



Etude BankforMAP bois flottants pour le bassin versant de la Drize

Rapport final

Maître d'ouvrage : Marc Broadhurst, Secteur renaturation des cours d'eau (SRCE),
République et Canton de Genève, Département du territoire (DT) –
Office cantonal de l'eau (OCEau)

Soumissionnaire : Massimiliano Schwarz (BFH-HAFL) & Denis Cohen (CoSci LLC)

Date : 1.5.2026

Table des matières

1	Introduction	1
2	Logiciels BankforNET/BankforMAP	2
3	Acquisition, structuration et préparation des données nécessaires aux simulations	3
3.1	MNT, MNS	3
3.2	FINT : Détection d'arbres individuels	3
3.3	Hydrologie	3
4	Réalisation d'un relevé de terrain ciblé sur les berges	4
4.1	Planification travail de terrain	4
4.2	Caractérisation des tronçons de cours d'eau : Données BankforNET	4
5	Production de fichiers SIG exploitables pour le logiciel BankforMAP	8
6	Résultats des simulations BankforMAP pour quatre scénarios définis	14
7	Analyse des points faibles (ponts)	20
8	Synthèse des résultats	25
9	Annexes	29
9.1	Glossaire	29
9.2	Recommandations à l'attention des forestiers	32
9.3	Description du flux de travail	35
9.4	Produits potentiels supplémentaires de l'analyse pour des applications pratiques.	35
9.5	Extrapolation des débits de crue à l'aide d'une loi de Gumbel	36

Table des figures

1.1	Section en aval de la zone d'étude.	1
4.1	Carte générale des sections de la zone d'étude de la Drize.	4
4.2	Carte générale des placettes pour la mesure de la végétation sur le terrain dans la zone d'étude de la Drize.	6
4.3	Illustration détaillée des résultats de l'analyse de la structure forestière. En arrière-plan, le relief ombré (hillshade) du modèle de surface normalisé (NSM) lissé est présenté, généré à l'aide d'un noyau gaussien (exemple moyenne = 3; écart-type = 1.5). Les points bruns indiquent la position des arbres détectés avec FINT, avec une taille proportionnelle au DHP (diamètre à hauteur de poitrine) estimé. La zone verte représente la largeur du lit de la rivière calculée, en tenant compte des processus d'érosion hydraulique des berges.	7
5.1	Modèle numérique de terrain (MNT), rééchantillonné à une résolution de 1 m et corrigé (comblement des dépressions), et surface du bassin versant des principaux cours d'eau calculé sur la base du MNT corrigé.	9
5.2	Classes de sols des berges	10
5.3	Position des arbres individuels le long des cours d'eau. La taille des symboles est proportionnelle au DHP des arbres.	12
5.4	Exemple de volume de bois par classe de DHP des arbres et de la position actuelle des arbres individuels le long de la Drize entre les sections 1 et 4 (voir (a)). (a) $10 \leq \text{DHP} < 20$, (b) $20 \leq \text{DHP} < 30$, (c) $\text{DHP} \geq 30$. Les valeurs de DHP sont exprimées en cm.	13
6.1	Erosion des berges (extérieure et intérieure) pour le temps de retour $T_r = 300$ ans ($Q_{300} = 23.6 \text{ m}^3 \text{ s}$). 15	
6.2	Probabilité d'occurrence de l'érosion le long de la Drize entre les sections 15 et 16 (voir (a)) pour différent temps de retour. (a) $T_r = 30$ ans ($Q_{30} = 16.5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), (b) $T_r = 100$ ans ($Q_{100} = 20.2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), et (c) $T_r = 300$ ans ($Q_{300} = 23.6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). Les classes correspondent aux quantiles du coefficient de Shields (le quantile 5% représente la condition la plus érosive).	16
6.3	Bois flottant recruté effectif le long de la Drize entre les sections 15 et 16 (voir (a)) pour un temps de retour de 300 ans selon trois classes de DHP (cm). (a) $10 \leq \text{DHP} < 20$, (b) $20 \leq \text{DHP} < 30$, et (c) $30 \geq \text{DHP}$. Les valeurs de DHP sont exprimées en cm.	17
6.4	Bois flottant transporté potentiel le long de la Drize pour un temps de retour de 300 ans et pour la classe de bois avec un $\text{DHP} = 10$ cm.	18
6.5	Bois flottant transporté effectif le long de la Drize pour un temps de retour de 300 ans et pour la classe de bois avec un $\text{DHP} = 10$ cm.	19
7.1	Aperçu de la position des points faibles (p. ex. les ponts) le long de la rivière Drize. Les lignes rouges indiquent la position des sections analysées.	20
7.2	Illustration du flux de travail pour le calcul de la probabilité d'embâcle due au bois flottant, en conditions de transport saturé et non saturé. Dans cette étude, les trois critères d'évaluation de la probabilité en conditions saturées sont analysés.	21
8.1	Comparaison des résultats avec des formules empiriques [Bundesamt für Umwelt (BAFU), 2019]. La valeur maximale du volume potentiel de bois flottant mobilisable, égale à 841 m^3 , est calculée en considérant l'érosion des berges lors d'un événement extrême.	27
9.1	Éviter de stocker du bois flottant (LW) dans le lit ou à proximité du chenal actif.	32
9.2	Un exemple clair de la contribution importante du renforcement racinaire à la stabilité des berges.	33
9.3	Exemples de situations où les racines ne contribuent pas (ou peu) à la stabilisation, car la zone de contrainte de cisaillement maximale se situe plus en profondeur que la principale zone d'enracinement (distribution verticale des racines).	34

9.4	Exemples de blocage : dans certains cas, le bois recruté est d'une taille telle que son potentiel de transport devient pratiquement nul. En conséquence, une partie du bois de plus petite dimension se retrouve également déposée au même endroit.	34
9.5	Illustration du flux de travail utilisé dans cette étude.	35
9.6	Illustration du flux de travail pour l'élaboration des cartes des dangers.	35
9.7	Illustration du flux de travail pour l'identification des forêts de protection.	36
9.8	Illustration du flux de travail pour l'analyse du risque lié au bois flottant.	36

1 Introduction

L'analyse des scénarios de transport de bois flottant dans les cours d'eau constitue une information complémentaire importante pour la planification des mesures de gestion et d'aménagement fluvial. Le présent rapport synthétise les résultats de l'évaluation de la dynamique du bois flottant dans le bassin versant de la Drize. L'objectif principal de l'étude est de quantifier le volume de bois flottant recruté ainsi que le volume effectivement transporté selon différents scénarios de débit. Les scénarios de débit ont été définis par le mandant comme suit : HQ_2 , HQ_{30} , HQ_{100} et HQ_{300} , représentant quatre temps de retour, 2, 30, 100 et 300 ans. Pour le calcul des processus d'érosion, il est également essentiel de définir la durée de l'événement hydrologique. Dans cette étude, une durée fixe de 6 heures a été retenue.



Figure 1.1 – Section en aval de la zone d'étude.

2 Logiciels BankforNET/BankforMAP

Dans cette étude, les modèles BankforNET et BankforMAP sont utilisés pour quantifier les processus de recrutement, de mobilisation et de transport du bois flottant.

BankforNET est un modèle unidimensionnel, basé sur des scénarios, conçu pour simuler l'érosion hydraulique des berges attendue à l'échelle d'une section transversale lors d'un événement hydrologique. Il prend explicitement en compte la morphologie du chenal, les caractéristiques des matériaux des berges et du lit, le renforcement des berges par les racines de la végétation, ainsi qu'un scénario de débit.

Le modèle reconstruit un hydrogramme à partir d'un nombre limité de descripteurs d'événement (p. ex. débit de pointe et durée, ou surface du bassin versant et période de retour). Il simule ensuite l'événement pas à pas et met à jour la profondeur d'écoulement, la géométrie du chenal (notamment la largeur) et l'érosion des berges au cours du temps.

L'érosion est calculée à l'aide d'un cadre de type contrainte de cisaillement. L'effet stabilisateur des racines est représenté par une augmentation de la contrainte de cisaillement critique en fonction du rapport volumique racinaire (RVR). BankforNET intègre également des éléments probabilistes (incertitudes/aléas sur des paramètres liés à l'entraînement et/ou sur des descripteurs granulométriques tels que le D_{50} , la diamètre médian des sédiments, selon l'option choisie) afin de refléter l'incertitude des paramètres.

Les résultats fournissent des estimations et indicateurs évoluant dans le temps des conditions hydrauliques et du transport sédimentaire, de la capacité de transport du bois flottant, ainsi que de l'érosion des berges (berge interne et externe, en tenant compte de l'effet de la courbure). Cet outil est généralement utilisé pour évaluer les processus de chenal sur le terrain et soutenir la prise de décision en matière de dangers naturels et de gestion forestière, mais aussi comme protocole de collecte des paramètres nécessaires à la modélisation (avec extraction/téléchargement simple des données).

BankforMAP est l'extension de BankforNET pour des simulations bidimensionnelles à l'échelle du bassin versant. Il permet de calculer explicitement le bilan sédimentaire et le bilan du bois le long du réseau hydrographique.

BankforMAP estime la probabilité d'érosion des berges à l'échelle du bassin versant pour un événement de débit, et peut également simuler le recrutement, le transport et la déposition du bois flottant le long des cours d'eau.

3 Acquisition, structuration et préparation des données nécessaires aux simulations

3.1 MNT, MNS

Les jeux de données de référence proviennent du SITG (<https://sitg.ge.ch/donnees/mna-surface-2023-03>) :

- MNS (modèle numérique de surface)
- MNT (modèle numérique de terrain)

Les rasters téléchargés à l'origine couvrent l'ensemble du bassin versant étudié, avec une résolution spatiale de 0.5 m. L'ensemble des traitements et analyses SIG a été réalisé dans le système de référence EPSG :2056 (CH1903+ / LV95), afin de garantir la cohérence spatiale entre les différentes couches et d'éviter les erreurs liées aux reprojections.

Afin d'améliorer les performances du logiciel utilisé, nous avons rééchantillonné les données raster à une **résolution de 1 m**, ce qui demeure tout à fait adapté à l'application et aux objectifs de cette étude.

3.2 FINT : Détection d'arbres individuels

FINT (Find INdividual Trees) est un logiciel développé par l'ONG/association ecorisQ pour détecter des arbres individuels à partir de modèles de surface haute résolution (p. ex. issus de données LiDAR). Il permet d'extraire la position des arbres dominants/co-dominants et d'estimer des attributs comme la hauteur et le diamètre des arbres (DHP).

Pour utiliser ce logiciel, un modèle de surface normalisé (NSM = MNS – MNT) a d'abord été généré. Dans un second temps, le NSM a été lissé afin d'optimiser les résultats en termes de nombre d'arbres détectés par hectare et du diamètre des arbres moyen. Les résultats de la comparaison de trois coefficients de lissage sont présentés dans les chapitres suivants.

3.3 Hydrologie

Les scénarios hydrologiques sont essentiels pour analyser les processus morphodynamiques du chenal ainsi que la dynamique du bois flottant. Une quantification simple de ces scénarios peut être réalisée à l'aide du paramètre du débit de pointe maximal ($HQ_{T_r}^{max}$). Cette valeur, combinée à la durée totale de l'événement de crue, permet, avec un minimum de données, d'estimer l'ordre de grandeur des processus d'érosion et du transport de bois flottant. Dans le cadre de cette étude, les scénarios hydrologiques ont été repris de travaux antérieurs. Les débits estimés de scénarios sont :

- Q_2 : 7.2 m³/s
- Q_{30} : 16.5 m³/s
- Q_{100} : 20.2 m³/s
- Q_{300} : 23.6 m³/s
- Q_{ext} : 32.5 m³/s

Ulterieur Débit estimé :

- Q_{347} 22 L/s
- Q_{moy} 300 L/s

Il est supposé que le bois flottant provenant du territoire français ne franchit pas l'autoroute; l'analyse est par conséquent limitée au secteur suisse.

4 Réalisation d'un relevé de terrain ciblé sur les berges

4.1 Planification travaille de terrain

Une première simulation réalisée avec BankforMAP, en considérant des conditions estimées pour un événement de période de retour de 100 ans, est utilisée afin d'identifier les zones les plus pertinentes du bassin versant en lien avec le recrutement, la mobilisation et le transport du bois flottant. Les résultats de cette simulation servent de base à la planification du travail de terrain.

4.2 Caractérisation des tronçons de cours d'eau : Données BankforNET

La première caractérisation a été réalisée à distance à l'aide du logiciel QGIS, afin d'obtenir une vue d'ensemble et de comprendre les caractéristiques du cours d'eau. La deuxième caractérisation a été réalisée sur place avec une saisie directe pour les simulations BankforNET. Au cours de cette étape, les sections transversales ont été caractérisées plus en détail (géométrie, distribution granulométrique, végétation, rayon de courbure, etc.).

