berges, au glisse- ment des berges et au glissement de versants dans l'état actuel des forêts, dans un état mini- mal et dans un état idéal	MNT; MNS; HADES (estimation de la durée et de l'intensité des pré- cipitations); esti- mation du type de sol	Probabilité d'éro- sion des berges, de glissement des berges et de glis- sement des ver- sants dans l'état actuel des forêts et dans un état idéal; potentiel d'apport de bois flottant; efficacité de l'effet de pro- tection des forêts en différents états.	R; ArcGIS ou autre; FINT; outil d'identification des arbres individuels	Identification des surfaces d'apport (géo- références); différenciation des mécanismes d'apport; quan- tification à haute résolution de l'effet de protec- tion selon l'état des forêts	Grandes incertitudes dues à l'hé- trogénéité des propriétés du sol et du régime spatio- temporel des précipitations. Volume de bois sur pied supposé	Bassin ver- sant: 1 à 50km ² ; plus le bas- sin versant est grand, plus le temps consacré à l'analyse est long	Selon la taille du bassin versant: de 2 km ² (environ 1 heure) à 50 km ² (environ 1 jour)	1) 2) 3) 5) 6)

Approche/ Outil	But	Input	Output	Logiciel et matériel nécessaires	Domaine de vali- dité/limites	Incertitudes	Échelles	Temps de travail néces- saire	Application pratique* cf. description à la fin de l'annexe A3
SlideforNET & Bankfor- NET (point 1.4)	Estimation de la probabilité d'érosion des berges, de glissement des berges et de glissement de versant dans l'état actuel des forêts et avec l'effet protecteur actuel	Pente des versants moyenne ; densité moyenne du peuplement ; DHP moyen ; mélange d'essences d'arbres ; estimation du type de sol ; déclivité du chenal ; largeur du chenal ; pente des berges	Probabilité d'érosion des berges, de glissement des berges et de glissement de versants ; protection dans l'état actuel des forêts et dans un état minimal	Online (ecorisq.org)	Identification de la probabilité d'érosion des berges, de glissement des berges et de glissement de versants / un profil transversal d'un chenal selon l'état actuel des forêts	Les plus grandes incertitudes résident dans l'estimation des propriétés du sol	Tronçon de cours d'eau (10 à 100m de long selon l'hétérogénéité)	Environ 10 minutes	2) 3) 5) 6)
Formules empiriques d'estimation Équations (1.1) à (1.11) (point 1.5)	Estimation de la charge de bois flottant V_{reg} par régression (fonction puissance)	Variables de bassin versant et/ou d'événement	Quantité de bois flottant estimée en mètres cubes	Calculatrice de poche ou autre	Méthode simple pour estimer l'ordre de grandeur de la quantité de bois flottant ; non géoréférencée ; normalement pour événements HQ_{50-500} ; meilleurs résultats pour les quantités de bois flottant de 50 à 500 m ³	Grande dispersion des données ; application de marges entre les percentiles 10 % et 90 % et scénario extrême	Bassin versant < 1 km ² jusqu'à plusieurs centaines de km ²	Minime (quelques minutes si les données existent)	3) 5)
Schéma de typage (point 1.6)	procédé d'estimation simple des processus d'apport potentiel de bois flottant (érosion des berges, glissement de versants) et pour évaluer l'impact de la végétation	Largeur du chenal ; déclivité du chenal ; pente des versants ; estimation de la profondeur de cisaillement	Propositions de transposition pour des mesures sylvicoles en vue de réduire le potentiel d'apport de bois flottant	Typage (diagramme)	Estimation des processus d'apport potentiel de bois flottant par tronçon de chenal, y compris les versants adjacents	Ce schéma est conçu pour une classification sommaire qui définit des classes distinctes et qui est liée aux incertitudes concernant les valeurs limites des critères	Tronçon de chenal (10 à 100 m de long, en fonction de l'hétérogénéité)	Environ 10 minutes	1) 6)