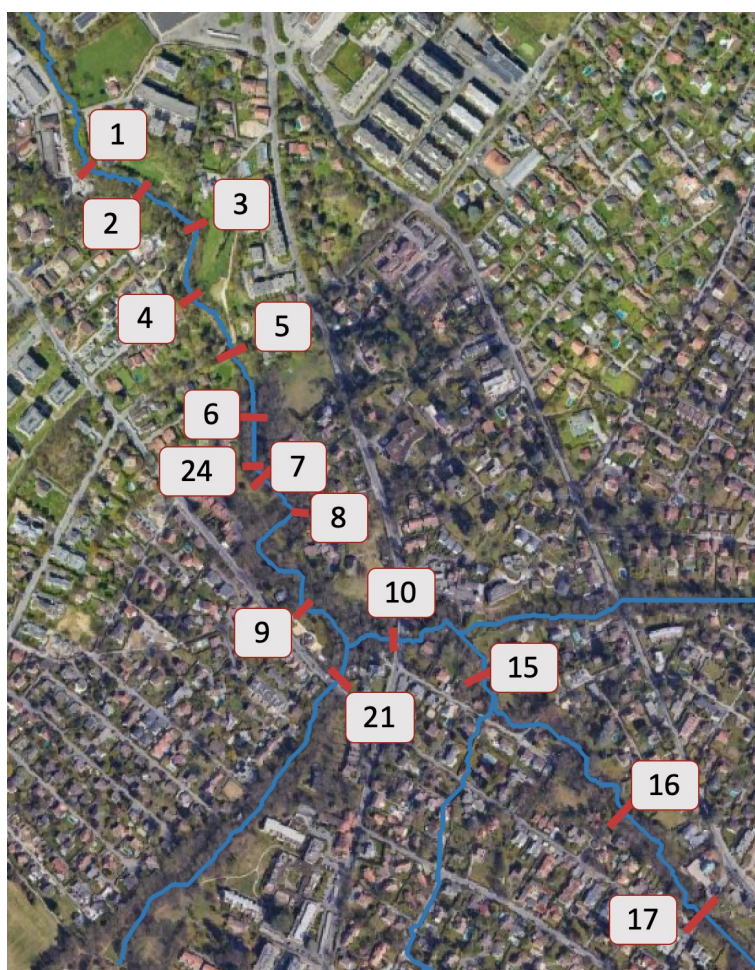


Figure 4.1 – Carte générale des sections de la zone d'étude de la Drize.

Table 4.1 – Résumé des principaux résultats des simulations réalisées avec BankforNET pour la zone d'étude le long de la Drize en tenant compte de l'état actuel de la végétation. L'effet de la végétation est pris en compte dans l'estimation de la résistance au cisaillement critique. *i* = berge intérieur de la rivière ; *e* = berge extérieur de la rivière. Les calculs BankforNET sont faits avec le débit HQ_{ext} .

Section	Largeur	Pente	Rayon de courbure	D_{50}^{lit}	Contrainte appliquée (i,e)	Cisaillement critique (i,e)	Érosion totale (i,e)
ID	(m)	(m/m)	(m)	(mm)	(Pa)	(Pa)	(m)
Drize_1	16	0.011	30	100	90, 175	10, 19	0.2, 0.3
Drize_2	5.5	0.006	100	50	138, 138	0.8, 8	1.6, 0.47
Drize_3	5	0.005	15	50	174, 283	0.8, 760	1.9, 0
Drize_4	4	0.012	25	150	175, 200	0.8, 760	2, 0
Drize_5	5.3	0.013	60	150	160, 160	0.8, 0.8	1.5, 1.5
Drize_6	6	0.013	100	150	195, 195	230, 77	0, 0.1
Drize_7	6.3	0.006	500	100	169, 169	115, 38	0, 0.17
Drize_8	7	0.02	5	150	180, 570	115, 770	0, 0
Drize_9	6	0.017	20	200	167, 245	15, 770	0.36, 0
Drize_10	4	0.02	150	300	212, 212	153, 153	0, 0
Drize_15	4	0.014	5	200	86, 225	77, 0.8	0, 2.7
Drize_16	3.3	0.027	40	250	165, 165	770, 0.8	0, 1.8
Drize_17	3	0.02	150	500	171, 171	0.8, 770	1.9, 0
Drize_24	6	0.01	100	150	195, 195	230, 77	0, 0.1

Les sections transversales les plus sujettes à l'érosion sur le site d'étude de la Drize sont les suivantes : 2, 3, 5, 15, 16 et 17.

4.2.1 Données végétation (placette)

Le concept de mesure de la végétation sur le terrain se base sur des méthodes existantes afin de permettre la comparabilité des données de site collectées au-delà de ce projet. Les données forestières sont relevées selon le même concept que celui de l'Inventaire Forestier National suisse (IFN), à l'aide de différentes placettes circulaires d'échantillonnage. L'objectif principal de ces relevés est de plausibiliser les résultats de FINT. Étant donné que ces données sont essentielles au calcul du volume de bois flottant, il est important de vérifier et de valider ces valeurs, notamment en ce qui concerne le nombre d'arbres ainsi que leurs dimensions. Concrètement, les relevés terrestres suivent la structure suivante :

- Arbres : inventaire de tous les individus avec un DHP ≥ 12 cm dans un cercle de 200 m² autour du centre de la placette, et de tous ceux avec un DHP ≥ 36 cm dans un cercle de 500 m². Le diamètre à hauteur de poitrine (DHP) est mesuré à 1.3 m. Sur terrain plat, les rayons sont de 7.98 m (200 m²) et 12.62 m (500 m²).
- Bois mort au sol et dégâts au sol : relevés le long de trois transects de 10 m, en enregistrant le bois mort au sol à partir de 7 cm de diamètre ainsi que les dégâts au sol.

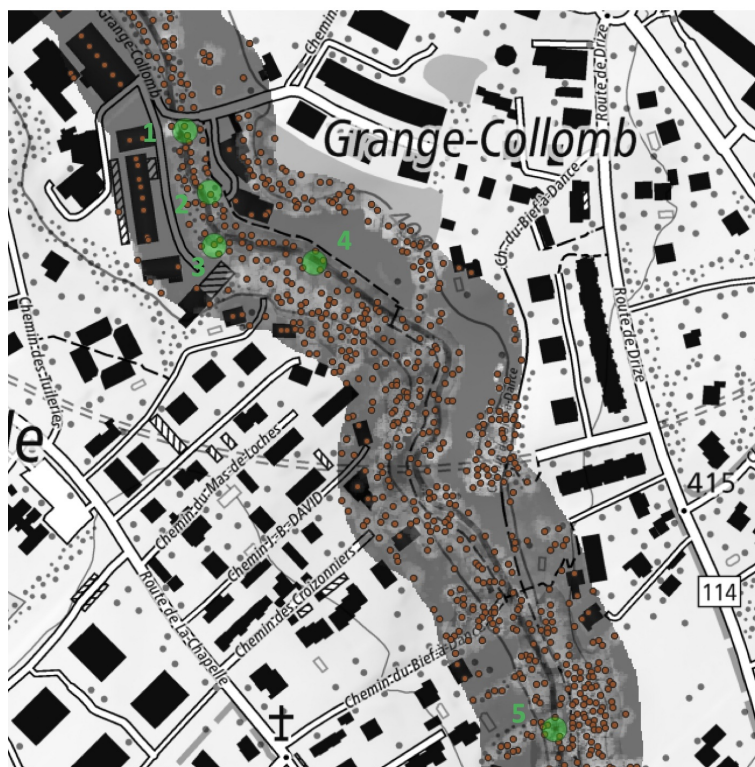
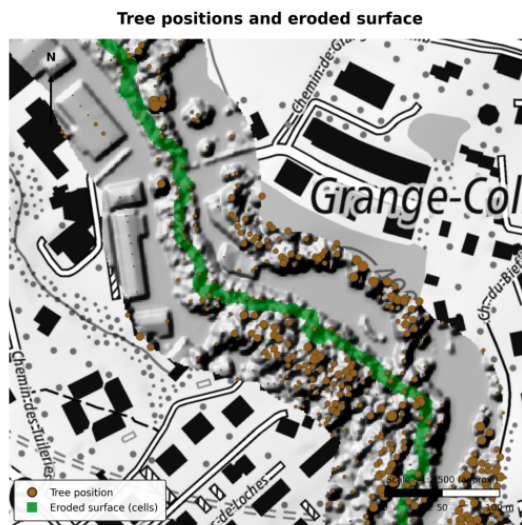


Figure 4.2 – Carte générale des placettes pour la mesure de la végétation sur le terrain dans la zone d'étude de la Drize.

Table 4.2 – Aperçu des résultats des paramètres de *tree stands* obtenus à partir de trois approches de lissage des données à distance, comparés aux 5 placettes mesurées sur le terrain. Les indicateurs sont calculés sur les différences (*téledétection – terrain*).

- Smoothing** = Configuration de lissage appliquée au MNS/MSN (méthode et paramètres).
- RMSE N** = Racine de l'erreur quadratique moyenne sur le nombre d'arbres (N).
- RMSE arbres/ha** = Racine de l'erreur quadratique moyenne sur la densité d'arbres (arbres par hectare).
- RMSE DHP moy.** = Racine de l'erreur quadratique moyenne sur le DHP moyen.
- RMSE DHP sd** = Racine de l'erreur quadratique moyenne sur l'écart-type du DHP.
- Biais N** = Biais moyen sur le nombre d'arbres (N).
- Biais arbres/ha** = Biais moyen sur la densité d'arbres (arbres par hectare).
- Biais DHP moy.** = Biais moyen sur le DHP moyen.
- Biais DHP sd** = Biais moyen sur l'écart-type du DHP.

Smoothing	RMSE N	RMSE arbres/ha	RMSE DHP moy.	RMSE DHP sd	Biais N	Biais arbres/ha	Biais DHP moy.	Biais DHP sd
(-)	(Nr)	(Nr/ha)	(m)	(m)	(Nr)	(Nr/ha)	(m)	(m)
3_1p5	2.93	58.61	0.10	0.10	1.8	35.98	-0.09	-0.06
11_3p5	1.67	33.44	0.09	0.12	-0.4	-7.99	-0.09	-0.06
9_3	3.97	79.44	0.11	0.15	-3.4	-67.95	-0.08	-0.07



CRS: EPSG:2056

Map layout: QGIS export (screenshot-based)

Figure 4.3 – Illustration détaillée des résultats de l’analyse de la structure forestière. En arrière-plan, le relief ombré (hillshade) du modèle de surface normalisé (NSM) lissé est présenté, généré à l’aide d’un noyau gaussien (exemple moyenne = 3 ; écart-type = 1.5). Les points bruns indiquent la position des arbres détectés avec FINT, avec une taille proportionnelle au DHP (diamètre à hauteur de poitrine) estimé. La zone verte représente la largeur du lit de la rivière calculée, en tenant compte des processus d’érosion hydraulique des berges..

Au vu des résultats de ces analyses, nous avons retenu le jeu de paramètres de moyenne = 11 et écart-type = 3.5 pour la suite de l’étude.

5 Production de fichiers SIG exploitables pour le logiciel BankforMAP

Le logiciel BankforMAP calcule, pour un débit donné Q , l'érosion actuelle des berges, la probabilité d'érosion fondée sur trois valeurs de contrainte critique (valeur moyenne, quantile à 5 % et quantile à 95 %), ainsi que le transport potentiel et effectif des bois flottants (volume de bois en mètres cubes). Ces calculs nécessitent l'utilisation de fichiers raster TIFF géoréférencés, ainsi que de fichiers CSV décrivant les caractéristiques des berges, notamment les valeurs moyennes des contraintes critiques (τ_c), le diamètre médian (D_{50}^{berge}) et l'écart-type ($\sigma_{D_{50}^{\text{berge}}}$) des sédiments. Le tableau ci-dessous (Tableau 5.1) récapitule l'ensemble des fichiers requis pour les calculs ainsi que leur description.

Table 5.1 – Liste des fichiers d'entrée du modèle BankforMAP.

Description	Fichier	Type	Unité
Modèle numérique de terrain	dtm.tif	TIFF	m
Surface drainée cumulée	faa.tif	TIFF	m ²
Classes de matériaux des berges	bank_soil_classes.tif	TIFF	
Propriétés des matériaux des berges	bank_soil_classes.csv	CSV	
Arbres individuels, position et DHP	treefile.csv	CSV	
Volume lissé de bois $10 \leq \text{DHP} < 20$ cm	LV_1.tif	TIFF	m ³
Volume lissé de bois $20 \leq \text{DHP} < 30$ cm	LV_2.tif	TIFF	m ³
Volume lissé de bois $30 \geq \text{DHP}$ cm	LV_3.tif	TIFF	m ³

La Figure 5.1 présente le bassin versant de la Drize, le modèle numérique de terrain, ainsi que les différentes valeurs associées à la surface du bassin versant dans le lit de la Drize et ses affluents.

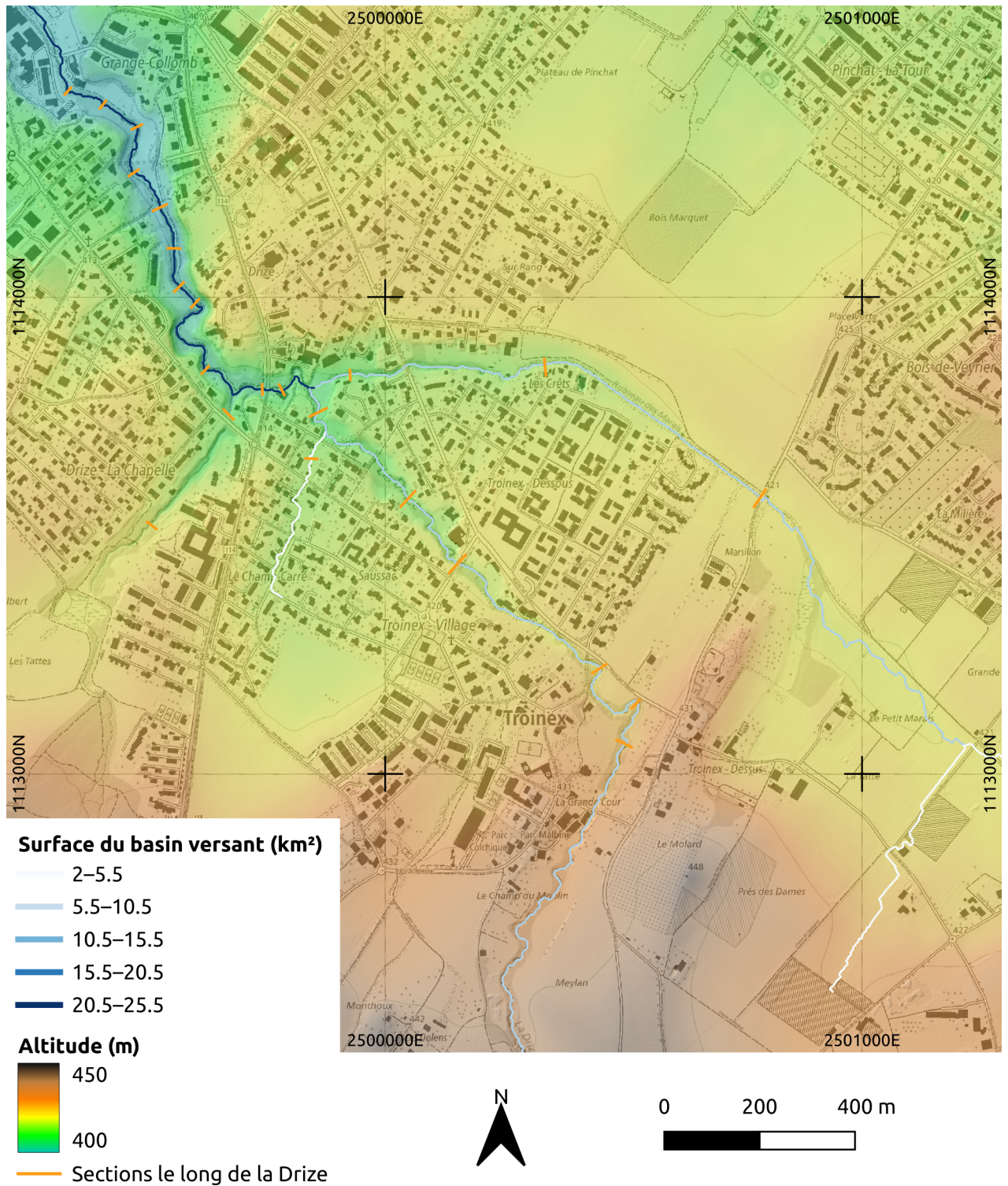


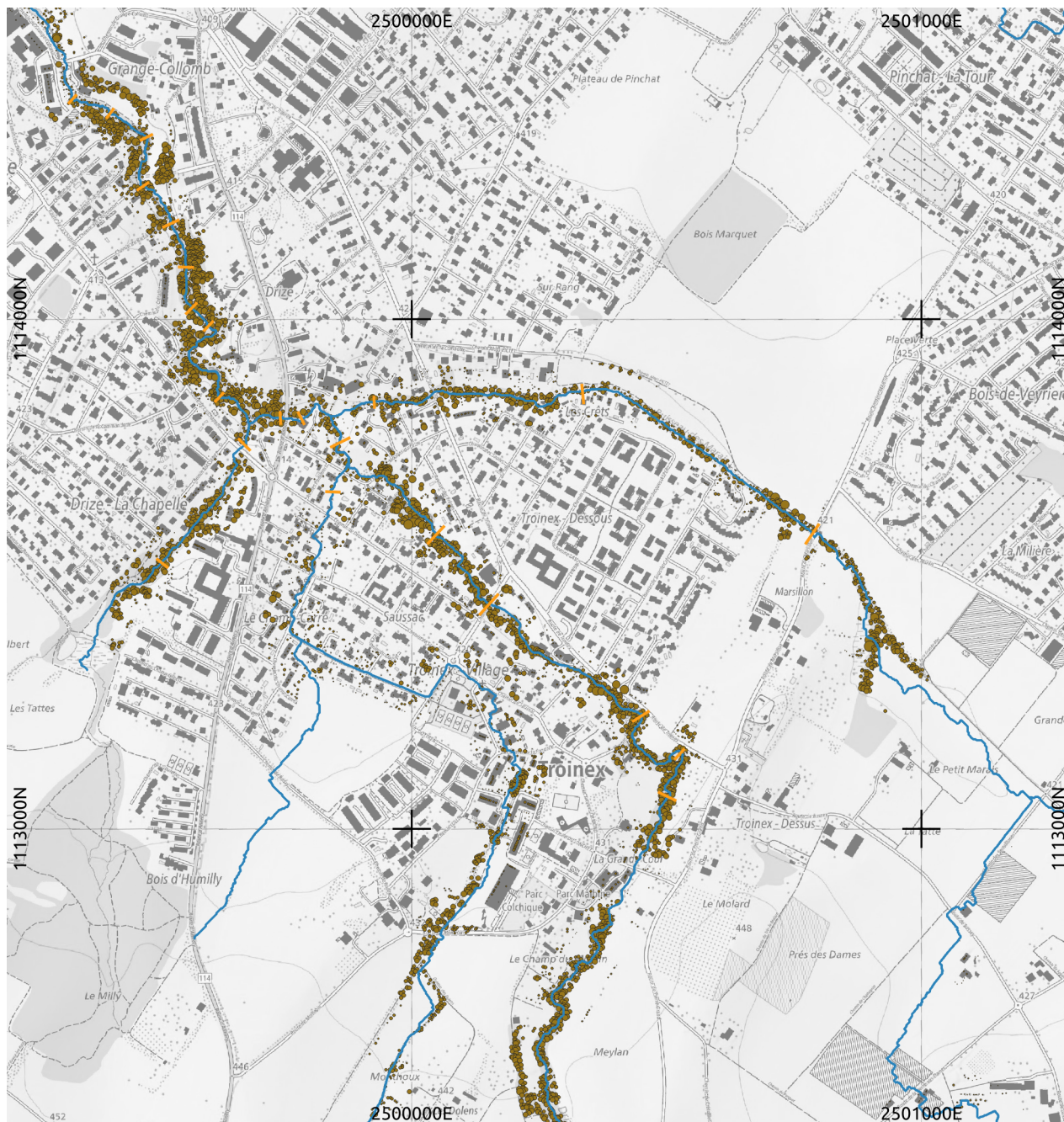
Figure 5.1 – Modèle numérique de terrain (MNT), rééchantillonné à une résolution de 1 m et corrigé (comblement des dépressions), et surface du bassin versant des principaux cours d'eau calculé sur la base du MNT corrigé.

La Figure 5.2 présente les classes de sol des berges pour la Drize et ses affluents. Les propriétés des matériaux des berges sont présentées dans le tableau 5.2.

Table 5.2 – Propriétés des matériaux des berges

Index	Classe de berge	τ_c Pa	σ_{τ_c} Pa	D_{50}^{berge} mm
1	Sable-limon	0.1	0.05	0.1
2	Sable-gravier	1	0.5	2
3	Argile-limon	10	5	0.1
4	Gravier-galet	100	50	150
5	Mur ou indéterminée	1 000	500	1 000

La Figure 5.3 présente la position des arbres individuels estimé à l'aide du logiciel FINT (voir section 3.1). La Figure 5.4 illustre un exemple de volume de bois lissé par classe de DHP pour la Drize, entre les sections 1 et 4 (voir Figure 4.1).



- Arbres individuels
(taille du symbole
proportionnelle au DHP)
- Sections le long de la Drize

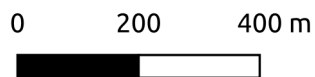


Figure 5.3 – Position des arbres individuels le long des cours d'eau. La taille des symboles est proportionnelle au DHP des arbres.

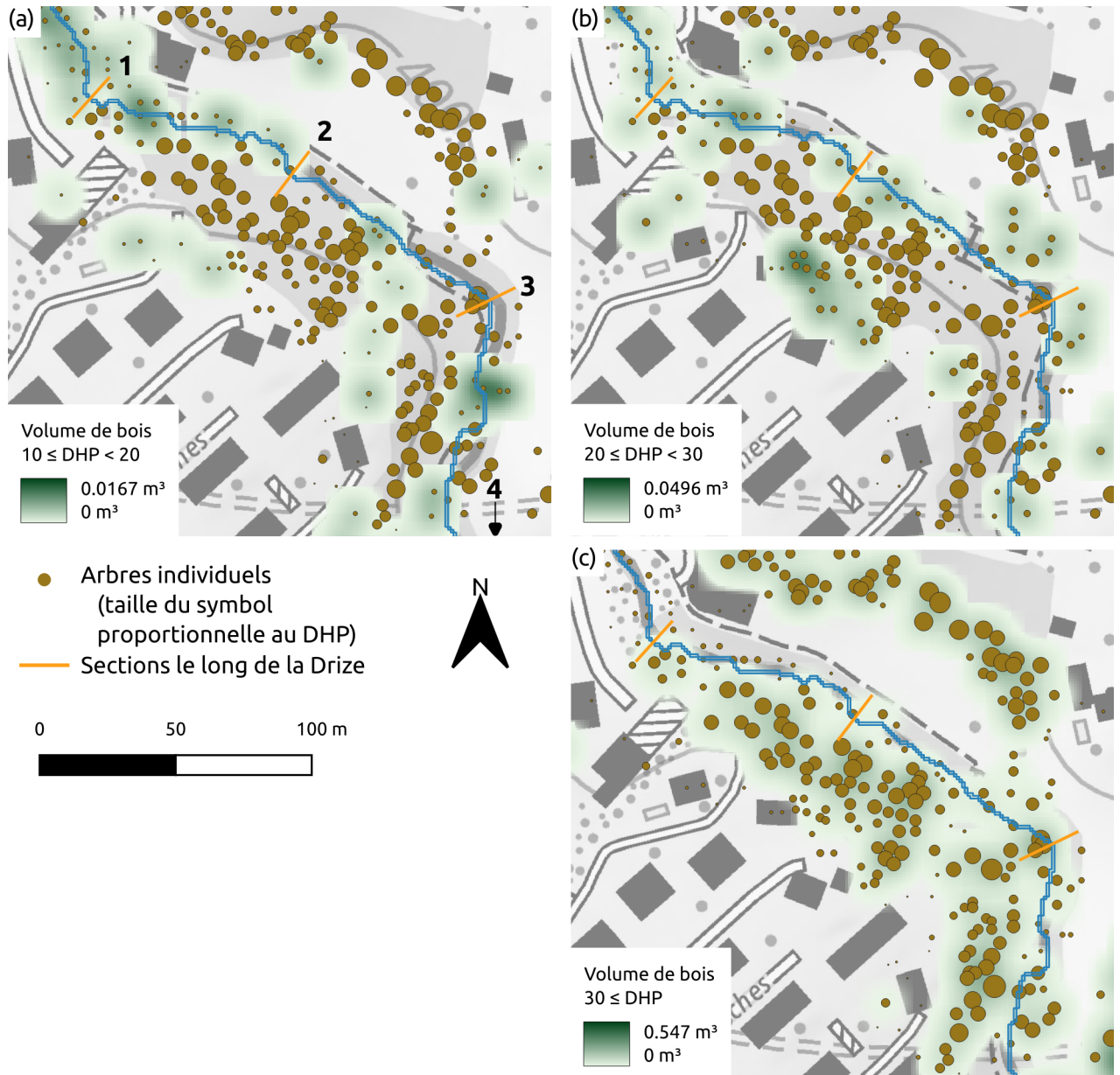


Figure 5.4 – Exemple de volume de bois par classe de DHP des arbres et de la position actuelle des arbres individuels le long de la Drize entre les sections 1 et 4 (voir (a)). (a) $10 \leq \text{DHP} < 20$, (b) $20 \leq \text{DHP} < 30$, (c) $\text{DHP} \geq 30$. Les valeurs de DHP sont exprimées en cm.

Sur la base des mesures de terrain effectuées aux différentes sections (voir Tableau 9.1 et Figure 4.1), la largeur du chenal W (m), et le diamètre médian des sédiments du lit D_{50}^{lit} (mm), ont été déterminés par ajustement linéaire en fonction de la pente du chenal S (m/m), et de la surface drainée du bassin versant A_c (m^2), selon les relations suivantes :

$$W = 0.28 \times 10^{-6} A_c + 0.476, \quad (5.1)$$

$$D_{50}^{\text{lit}} = -1.035 \times 10^{-8} A_c + 8.124 S + 0.261. \quad (5.2)$$

6 Résultats des simulations BankforMAP pour quatre scénarios définis

BankforMAP est utilisé pour calculer l'érosion effective des berges (berge concave et berge convexe) ainsi que la probabilité d'érosion. Le Tableau 6.1 présente la liste des fichiers raster (format TIFF) produits par BankforMAP, accompagnés de leur description.

BankforMAP réalise trois simulations correspondant à trois valeurs de contrainte de cisaillement critique : la contrainte critique median (probabilité d'érosion de 50 %), la contrainte critique correspondant au quantile 5 % (probabilité d'érosion de 95 %) et la contrainte critique correspondant au quantile 95 % (probabilité d'érosion de 5 %). Des valeurs plus faibles de contrainte de cisaillement critique conduisent à des conditions plus érosives, lesquelles sont considérées comme les moins probables (d'où une probabilité d'érosion de 5 %).

Table 6.1 – Liste des fichiers output de BankforMAP.