Approche/ Outil	But	Input	Output	Logiciel et matériel nécessaires	Domaine de vali- dité/limites	Incertitudes	Échelles	Temps de travail néces- saire	Application pratique* cf. description à la fin de l'annexe A3
Coefficient de réduction (point 2.2)	Calcul de la réduction de bois flottant pendant le transport dans le chenal	Dimensions du bois flottant (diamètre et longueur); hauteur des arbres à partir du tarif (IFN)	Coefficient de réduction; $V = 0.2-0.4$	Calculatrice de poche ou autre	Pas de tendance nette parmi les facteurs d'influence; Applicable aux rivières et aux torrents de montagne	Hauteur d'arbre reconstituée $\pm 15\%$	Échelle: tronçon de chenal Distance transportée: 200 m à 30 km	Minime	5)
Monitoring : inspections sur le terrain (point 2.5.1)	Détermination des dépôts de bois flottant; distribution spatiale dans le lit du cours d'eau		Dépôt de bois flottant; taille du bois flottant; position du bois flottant; distribution spatiale du bois flottant; modifications temporaires (surveillance permanente)	Procès-verbal de terrain; GPS; télémètre	Domaine de validité: données de base pour valider le modèle, compréhension du processus et quantification des dépôts de bois flottant Limites: chronophage		Portée du cours d'eau (de qq mètres à qq kilomètres)	Varie entre quelques secondes et plusieurs jours	1) 3) 4) 6)
Monitoring : caméra (point 2.5.2)	Estimation du débit de bois flottant		Débit de bois flottant	Processeur d'images (p. ex. ImageJ, GIMP, Photosh, etc.); logiciel statistique (p. ex. R, Matlab) Caméra; cou rant et batteries; transfert de données et capacité de mémoire	Domaine de validité: données de base pour valider le modèle, compréhension du processus et quantification du débit de bois flottant Limites: chronophage	Conditions de visibilité; distorsion des images	Portée du cours d'eau	Traitement et analyses des images: varie entre quelques secondes et plusieurs jours	3) 5)

Approche/ Outil	But	Input	Output	Logiciel et matériel nécessaires	Domaine de vali- dité/limites	Incertitudes	Échelles	Temps de travail néces- saire	Application pratique* cf. description à la fin de l'annexe A3
Monitoring : télédétection (point 2.5.3)	Détermination des dépôts de bois flot- tant ; distribution spa- tiale dans le lit du cours d'eau	Photos satellite à haute résolution Earth Surface Processes and Landforms; photos aériennes; photos par drone	Dépôts de bois flottant ; taille du bois flot- tant ; position du bois flottant ; distribution spa- tiale du bois flot- tant ; modifications tem- poraires (surveil- lance permanente)	SIG (p. ex. ArcGIS, QGIS) ; logiciel de photogram- métrie (p. ex. Pix4D, Agisoft, ou autre)	Domaine de vali- dité : analyse de sec- teurs vastes Limites : résolution des images	Taille du bois flottant ; quantité de bois flottant	Portée du cours d'eau (de quelques mètres à plusieurs km)	Varie de quelques secondes à plu- sieurs jours	1) 3)
Iber-Wood (point 2.4)	Modélisation hydraulique ; modélisation morphodynamique ; modélisation de la dynamique du bois flottant ; • pour analyser les dangers liés au bois, le transport et le dépôt de bois. • pour reconstituer les modèles de dépôt de bois et identifier les sec- teurs ayant ten- dance à s'obstruer (embâcle) • pour identifier une infrastructure cri- tique le long du cours d'eau • pour reconstituer un événement de crue passé • pour tester des hypothèses ou analyser de pos- sibles scénarios	MNT ; rugosité ; débit ; infos sur le bois flottant (taille, den- sité, etc.)	Résultats sous forme de données raster, de photos et de graphiques sur les aspects suivants : • niveau d'eau • vitesse d'écou- lement • nombre de Froude • contrainte de cisaillement • érosion/dépôt • dépôts de bois • trajectoires du bois flottant • ratio de transport de bois	<i>Iber-Wood</i>	Domaine de vali- dité : permet de modé- liser la dyna- mique de l'eau, des sédiments et du bois Limites : validation de données empi- riques	Les mêmes que pour la modélisation hydraulique	Portée du cours d'eau (de quelques m à quelques km) ; bassin versant ; modélisation d'expé- riences graduées (mètres à centimètres)	Varie de quelques minutes à plusieurs heures	4) 5)