Fichier	Type	Unité	Description
erosion.tif	TIFF	m	Erosion total des berges (extérieure et intérieure)
erosion_probability.tif	TIFF	%	Probabilité d'occurrence d'érosion
rec_pot_1.tif	TIFF	m ³	Volume de bois flottant recruté potentiel, $10 \leq DHP < 20$ cm
rec_pot_2.tif	TIFF	m ³	Volume de bois flottant recruté potentiel, $20 \leq DHP < 30$ cm
rec_pot_3.tif	TIFF	m ³	Volume de bois flottant recruté potentiel, $30 \geq DHP$ cm
rec_eff_1.tif	TIFF	m ³	Volume de bois flottant recruté effectif, $10 \leq DHP < 20$ cm
rec_eff_2.tif	TIFF	m ³	Volume de bois flottant recruté effectif, $20 \leq DHP < 30$ cm
rec_eff_3.tif	TIFF	m ³	Volume de bois flottant recruté effectif, $30 \geq DHP$ cm
pot_transport_1.tif	TIFF	m ³	Volume potentiel de bois flottant transporté, $DHP = 10$ cm, $L = 1$ m
pot_transport_2.tif	TIFF	m ³	Volume potentiel de bois flottant transporté, $DHP = 20$ cm, $L = 2$ m
pot_transport_3.tif	TIFF	m ³	Volume potentiel de bois flottant transporté, $DHP = 30$ cm, $L = 3$ m
eff_transport_1.tif	TIFF	m ³	Volume effectif de bois flottant transporté, $DHP = 10$ cm, $L = 1$ m
eff_transport_2.tif	TIFF	m ³	Volume effectif de bois flottant transporté, $DHP = 20$ cm, $L = 2$ m
eff_transport_3.tif	TIFF	m ³	Volume effectif de bois flottant transporté, $DHP = 30$ cm, $L = 3$ m

La Figure 6.1 présente l'érosion effective, exprimée en mètres (berges concave et convexe), le long de la Drize et de ses affluents. L'érosion est maximale dans les zones où la contrainte de cisaillement critique est faible, où la pente du cours d'eau est élevée et où la végétation arborée est absente (absence de renforcement racinaire des berges).

La Figure 6.2 illustre un exemple de probabilité d'érosion le long de la Drize entre les sections 15 et 16 (voir Figure 4.1).

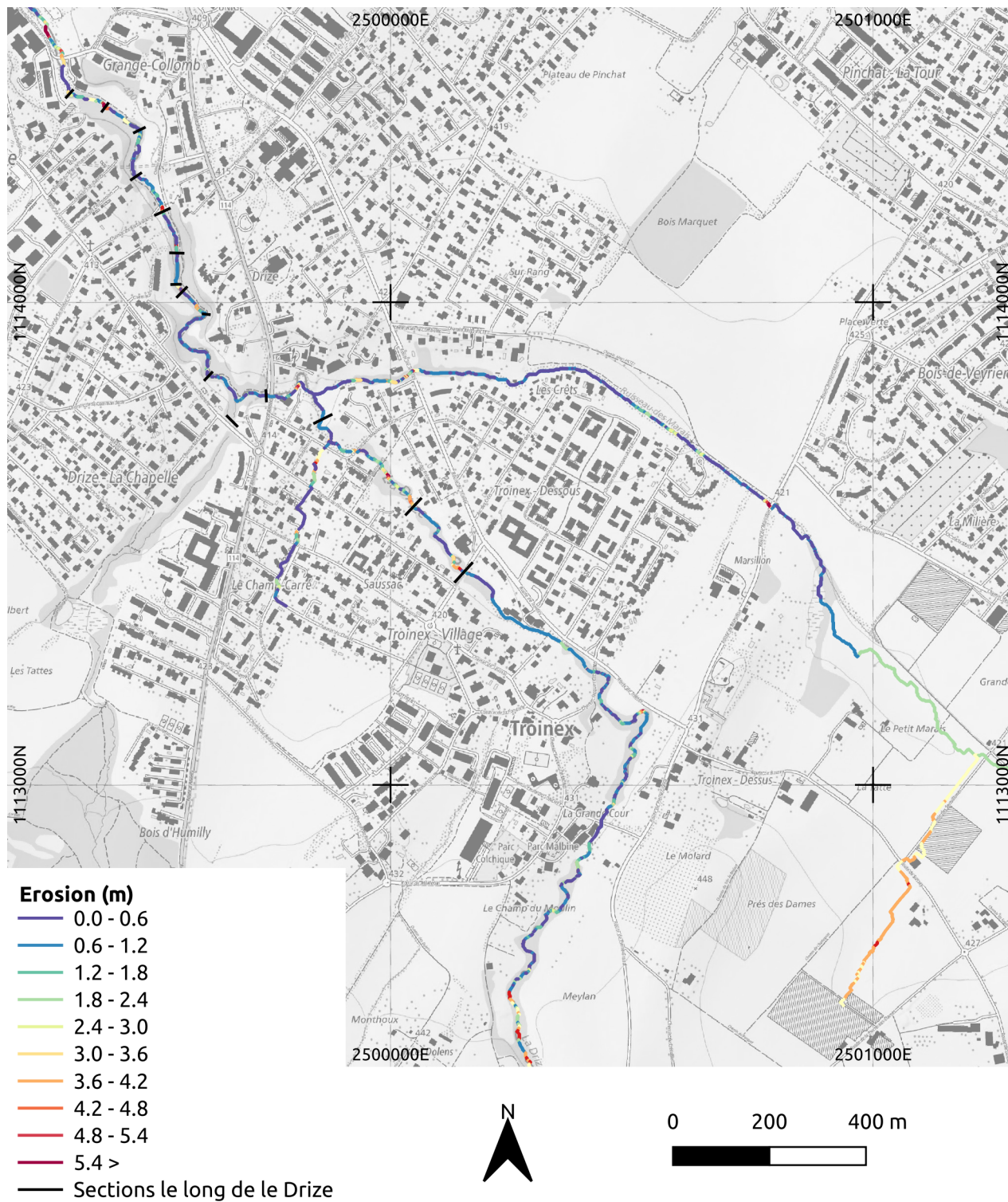


Figure 6.1 – Erosion des berges (extérieure et intérieure) pour le temps de retour $T_r = 300$ ans ($Q_{300} = 23.6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$).

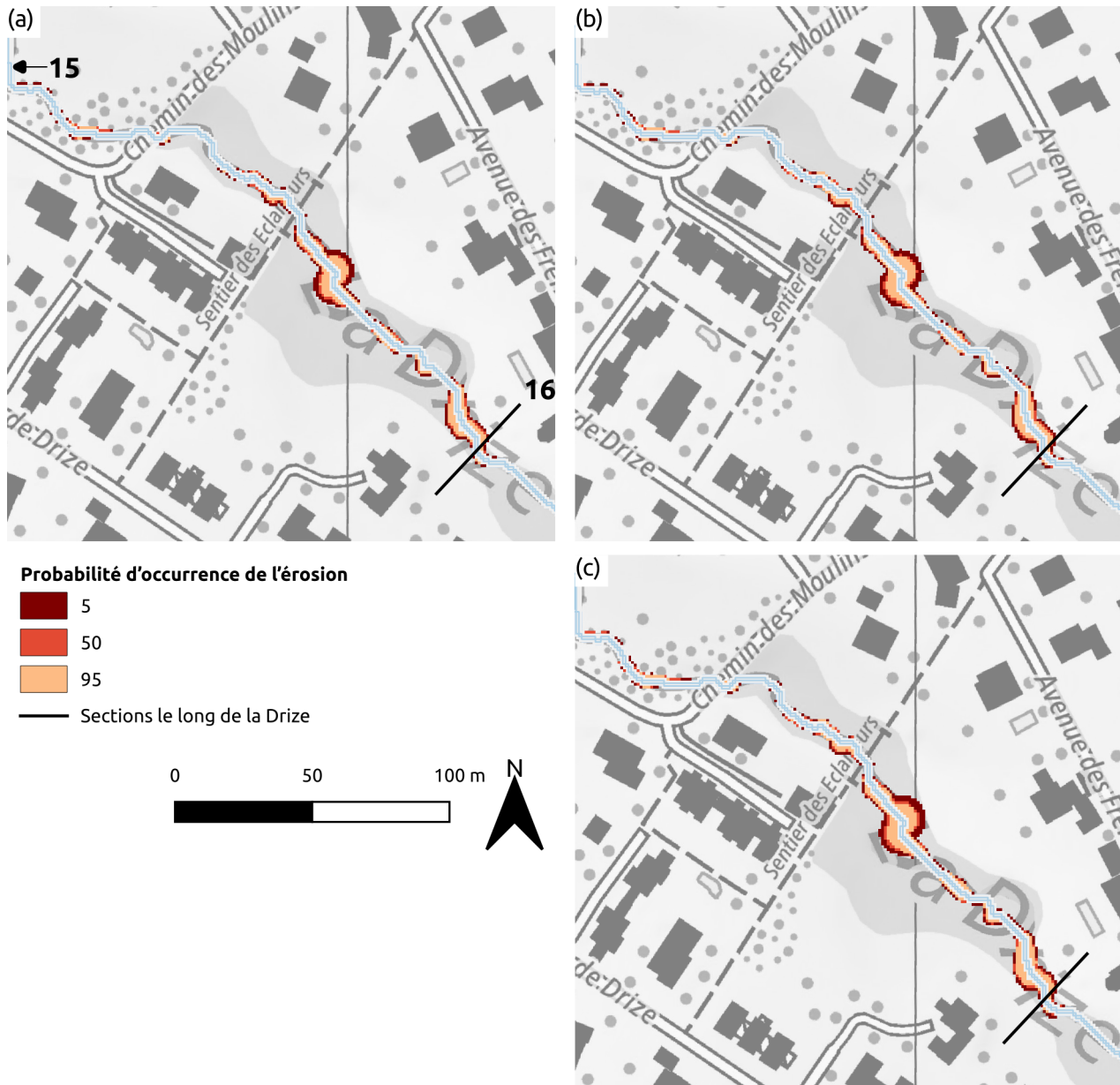


Figure 6.2 – Probabilité d’occurrence de l’érosion le long de la Drize entre les sections 15 et 16 (voir (a)) pour différent temps de retour. (a) $T_r = 30$ ans ($Q_{30} = 16.5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), (b) $T_r = 100$ ans ($Q_{100} = 20.2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), et (c) $T_r = 300$ ans ($Q_{300} = 23.6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). Les classes correspondent aux quantiles du coefficient de Shields (le quantile 5% représente la condition la plus érosive).

BankforMAP calcule le volume de bois flottant recruté comme le produit de la probabilité d’érosion par le volume de bois existant (voir Figure 5.4). La Figure 6.3 présente, pour la Drize entre les sections 15 et 16, les valeurs du bois flottant recruté pour un temps de retour de 300 ans, pour les trois classes de diamètre.

Le bois flottant transporté potentiel est présenté à la Figure 6.4, tandis que le bois flottant transporté effectif est illustré à la Figure 6.5.

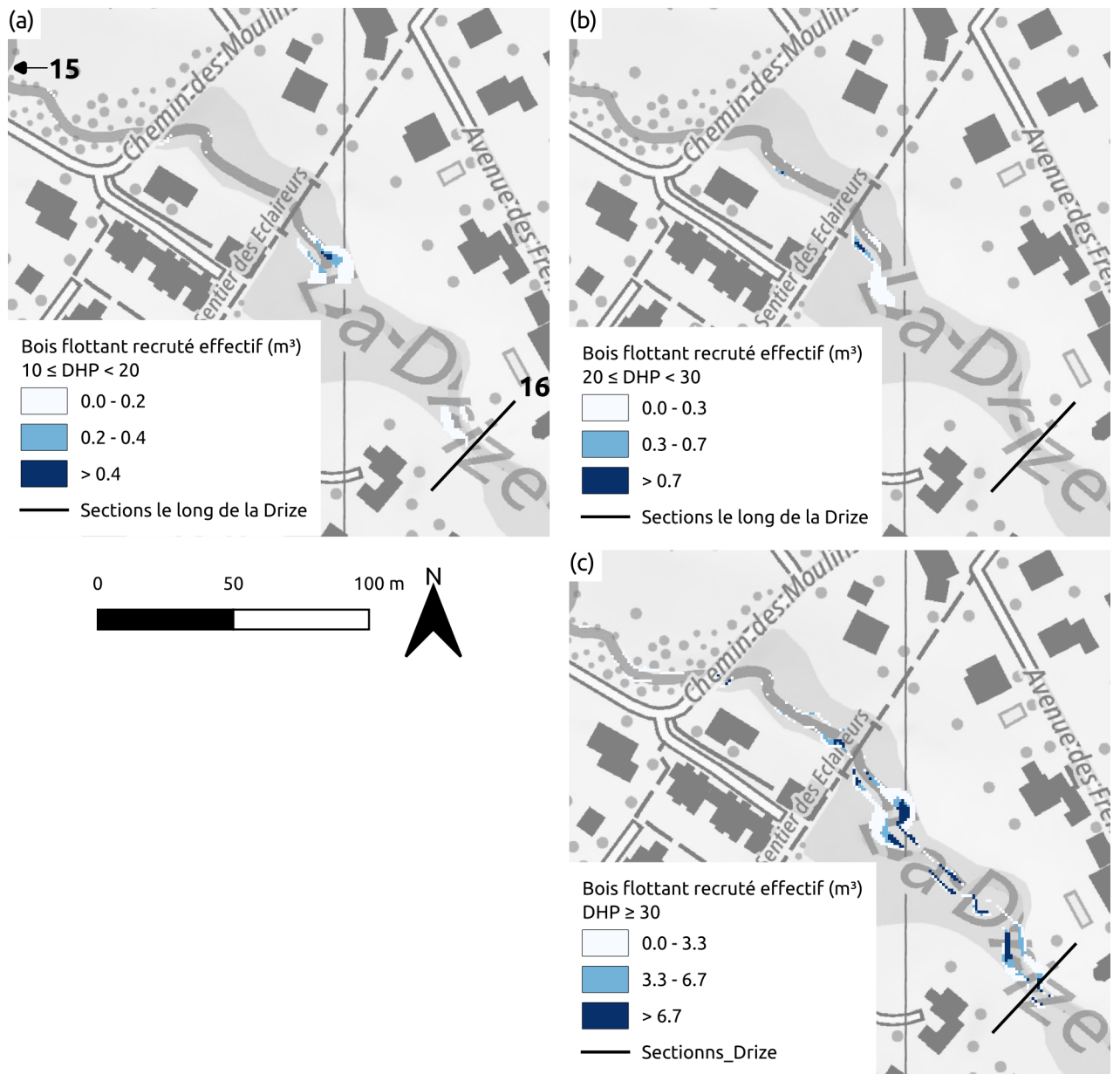


Figure 6.3 – Bois flottant recruté effectif le long de la Drize entre les sections 15 et 16 (voir (a)) pour un temps de retour de 300 ans selon trois classes de DHP (cm). (a) $10 \leq \text{DHP} < 20$, (b) $20 \leq \text{DHP} < 30$, et (c) $30 \geq \text{DHP}$. Les valeurs de DHP sont exprimées en cm.

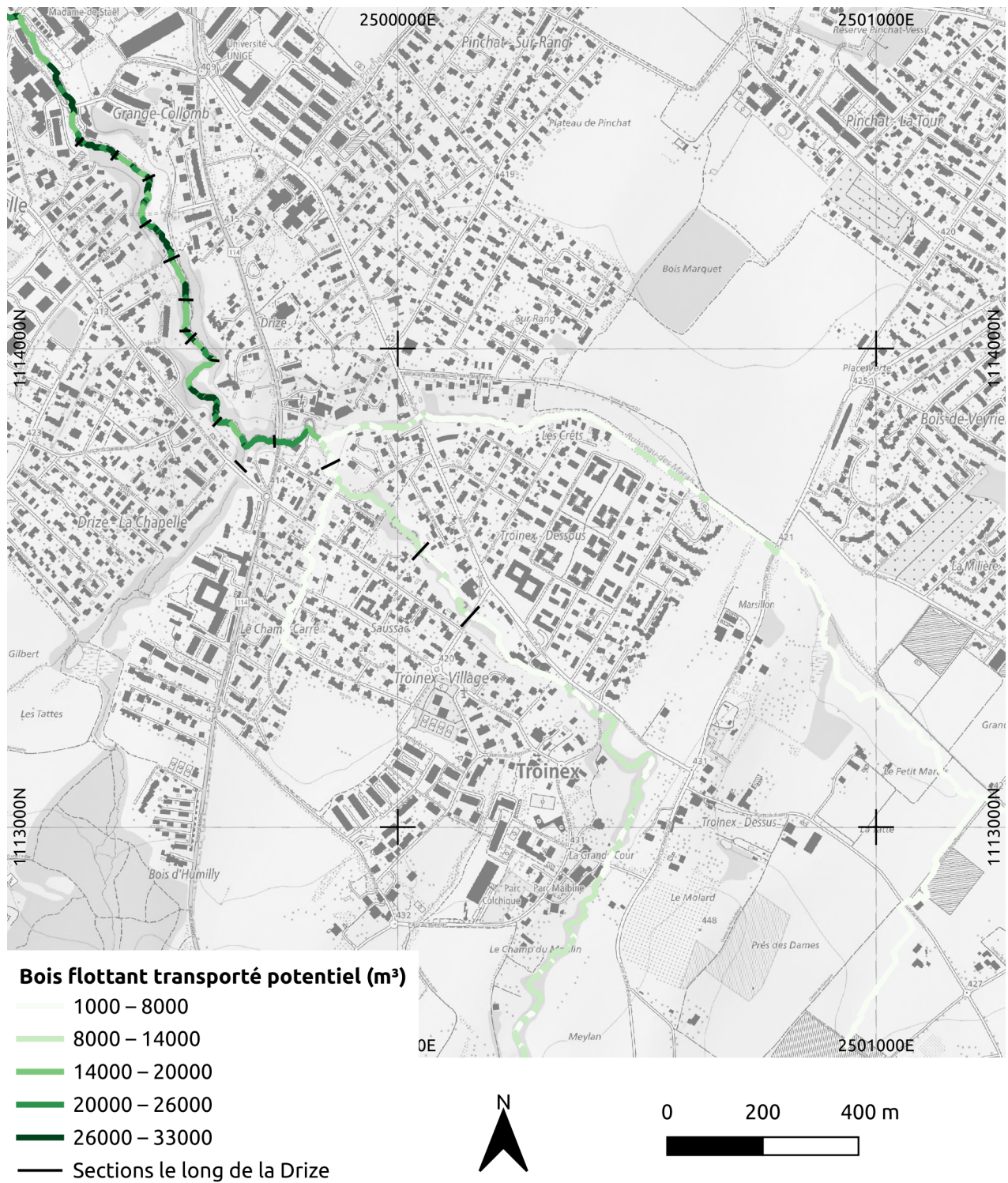


Figure 6.4 – Bois flottant transporté potentiel le long de la Drize pour un temps de retour de 300 ans et pour la classe de bois avec un DHP = 10 cm.

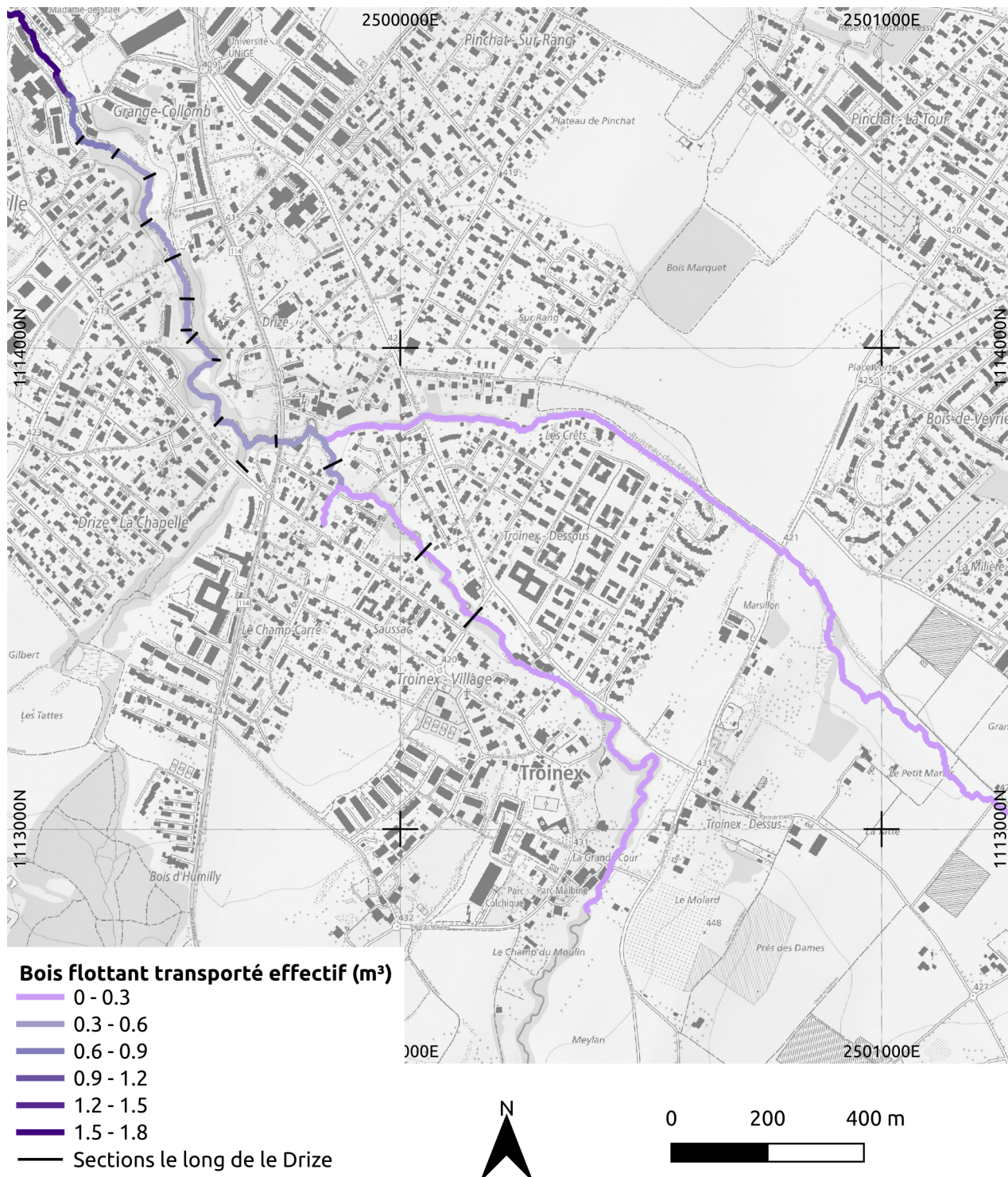


Figure 6.5 – Bois flottant transporté effectif le long de la Drize pour un temps de retour de 300 ans et pour la classe de bois avec un DHP = 10 cm.

7 Analyse des points faibles (ponts)

La présence de points faibles tels que les ponts et les ponceaux (buses) peut influencer de manière significative la dynamique du transport des bois flottant, le bilan final des débris ligneux transportés vers l'aval, ainsi que les processus d'érosion. Pour cette raison, nous avons réalisé une analyse systématique simplifiée des points faibles les plus pertinents dans la partie aval du bassin versant.

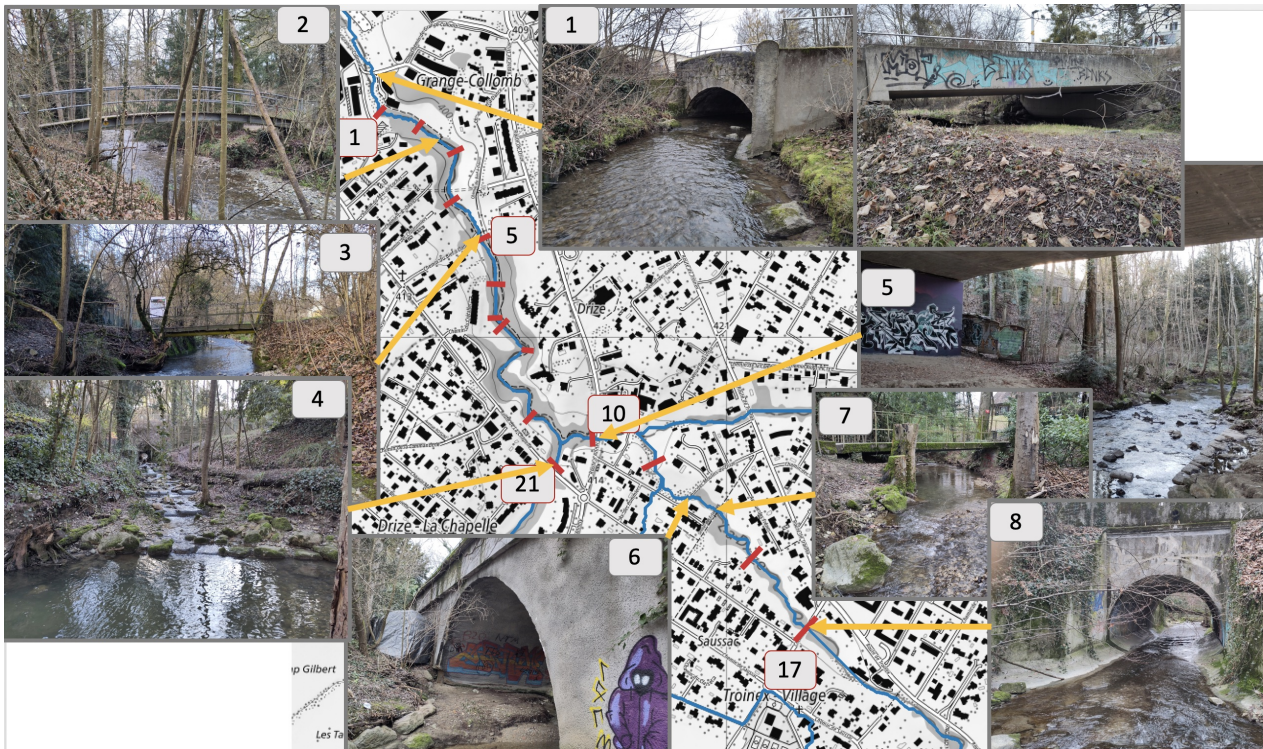


Figure 7.1 – Aperçu de la position des points faibles (p. ex. les ponts) le long de la rivière Drize. Les lignes rouges indiquent la position des sections analysées.

L'objectif de cette analyse est (i) d'évaluer quantitativement la probabilité de formation d'un embâcle (obstruction) dû aux bois flottants lors d'un événement extrême en condition saturé, Figure 7.2, et (ii) de quantifier le volume de bois flottant susceptible d'être retenu par ces structures en cas de blocage.

L'approche utilisée repose sur la quantification de trois critères :

1. Le volume de bois flottant disponible est-il suffisant pour provoquer un embâcle ? (En l'absence de transport de bois, la probabilité de blocage est nulle) [Bundesamt für Umwelt (BAFU), 2019]
2. Les plus grosses pièces transportées sont-elles suffisamment longues pour engendrer un blocage, soit par des pièces isolées, soit dans des conditions de transport saturé [Furlan et al., 2021]
3. La revanche est-elle suffisante pour permettre le passage du bois sous l'ouvrage (pont/ponceau) ? [Bundesamt für Umwelt (BAFU), 2019]

Le récapitulatif des valeurs calculées pour la vérification des critères est présenté dans les tableaux suivants 7.1.