Approche/ Outil	But	Input	Output	Logiciel et matériel nécessaires	Domaine de vali- dité/limites	Incertitudes	Échelles	Temps de travail néces- saire	Application pratique* cf. description à la fin de l'annexe A3
Équations d'estimation empiriques Équations (3.1) et (3.2) (point 3.1.1)	Calcul de la proba- bilité d'embâcle p	Diamètre des piles; nombre de piles; vitesse d'écoule- ment des affluents; longueur des mor- ceaux de bois; transport de bois	Probabilité d'em- bâcle p pour le transport de trunks simples et le transport d'amas de bois flottant	Calculatrice de poche ou autre	$F_o = 0.08...1.2$ ou $0 \leq LW_A \leq 0.53$	Dispersion des données: $\pm 30\%$ $R^2 = 0.83$	Échelle: transversale Équations dérivées des simulations de modèles (échelle 1:20)	Minime	4) 5)
Équations d'estimation empiriques Équations (3.3) à (3.5) point 3.3.1)	Calcul de l'exhaus- sement du niveau d'eau Δh dû à un embâcle (de bois flottant)	Nombre de Froude amont; longueur de l'em- bâcle; diamètre du bois; facteur de masse; proportion de matériaux fins	Hauteur atten- due de l'exhaus- sement du niveau d'eau Δh	Calculatrice de poche ou autre.	$F_o = 0.2...1.4$ ou $LW_A = 0...1.0$	Dispersion des données: $\pm 20\%$ $R^2 = 0.95$	Échelle: transversale Équations dérivées des simulations de modèles (échelle 1:50, 1:30 et 1:6)	Minime	4) 5)
Équations d'estimation empiriques Équations (3.6) et (3.7) (point 3.3.1)	Calcul du volume caractéristique de bois flottant V_c	Profondeur d'écou- lement amont; nombre de Froude amont; granulométrie moyenne	Volumes de bois flottant V_c qui provoquent l'ex- haussement déter- minant du niveau d'eau	Calculatrice de poche ou autre	$F_o = 0.3...1.5$ pour un fond de lit stable $F_o =$ $0.5...1.5$ pour un fond de lit mobile	Dispersion des données: $\pm 30\%$ $R^2 = 0.89$ (fond de lit stable) $R^2 = 0.98$ (fond de lit mobile)	Échelle: transversale Équations dérivées des simulations de modèles (échelle 1:30 et 1:6)	Minime	4) 5)
Équations d'estimation empirique Équation (3.8) (point 3.3.1)	Estimation de l'in- fluence du volume de bois flottant sur l'exhaussement du niveau d'eau	Hypothèses pour le ratio entre les volumes pleins et les volumes carac- téristiques	Ratio d'exhausse- ment $\eta = \Delta h / \Delta h_c$ (Δh_c = exhausse- ment dû au volume caractéristique)	Calculatrice de poche ou autre	$F_o = 0.3...1.5$	Dispersion des données: $\pm 30\%$ $R^2 = 0.93$	Échelle: transversale Équation dérivée des simulations de modèles (échelle 1:30 et 1:6)	Minime	4) 5)
Équations d'estimation empiriques Équation (3.9) (point 3.3.2)	Calcul de l'affouil- lement local maxi- mal S_{max} dû à un embâcle de bois flottant	Débit spécifique; granulométrie; volumes de bois flottant	Profondeur de l'af- fouillement S_{max} près de la herse	Calculatrice de poche ou autre	$F_o = 0.5...1.5$ ou $S_{max}/d_{50} > 2$ et $LW_A = 0...120$	Dispersion des données: $\pm 30\%$ $R^2 = 0.97$	Échelle: transversale Équation dérivée des simulations de modèles (échelle 1:30)	Minime	4) 5)