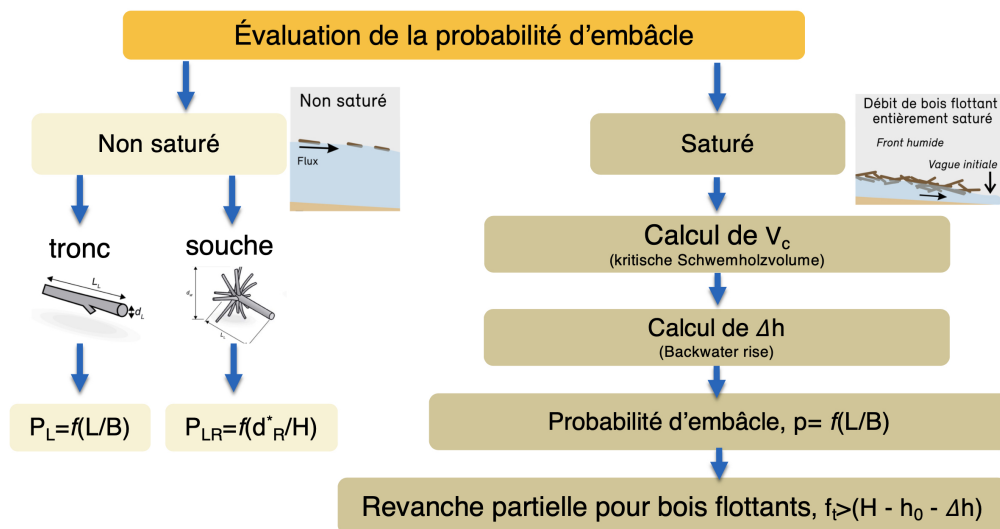


Figure 7.2 – Illustration du flux de travail pour le calcul de la probabilité d'embâcle due au bois flottant, en conditions de transport saturé et non saturé. Dans cette étude, les trois critères d'évaluation de la probabilité en conditions saturées sont analysés.

Table 7.1 – Résumé des principales caractéristiques relevées sur le terrain pour les sections des structures analysées. CA = surface du bassin versant (*catchment area*), H_{max} = hauteur maximale de l'ouverture, L_{max} = largeur maximale de l'ouverture, r = rayon (si section circulaire), K = coefficient de Strickler.

Structure ID	CA (km ²)	Inclination (-)	H_{max} (m)	L_{max} (m)	r (m)	K (m ^{1/3} s ⁻¹)
1	22	0.02	1.5	4.5	-	20
2	21.8	0.01	2	6	-	20
3	21.8	0.01	1.5	5	-	20
4	0.8	0.03	1.5	1.5	0.75	30
5	20.8	0.03	8	20	-	20
6	9.4	0.02	3	6	3	20
7	9.4	0.02	1.5	4	-	20
8	9.4	0.015	3	4	2	30

Pour quantifier le premier critère d'évaluation de la probabilité d'embâcle, il est nécessaire de calculer le volume caractéristique de bois flottant (V_c) et de le comparer au volume de bois effectivement transporté à cette section (V_{Iw}).

Le volume V_c peut être estimé comme le volume de bois nécessaire pour bloquer tout le volume disponible sous une structure, approximé par $V_c = H \times L \times P$ Bundesamt für Umwelt (BAFU) [2019], où H est la hauteur libre, L la largeur de l'ouverture et P une profondeur (ou épaisseur) représentative.

Le volume V_{Iw} peut être déterminé à l'aide de relations empiriques (p. ex. $V_{Iw} = 38 \cdot CA^{0.54}$) ou à partir des résultats de modélisation de *BankforMAP*. Lorsque $V_c < V_{Iw}$, on considère que le volume de bois disponible est suffisant pour obstruer complètement la structure; une probabilité d'obstruction élevée est alors attribuée (Prob_block_1).

La valeur calculée de la capacité vise à donner un ordre de grandeur de la capacité hydraulique d'écoulement lors d'un événement extrême, estimée à l'aide de l'approche de Strickler (voir Tableau 7.2). Ce calcul ne prend toutefois pas en compte l'influence du transport sédimentaire minéral ni celle du transport de bois flottant.

Table 7.2 – Résumé des principaux résultats hydrauliques (valeurs arrondies à 1 décimale).

A = Surface de la section hydraulique,

R_hyd = Rayon hydraulique,

Q_pot = Capacité d'écoulement (débit potentiel),

v_mean = Vitesse moyenne d'écoulement,

Q_ext = Débit extrême calculé (hydrologique),

Capacité = Pourcentage de la capacité d'écoulement de la structure par rapport à l'événement hydrologique extrême,

V_c = Volume de bois flottant caractéristique (volume de bois nécessaire pour bloquer une structure),

V_l.lw = Volume de bois foisonné effectivement transporté à cette section,

Prob_block_1 = Probabilité d'embâcle basée sur le premier critère d'évaluation (volume critique).

Structure (ID)	A (m ²)	R_hyd (m)	Q_pot (m ³ s ⁻¹)	v_mean (m s ⁻¹)	Q_ext (m ³ s ⁻¹)	Capacité (%)	V_c (m ³)	V_l.lw (m ³)	Prob_block_1 (-)
1	4.5	0.8	10.5	2.3	32.0	33.0	33	105	1
2	12.0	1.2	27.1	2.3	31.7	85.0	85	104	1
3	7.5	0.9	14.4	1.9	31.7	45.0	45	104	1
4	1.2	0.2	2.4	2.0	1.2	207.0	207	17	1
5	100.0	2.6	660.3	6.6	30.3	2182.0	2100	101	0
6	12.0	1.2	38.3	3.2	13.7	280.0	72	66	0
7	4.0	0.7	8.6	2.2	13.7	63.0	16	66	1
8	8.0	1.3	35.6	4.5	13.7	260.0	32	66	1

Le deuxième critère d'évaluation de la probabilité d'obstruction consiste à vérifier si les dimensions des bois flottants peuvent effectivement provoquer un blocage. On suppose en effet que, si les plus grosses pièces de bois transportées ne sont pas suffisamment grandes, aucun embâcle ne se formera (voir Tableau 7.3).

On distingue généralement la probabilité de blocage due à des pièces isolées ($P_{lw, single}$) de celle associée à un transport saturé en bois ($P_{lw, sat}$). Le scénario $P_{lw, sat}$, généralement le plus pessimiste, est retenu ici.

Cette probabilité dépend du rapport entre la longueur des billes et la largeur de l'ouverture de la structure, ainsi que du rapport entre le diamètre à hauteur de poitrine (DHP) des billes et la hauteur de l'ouverture. Les valeurs de DHP et de longueur des billes sont fixées sur la base des observations de terrain.

Table 7.3 – Valeurs des paramètres géométriques de bois flottant (DHP et longueur) et des indices de probabilité d'embâcle associés ($P_{lw, \text{single}}$ et $P_{lw, \text{sat}}$) utilisés pour l'évaluation du deuxième critère.

DHP_log = Diamètre moyen d'une pièce de bois flottant (DHP),

L_log = Longueur moyenne d'une pièce de bois flottant,

p_lw_single = Probabilité d'embâcle pour une pièce de bois isolée,

p_lw_sat = Probabilité d'embâcle pour un transport de bois saturé,

Prob_block_2 = Probabilité d'embâcle basée sur le deuxième critère d'évaluation (probabilité d'obstruction).

Structure (ID)	DHP_log (m)	L_log (m)	p_lw_sigle (-)	p_lw_sat (-)	Prob_block_2 (-)
1	0.30	5.00	0.08	1	1
2	0.30	5.00	0.04	0.98	1
3	0.30	5.00	0.07	1	1
4	0.30	5.00	0.38	1	1
5	0.30	5.00	0.00	0	0
6	0.30	5.00	0.04	0.32	0
7	0.30	5.00	0.10	1	1
8	0.30	5.00	0.10	0.56	0

Comme troisième critère, on considère qu'une structure ne peut être obstruée par des bois flottants que si l'espace disponible sous le bord supérieur de l'ouverture (appelé *Freibord*) est insuffisant. La valeur du *Freibord* peut être estimée en fonction du DHP des billes de bois [Bundesamt für Umwelt (BAFU), 2019] et, à titre conservatif, elle est fixée ici à 1.5 m. Cela signifie que l'on suppose qu'au moins 1.5 m d'espace libre doit être disponible entre le niveau d'écoulement en présence de bois flottants et le bord supérieur de l'ouverture.

Le niveau d'écoulement avec bois flottants n'est pas équivalent à la hauteur d'eau (et de sédiments minéraux) seule. En raison de l'effet de remous (*backwater rise*), la hauteur d'écoulement en présence de bois est plus élevée et peut être estimée [Bundesamt für Umwelt (BAFU), 2019]. Dans le tableau 7.4, on calcule la hauteur maximale d'eau et de sédiments minéraux admissible pour éviter l'obstruction, notée h_c (hauteur critique). Si la hauteur critique h_c est inférieure à la hauteur d'écoulement associée à un événement de débit extrême, notée h_{ext} , alors une probabilité d'obstruction élevée est retenue (**Prob_block_3**).

Table 7.4 – Résumé des résultats liés au risque de remous et à la rétention de bois (valeurs arrondies à 2 décimales).
 f_t (revanche admissible) : revanche partielle liée au bois flottant ; distance libre entre la structure et le niveau d'eau (en tenant compte de l'effet du transport de bois flottant).
 Δh (backwater rise) : surélévation du niveau d'eau due à l'effet de freinage de l'accumulation/front de bois flottant transporté.
 h_c : tirant d'eau critique ($= H_{\max} - f_t - \Delta h$).
 h_{ext} : tirant d'eau correspondant à un événement de débit extrême (eau seule).
Prob_block_3 : probabilité d'embâcle basée sur le troisième critère (revanche).
Prob_block_tot : probabilité totale d'embâcle.
LW_Retention : volume de bois flottant retenu/déposé à la suite d'un embâcle (estimation avec vides).

Structure (ID)	f_t (m)	Δh (m)	h_c (m)	h_{ext} (m)	Prob_block_3 (-)	Prob_block_tot (-)	LW_Retention (m ³)
1	1.50	0.64	-0.64	2.30	1	1	27
2	1.50	0.60	-0.10	2.20	1	1	72
3	1.50	0.43	-0.43	2.67	1	1	45
4	1.50	0.47	-0.47	0.40	1	1	7.2
5	1.50	5.11	1.39	0.63	0	0	0
6	1.50	1.20	0.30	1.00	1	0	0
7	1.50	0.55	-0.55	1.40	1	1	24
8	1.50	2.32	-0.82	1.20	1	0	0

L'analyse des points faibles le long de la partie aval du bassin versant montre que seuls les ponts d'ID 5, 6 et 8 présentent une faible probabilité de formation d'embâcles par des bois flottants lors d'événements de débit extrême. La capacité de rétention, calculée de manière conservatrice, de l'ensemble des structures obstruées est d'environ 175 mètres cubes.

8 Synthèse des résultats

Le volume de bois flottant de grande taille qui atteint une section donnée de cours d'eau lors d'un événement de débit extrême est appelé " volume effectif de bois flottant transporté " (effective transported large wood volume). Ce volume est estimé comme le bilan du bois (frais et mort) recruté, mobilisé et transporté le long de l'ensemble du réseau hydrographique.

Ainsi, même si le débit pourrait, en théorie, transporter un volume important de bois (" volume potentiel de bois flottant transporté ", potential transported large wood volume), seule une fraction plus faible est effectivement transportée, en raison de la disponibilité limitée de bois susceptible d'être recruté et mobilisé le long du cours d'eau.

Pour comparer les valeurs de volume effectif transporté et, le cas échéant, de volume déposé, il est essentiel de préciser si le volume est calculé ou mesuré en incluant les vides (espaces entre les billes) ou en les excluant. Dans le cas des calculs réalisés avec BankforMAP/NET, le volume de bois flottant n'inclut pas les vides. Dans d'autres études, ce volume est au contraire exprimé en tenant compte des vides. Pour faciliter la comparaison, une approximation couramment utilisée consiste à multiplier le volume sans vides par un facteur 3.3 (a : Facteur d'encombrement) [Bundesamt für Umwelt (BAFU), 2019] afin d'obtenir une estimation avec vides.

Un autre élément à considérer pour comparer les résultats de cette étude à ceux d'événements antérieurs est l'influence des ouvrages et de la végétation sur la rétention du bois flottant, un processus qui n'est pas explicitement représenté dans le modèle. Lors de certains épisodes, le volume atteignant l'aval peut donc être inférieur à celui calculé, une partie du bois étant piégée par des structures (p. ex. des ponts) ou immobilisée par une végétation rivulaire stable. Les probabilités de blocage présentées au chapitre précédent permettent d'en déduire un ordre de grandeur des quantités retenues par chaque ouvrage. Dans des scénarios optimistes, ces estimations (en incluant les vides) peuvent être déduites du volume effectif modélisé (également exprimé avec vides). Ainsi, en cas de blocage, jusqu'à environ 50 m³ de bois flottant solide de grande taille (175/3.3) peuvent être retranchés des valeurs modélisées du volume effectif transporté.

Outre le volume potentiel de bois flottant retenu par des structures, l'effet de rétention exercé par la végétation peut également être pris en compte au moyen d'un facteur de réduction, estimé dans cette étude à 0.34. Cette estimation repose sur des observations empiriques issues de l'événement du 9 juin 2024. Lors de cet épisode, environ 30 m³ de dépôts de bois flottant (avec vides, V_f) ont été recensés dans la section aval terminale de la zone d'étude. Quelques dépôts de moindre ampleur ont également été observés le long du cours d'eau. Sur cette base, le volume final des dépôts a été calculé ($V_{LWI,Transp,eff,cor}$).

Le tableau suivant (Tableau 8.1) montre que les valeurs modélisées du volume effectif de bois flottant transporté varient entre 5 et 108 m³ (prise en compte des vides des depot). Ces résultats se situent dans la partie basse de la plage de valeurs rapportées dans la Figure 8.1 pour des bassins versants de dimensions comparables. Le fait qu'ils se placent dans la moitié inférieure de la distribution (sous le 50e percentile) peut être considéré comme réaliste, principalement en raison du caractère urbanisé de la partie aval du cours d'eau. Une part importante des berges y est stabilisée par des mesures d'ingénierie, ce qui limite l'érosion latérale et, par conséquent, le recrutement de bois et de végétation. De plus, la densité globale de la végétation y est nettement plus faible que dans des secteurs non urbanisés.

Une comparaison des résultats de cette étude avec les méthodes empiriques décrites par Piton and Recking [2016], selon une approche similaire à celle discutée précédemment [Bundesamt für Umwelt (BAFU), 2019], met en évidence une divergence notable. Les équations 1 et 3 proposées par Piton and Recking [2016], qui sont applicables aux paramètres de la présente étude, conduisent à une estimation des volumes de gros bois comprise entre 360 et 1000 m³ (tenant compte des vides). Ces valeurs sont nettement supérieures à celles obtenues à partir des simulations réalisées avec BankforMAP.

Étant donné que tous les résultats de modélisation sont influencés par les incertitudes associées aux paramètres utilisés ainsi que par la représentativité des observations empiriques, il convient de souligner que, dans le cadre de projets tels que celui envisagé dans le bassin versant étudié, une modélisation détaillée telle que celle réalisée avec BankforMAP présente plusieurs avantages importants par rapport aux équations empiriques classiques :

1. elle permet une définition explicite des scénarios de débit associés à des périodes de retour spécifiques, c'est-à-dire à des probabilités d'occurrence des événements ;
2. elle prend en compte les conditions actuelles et spécifiques du cours d'eau et du bassin versant, notamment en ce qui concerne la stabilité des berges et l'état de la végétation riveraine, qui déterminent le potentiel de recrutement de bois flottant ;
3. elle couple différents processus de recrutement, lesquels peuvent varier considérablement en fonction des caractéristiques du bassin versant ;
4. elle fournit une information spatialisée sur les sources potentielles de sédiments et de gros bois, facilitant ainsi la priorisation des mesures techniques et biologiques ;
5. enfin, BankforMAP étant un modèle probabiliste, il permet de quantifier l'effet des incertitudes associées aux paramètres les plus importants.

Bien que des incertitudes soient présentes dans tout type d'approche, il est important de souligner que les estimations obtenues à partir des formules empiriques sont nettement plus incertaines que celles issues du modèle proposé. C'est précisément pour cette raison que la présente analyse peut être considérée comme une estimation détaillée, accompagnée d'une quantification explicite de l'incertitude, ce qui n'est généralement pas possible avec les formules empiriques.

Cela étant dit, les principales incertitudes restent liées à des processus stochastiques qui doivent, dans tous les cas, faire l'objet d'une évaluation régulière.

Dans le cadre de cette étude, seules des simulations intégrant l'effet des racines sur la stabilité des berges ont été réalisées (scénario " avec végétation "). Les travaux visant explicitement à quantifier l'effet stabilisateur de la végétation rivulaire peuvent, en revanche, comparer des simulations avec et sans végétation afin d'évaluer l'efficacité des forêts riveraines de protection le long des cours d'eau.

Les résultats de cette étude indiquent que le volume de bois flottant déposé, vides compris, atteint **70 m³** pour un événement de période de retour de 300 ans.

Table 8.1 – Résumé des résultats. Les valeurs du transport potentiel de bois flottant (DHP = 10 cm) (tenant compte des vides) sont évaluées à $x = 2\,499\,268$ m et $y = 1\,114\,597$ m.

Scénario	Vég.	$V_{LW,s,Recruit,eff}$ (m³)	$V_{LW,s,Transp,pot}$ (m³)	$V_{LW,s,Transp,eff}$ (m³)	$V_{LW,s,Transp,eff,cor}$ (m³)	$V_{LW,l,Transp,eff,cor}$ (m³)
Q ₂	avec	5	10 290	5	1	3
Q ₃₀	avec	82	14 410	82	16	54
Q ₁₀₀	avec	96	15 660	96	19	63
Q ₃₀₀	avec	108	16 690	108	21	71

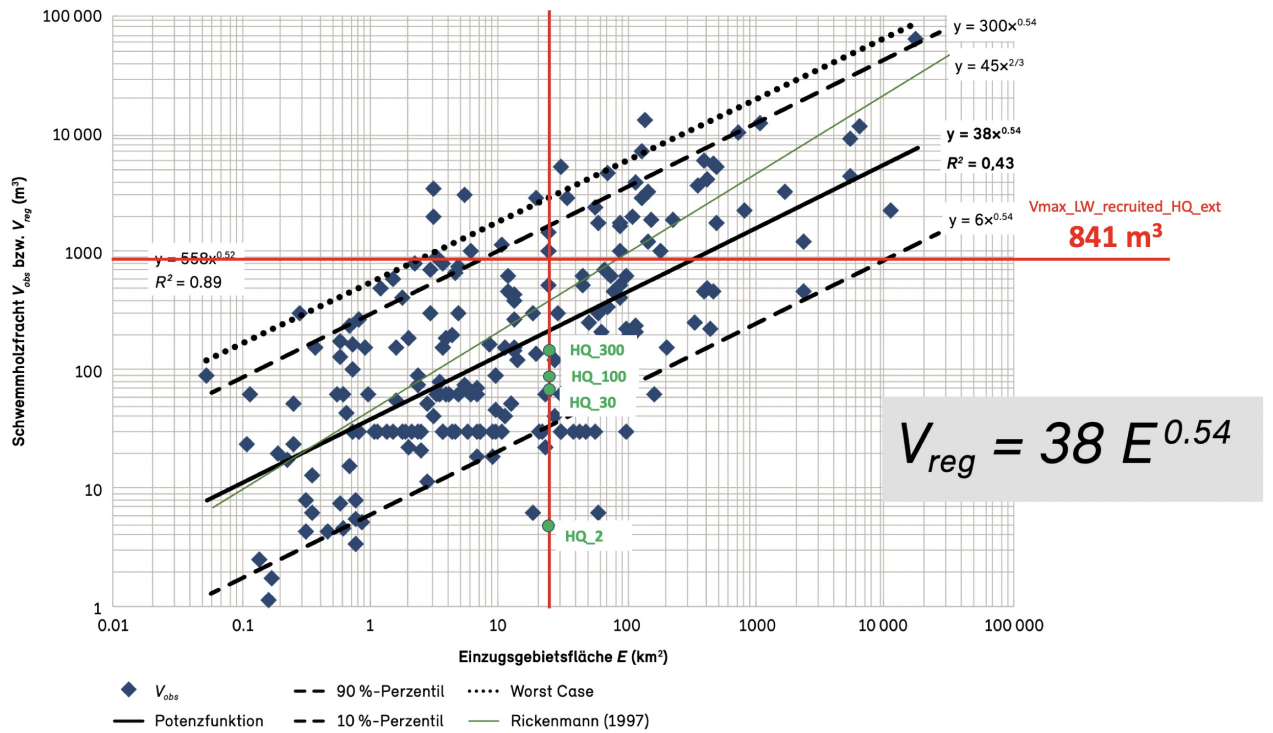


Figure 8.1 – Comparaison des résultats avec des formules empiriques [Bundesamt für Umwelt (BAFU), 2019]. La valeur maximale du volume potentiel de bois flottant mobilisable, égale à 841 m³, est calculée en considérant l'érosion des berges lors d'un événement extrême.

Zollikofen, 1.5.2026

BFH - Hochschule für Agrar-, Forst- und Lebensmittelwissenschaften HAFL
Team of Forest Soil Sciences and Ecological Engineering
Prof. Dr. Massimiliano Schwarz

9 Annexes

9.1 Glossaire

Table 9.1 – Liste.

BankforMAP/NET paramètres)			
Symbole	Paramètre	Valeur	Unité
A_{asc}	Valeur du facteur de l'hydrogramme montant	3.25	
A_{min}	Valeur minimum de la surface des bassins versant	2.0	km ²
D	Durée de la crue	6	heures
DHP	Diamètre à hauteur de poitrine	6	m
k_e	Coefficient d'érosion	6.7×10^{-7}	m Pa ^{-0.5} s ⁻¹
k_r	Strickler coefficient	calculé	m ^{1/3} s ⁻¹
m_{90}^{lit}	Facteur multiplicatif pour calculer D_{90} à partir de D_{50}	2	
n	Gaukler-Manning coefficient	$1/k_r$	s m ^{-1/3}
R_{search}	Rayon de recherche des arbres pour le calcul d'une moyenne de densité racinaire	7.5	m
R_{stream}^{loc}	Rayon de recherche du cours d'eau pour le calcul des propriétés locales	50	m
R_{stream}^{moy}	Rayon de recherche du cours d'eau pour le calcul des propriétés moyennes	200	m
h_{berge}	Hauteur des berges pour le calcul de la profondeur maximale des racines	20	cm
β_{berge}	Angle des berges	60	deg

Table 9.2 – Liste des symboles utilisés pour l' hydrologie.

Hydrologie			
Symbole	Paramètre	Valeur	Unité
Q	Débit liquide	–	$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$
Q_{T_r}	Débit associé à une période de retour T_r (p. ex. $Q_2, Q_{30}, Q_{100}, Q_{300}$)	–	$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$
Q_{\max}	Débit de pointe (valeur maximale d'un événement)	–	$\text{m}^3 \text{s}^{-1}$
q	Débit spécifique (par unité de largeur, selon définition retenue)	–	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
Q_{spez}	Abflussspende (débit spécifique par surface de bassin versant)	–	$\text{m}^3 \text{s}^{-1} \text{km}^{-2}$
v_0	Vitesse d'écoulement (amont)	–	m s^{-1}
g	Accélération de la pesanteur	9.81	m s^{-2}
h_0	Tirant d'eau amont	–	m
h	Tirant d'eau résultant (p. ex. sous effet de remous)	–	m
Δh	Surélévation du niveau d'eau (remous / backwater rise)	–	m
h_c	Tirant d'eau critique admissible sous un ouvrage (critère de revanche)	–	m
f_e	revanche, Freibord	–	m
f_t	revanche admissible liée au transport de bois (ponts)	–	m

Table 9.3 – Liste des symboles utilisés pour la Géométrie du cours d'eau.

Géométrie du cours d'eau / bassin versant			
Symbole	Paramètre	Valeur	Unité
W	Largeur du chenal	–	m
L	Longueur du chenal	–	km
S	Pente longitudinale du chenal	–	m/m
E	Surface du bassin versant (Einzugsgebietsfläche)	–	km^2
A_c	Surface drainée cumulée locale (raster FAA)	–	m^2
P_h	Durée des précipitations	–	h
P_{mm}	Précipitation moyenne	–	mm
P_{vol}	Volume total de précipitations	–	m^3

Table 9.4 – Liste des symboles utilisés pour calculs d'érosion.

Granulométrie / contraintes			
Symbole	Paramètre	Valeur	Unité
D_{50}^{lit}	Diamètre médian des sédiments du lit	–	mm
D_{50}^{berge}	Diamètre médian des sédiments de berge	–	mm
d_m	Diamètre moyen des grains (si utilisé)	–	m
τ_c	Contrainte de cisaillement critique (moyenne)	–	Pa
σ_{τ_c}	Écart-type de la contrainte critique	–	Pa
s	Densité relative des sédiments mineral (≈ 2.65)	2.65	–
F	Charge solide (Feststofffracht)	–	m ³
V_w	Volume d'eau (Wasserfracht)	–	m ³

Table 9.5 – Liste des symboles utilisés pour le bois flottant.

Bois flottant			
Symbole	Paramètre	Valeur	Unité
d	Diamètre d'une pièce de bois flottant	–	m
d_L	Diamètre du tronc / du bois	–	m
d_W	Diamètre du système racinaire (souche)	–	m
LL	Longueur d'une pièce de bois flottant	–	m
D^*	Diamètre relatif du tronc	–	–
L^*	Longueur relative du tronc	–	–
ρ_L	Densité du bois	–	kg m ⁻³
V_s	Volume solide (sans vides)	–	m ³
V_l	Volume en vrac (avec vides)	–	m ³
a	Facteur d'encombrement (Auflockerungsfaktor), $a = V_l/V_s$	3.3 (2-5)	–
V_{pot}	Potentiel de bois flottant (Schwemmholzpotenzial)	–	m ³
V_{obs}	Volume de bois flottant effectivement transporté (mesuré/observé)	–	m ³
V_{est}	Volume estimé	–	m ³
V_{reg}	Volume estimé par régressions empiriques (V_{reg})	–	m ³
V_c	Volume caractéristique de bois pour obstruer une structure	–	m ³
$V_{LW, \text{Transp, eff}}$	Volume effectif de bois flottant transporté (BankforMAP)	–	m ³
$V_{LW, \text{Transp, pot}}$	Volume potentiel de bois flottant transporté (BankforMAP)	–	m ³
$V_{LW, \text{Recruit, eff}}$	Volume effectif de bois flottant recruté (BankforMAP)	–	m ³
$p, \text{ Prob_block}$	Probabilité d'obstruction (Verklaesungswahrscheinlichkeit)	–	–

9.2 Recommandations à l'attention des forestiers

- Éviter le dépôt et le stockage de bois (rémanents, grumes, tas de branches) à moins de 10 m des berges et du lit du cours d'eau (zone tampon), afin de limiter le risque d'entraînement lors des crues.
- Utiliser la carte du *volume de bois flottant potentiellement recruté* pour le scénario **HQ_{ext}** afin d'identifier les zones sensibles (source de bois flottant) (*hotspots*) sur le terrain. Pour chaque zone, réaliser une évaluation locale :
 - déterminer si les arbres sont susceptibles d'être recrutés et ensuite transportés (probabilité élevée d'érosion/recrutement et de mise en mouvement) ;
 - ou, au contraire, si leur rôle de stabilisation des berges est dominant.Le cas échéant, des outils d'analyse de stabilité des berges (p. ex. *BankforNET*) peuvent être mobilisés pour appuyer le diagnostic.
- En présence d'arbres instables en rive, privilégier des interventions ciblées (p. ex. sécurisation, gestion progressive de la ripisylve) plutôt que des coupes étendues, afin de préserver les fonctions écologiques et la stabilité morphologique du cours d'eau.