Approche/ Outil	But	Input	Output	Logiciel et matériel nécessaires	Domaine de vali- dité/limites	Incertitudes	Échelles	Temps de travail néces- saire	Application pratique* cf. description à la fin de l'annexe A3
Revanche Équations (3.10) à (3.12) (point 3.5)	Calcul de la revanche partielle due au transport de bois flottant près des ponts f_r	Type de bois (tronc vs souche); facteur de trans- port de bois flot- tant K; probabilité d'em- bâcle; longueur du bois; largeur effective de la section transver- sale; caractéristiques du pont	Revanche partielle f_r ou revanche f_e	Calculatrice de poche ou autre	Domaine de vali- dité de l'équation utilisée pour cal- culer la proba- bilité d'embâcle (point 3.1.1)	Estimation du type de bois et de sa lon- gueur; analyse de sensibilité recommandée	Échelle: transversale	Minime	5)

Exemples d'applications pratiques des approches proposées

* voir la numérotation correspondante dans le tableau ci-dessus de l'annexe A3

1. Identifier les régions à risque

- Faire une représentation géoréférencée des surfaces de perte potentielle de forêts
- Différencier par processus d'apport et par scénario

2. Délimiter les surfaces de forêt protectrice

3. Estimer les quantités de bois flottant

- Potentiel de bois flottant V_{pot}
- Charge de bois flottant estimée V_{est}

4. Identifier les points faibles dans le chenal

- Embâcle, affouillement, exhaussement du niveau d'eau

5. Établir les bases de calcul pour les mesures d'aménagement des eaux

- Structures de rétention du bois flottant
- Dimensionnement des ponts (revanche) ainsi que des évacuateurs et ouvertures de décharge

6. Mesures sylvicoles et de génie biologique

- Interventions forestières (déboisement, reboisement, soins aux forêts protectrices)
- Mesures de génie biologique (revitalisation, aménagement des berges)

Annexe 4 Tableau récapitulatif et comparatif des différentes approches SLG exemple de cas « Chirel »

	SH _{«30»}					SH ₁₀₀					SH _{«300»}					HW ₂₀₀₅		
	V _{pot}	V _{est}	V _{kombi}	F _{pot}	F _{kombi}	V _{pot}	V _{est}	V _{kombi}	F _{pot}	F _{kombi}	V _{pot}	V _{est}	V _{kombi}	F _{pot}	F _{kombi}	V _{obs}	F _{obs}	
Chlosegrabe	Bank/SlideforMAP	138	53	4.62		429	132		7.1		1757	706		14.6				
	AES	2707	70	165	11.50	1.0	3244	245	427	13.8	2.5	3556	724	641	15.1	3.7	542	2.8
	ASLF		571				1122					2559						
Horboden	Bank/SlideforMAP	1528	313	34.8		2207	541		44.5		4650	1864		68.6				
	AES	13525	407	1125	55.20	5.3	17811	1480	2845	75.5	13.1	20949	4524	4097	88.5	19.4	3103	11.2
	ASLF		2129				4668					9126						
Chirel	ASE	53011	1628	1646	214.90	8.7	74808	6254	5598	304.6	29.6	90539	19276	9050	364.9	47.9	9741	32.8
	ASLF		3809					8846					18744					

V = volume de bois flottant [m³]
F = superficie [ha]
pot = potentiel de bois flottant ; est = charge estimée de bois flottant ; obs = charge observée de bois flottant (apport) ; kombi = zones d'apport qui se superposent (seulement pour AES)

Remarque : les champs vides indiquent qu'il n'était pas possible de quantifier explicitement avec l'approche correspondante.