Figure 9.1 – Éviter de stocker du bois flottant (LW) dans le lit ou à proximité du chenal actif.



Figure 9.2 – Un exemple clair de la contribution importante du renforcement racinaire à la stabilité des berges.



Figure 9.3 – Exemples de situations où les racines ne contribuent pas (ou peu) à la stabilisation, car la zone de contrainte de cisaillement maximale se situe plus en profondeur que la principale zone d'enracinement (distribution verticale des racines).



Figure 9.4 – Exemples de blocage : dans certains cas, le bois recruté est d'une taille telle que son potentiel de transport devient pratiquement nul. En conséquence, une partie du bois de plus petite dimension se retrouve également déposée au même endroit.

9.3 Description du flux de travail

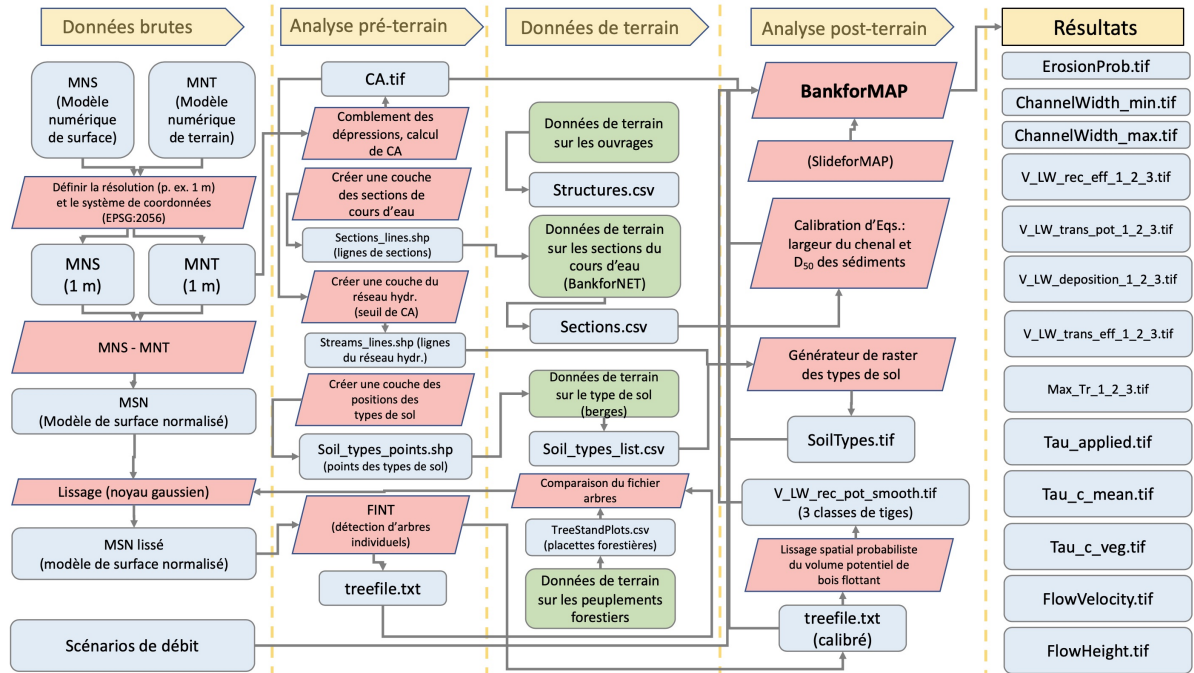


Figure 9.5 – Illustration du flux de travail utilisé dans cette étude.

9.4 Produits potentiels supplémentaires de l'analyse pour des applications pratiques.

9.4.1 Cartes des danger d'érosion hydraulique des berges.

New concept for hydraulic bank erosion hazards maps

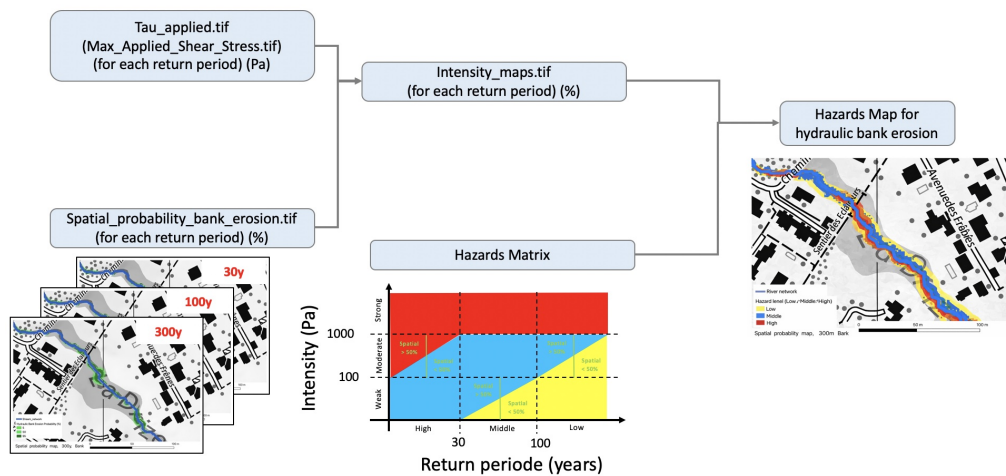


Figure 9.6 – Illustration du flux de travail pour l'élaboration des cartes des dangers.

9.4.2 Cartes des forêts de protection le long des berges.

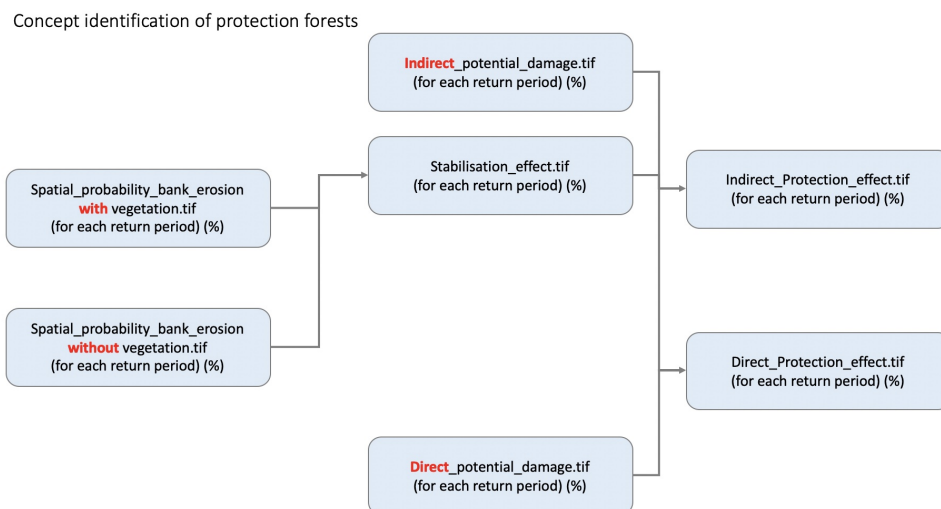


Figure 9.7 – Illustration du flux de travail pour l'identification des forêts de protection.

9.4.3 Cartes de risque liées au recrutement potentiel de bois flottant.

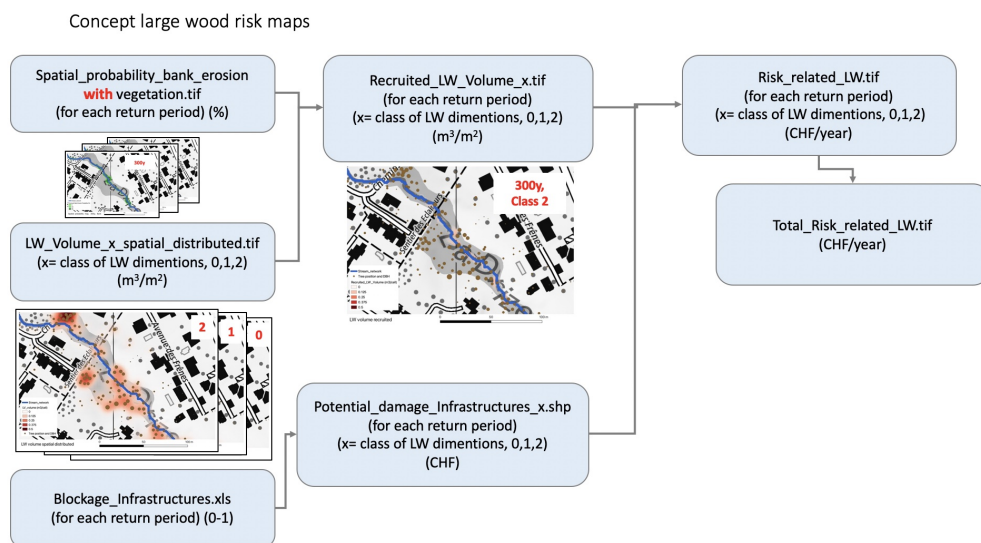


Figure 9.8 – Illustration du flux de travail pour l'analyse du risque lié au bois flottant.

9.5 Extrapolation des débits de crue à l'aide d'une loi de Gumbel

Afin d'estimer les débits associés à des périodes de retour plus courtes (p. ex. 2 et 30 ans) à partir de valeurs connues pour des périodes de retour élevées, nous utilisons la loi des valeurs extrêmes de type I (loi de Gumbel, EV1). Cette approche est couramment appliquée en hydrologie pour modéliser les maxima annuels et relier la probabilité de non-dépassement d'un événement à un quantile de débit.

Formulation. Dans le cadre du modèle de Gumbel, le quantile de débit Q_T correspondant à une période de retour T (en années) s'écrit

$$Q_T = u + a y_T, \quad (9.1)$$

où u est le paramètre de position et a le paramètre d'échelle. Le terme y_T est la *variée réduite* (reduced variate) définie par

$$y_T = -\ln[-\ln(F_T)], \quad F_T = 1 - \frac{1}{T}, \quad (9.2)$$

avec F_T la probabilité de non-dépassement (c.-à-d. la probabilité que l'événement maximal annuel reste inférieur ou égal au quantile Q_T).

Données disponibles. Les quantiles suivants sont fournis :

$$- Q_{100} = 20.2 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1},$$

$$- Q_{300} = 23.6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}.$$

Ces deux points permettent d'estimer les paramètres u et a du modèle.

On calcule tout d'abord $F_T = 1 - 1/T$ puis y_T pour les périodes de retour connues :

$$y_{100} = -\ln[-\ln(0.99)] = 4.6, \quad (9.3)$$

$$y_{300} = -\ln[-\ln(0.996\dots)] = 5.7. \quad (9.4)$$

En injectant les deux points (y_{100}, Q_{100}) et (y_{300}, Q_{300}) dans l'équation $Q_T = u + a y_T$, on obtient un système de deux équations à deux inconnues. Le paramètre d'échelle a s'en déduit par :

$$a = \frac{Q_{300} - Q_{100}}{y_{300} - y_{100}} = \frac{23.6 - 20.2}{5.7 - 4.6} = 3.08, \quad (9.5)$$

puis le paramètre de position u par :

$$u = Q_{100} - a y_{100} = 20.2 - 3.08 \times 4.6 = 6. \quad (9.6)$$

On calcule ensuite les variées réduites associées à $T = 2$ et $T = 30$ ans :

$$y_2 = -\ln[-\ln(0.5)] = 0.37, \quad (9.7)$$

$$y_{30} = -\ln[-\ln(0.96\dots)] = 3.38. \quad (9.8)$$

Les quantiles de débit correspondants sont alors :

$$Q_2 = u + a y_2 = 7.14 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}, \quad (9.9)$$

$$Q_{30} = u + a y_{30} = 16.45 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}. \quad (9.10)$$

Bibliographie

- Bundesamt für Umwelt (BAFU). Schwemmholz in fliessgewässern : Ein praxisorientiertes forschungsprojekt. Umwelt-Wissen 1910, Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern, 2019. URL <https://www.bafu.admin.ch/dam/de/sd-web/uIdHRvsSJmL8/schwemmholz-fliessgewaessern.pdf>.
- Paloma Furlan, Michael Pfister, Jorge Matos, Conceição Amado, and Anton J Schleiss. Blockage probability modeling of large wood at reservoir spillways with piers. *Water Resources Research*, 57(8) :e2021WR029722, 2021.
- Guillaume Piton and Alain Recking. Design of sediment traps with open check dams. ii : woody debris. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(2) :04015046, 2016.