Annexe 5 Procès-verbal de terrain pour le relevé du bois flottant

Description globale

Cours d'eau :

Lieu :

Photos :

X :

Y :

Z :

Géomorphologie (cascade, step-pools et bassins, lit plat, bassins-ondulations, vagues, ramifications) :

Déclivité moyenne du fond du lit :

Largeur du chenal (par débit plein bord) :

Profondeur du chenal (par débit plein bord) :

Large vallée du cours d'eau :

Rétrécissement :

Pente latérale :

Granulométrie :

Type de forêt (essences dominantes) et densité :

Procès-verbal de terrain pour le relevé des accumulations de bois

[illegible]

Procès-verbal de terrain pour le relevé des morceaux isolés de bois flottant

[illegible]

Procès-verbal de terrain : read me

Variable	Description/Catégorie
Morceaux de bois flottant	
Longueur	
Diamètre	Il est recommandé de mesurer le diamètre au moins aux deux extrémités du morceau de bois ; si le morceau de bois est irrégulier, il est judicieux de procéder à une troisième mesure en son milieu.
Direction	Indiquer l'angle entre le morceau de bois et la berge/direction de l'écoulement ; classes d'angles possibles : 0° : parallèle , 90° : angle droit (perpendiculaire) , 45° : oblique
Situation géomorphologique dans le chenal	Lit, banc d'alluvion, berge, île, zone inondable (plaine alluviale)
Essence	Si identification possible ; si non, indiquer s'il s'agit de feuillus ou de résineux
Type/stabilité*	Instable (le morceau de bois se trouve entièrement dans le lit, mais n'est pas enfoui ni coincé), pont (les deux extrémités se trouvent au-dessus du lit plein bord, le milieu du tronc est suspendu en travers au-dessus du chenal), pont brisé (les deux extrémités sont posées au-dessus du lit, le point de rupture est au milieu), rampe (une extrémité est dans le lit, l'autre est au-dessus du lit plein bord), ancré (une partie ou l'intégralité du tronc est encastrée/coincée dans le lit avec d'autres morceaux de bois), escalier (le morceau de bois forme une marche d'escalier) ; immergé (la totalité ou une partie du morceau de bois est enfouie dans le lit)
Effets morphologiques	Retenue de sédiments en amont d'un morceau de bois ; affouillement dans les bassins en aval d'un morceau de bois, déviation du courant, conversion de l'énergie du courant, stabilisation des berges
Décomposition	Maximum 6 classes (possibilité de les regrouper en 3 ou 4 classes) : 6 : pourri (bois très mou qu'on peut facilement enfoncer avec le doigt), 5 : très altéré (bois relativement mou qu'on peut enfoncer avec le doigt), 4 : dénudé (très peu ou pas d'écorce), 3 : frais (présence de branches, écorce encore totalement ou partiellement intacte), 2 : très frais (écorce totalement intacte, morceau de bois nettement frais), 1 : vif.
Racines (souches)	Oui/non, en cas de présence de racines ou de souches, indiquer l'orientation par rapport au courant et la masse
Origine (processus d'apport)	Érosion des berges (y compris plaine alluviale), glissement (versants), lave torrentielle (affluent), bois mort dans le chenal, bois de construction, origine inconnue
Type de morceau de bois	Tronc (partie de l'arbre sans la souche ; la plus grande partie ne faisait pas partie de la couronne ; ou sans grosses branches), tronc avec souche (partie de l'arbre avec souche ; la plus grande partie sans ramifications/couronne/branches), souche (partie du tronc jusqu'à 1,3 m à partir du renflement des racines), couronne (partie du tronc ; majeure partie constituée de la couronne ; avec amorces de branches ou grosses branches), arbre entier (y compris souche et y compris couronne avec cime/branches ≤ 7 cm diamètre)
Points de coupe	Interventions artificielles avec tronçonneuse, p. ex. débitage du tronc, ébranchage