

Projet de Fin d'Études (PFE) 2023-2024

Les amas de bois fluviaux



**Les amas de bois fluviaux :
Dynamiques, fonctions et porosité**

Catherine Boisneau

Pierre Trillaud

5^{ème} année IMA

AVERTISSEMENT

Cette recherche a fait appel à des lectures, enquêtes et interviews. Tout emprunt à des contenus d'interviews, des écrits autres que strictement personnel, toute reproduction et citation, font systématiquement l'objet d'un référencement.

L'auteur (les auteurs) de cette recherche a (ont) signé une attestation sur l'honneur de non plagiat.

Formation par la recherche, Projet de Fin d'Etudes en génie de l'Aménagement et de l'Environnement

La formation au génie de l'aménagement et de l'environnement, assurée par le département aménagement et environnement de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Tours, associe dans le champ de l'urbanisme, de l'aménagement des espaces fortement à faiblement anthropisés, l'acquisition de connaissances fondamentales, l'acquisition de techniques et de savoir-faire, la formation à la pratique professionnelle et la formation par la recherche. Cette dernière ne vise pas à former les seuls futurs élèves désireux de prolonger leur formation par les études doctorales, mais tout en ouvrant à cette voie, elle vise tout d'abord à favoriser la capacité des futurs ingénieurs à :

- Accroître leurs compétences en matière de pratique professionnelle par la mobilisation de connaissances et de techniques, dont les fondements et contenus ont été explorés le plus finement possible afin d'en assurer une bonne maîtrise intellectuelle et pratique,
- Accroître la capacité des ingénieurs en génie de l'aménagement et de l'environnement à innover tant en matière de méthodes que d'outils, mobilisables pour affronter et résoudre les problèmes complexes posés par l'organisation et la gestion des espaces.

La formation par la recherche inclut un exercice individuel de recherche, le projet de fin d'études (P.F.E.), situé en dernière année de formation des élèves ingénieurs. Cet exercice correspond à un stage d'une durée minimum de trois mois, en laboratoire de recherche, principalement au sein de l'équipe Dynamiques et Actions Territoriales et Environnementales de l'UMR 7324 CITERES à laquelle appartiennent les enseignants-chercheurs du département aménagement.

Le travail de recherche, dont l'objectif de base est d'acquérir une compétence méthodologique en matière de recherche, doit répondre à l'un des deux grands objectifs :

- Développer toute ou partie d'une méthode ou d'un outil nouveau permettant le traitement innovant d'un problème d'aménagement
- Approfondir les connaissances de base pour mieux affronter une question complexe en matière d'aménagement.

Afin de valoriser ce travail de recherche nous avons décidé de mettre en ligne sur la base du Système Universitaire de Documentation (SUDOC), les mémoires à partir de la mention bien.

REMERCIEMENTS

Je souhaite avant tout remercier la Directrice de ce projet de fin d'études, Mme Catherine Boisneau, pour avoir proposé un tel sujet, qui m'a fasciné et me fascine toujours. Votre suivi régulier des avancements a permis à plusieurs reprises de me remotiver dans la bonne direction, de trouver des solutions ensemble et de répondre aux objectifs de l'étude. Vous avez su lire en moi et m'imposer une méthode de travail qui a permis d'aboutir aujourd'hui à ce dossier, et je vous en remercie infiniment.

Il me tient également à cœur de remercier mes collègues et amis, eux aussi sous la direction de Mme Boisneau, pour les réunions où nous avons pu échanger sur nos travaux respectifs et traiter des problèmes ou des solutions envisageables pour chacun de nous. Les séances de travail intenses paraissaient plus agréables avec la bonne humeur que vous apportiez et l'environnement de confiance qui s'était installé entre nous. Jusqu'au bout vous avez été une source de motivation pour moi, une des raisons de ne pas baisser les bras.

Je n'oublie évidemment pas de remercier la classe des 5A IMA de 2023/2024 pour la bonne ambiance et la bienveillance dont tout le monde a fait preuve, l'entraide et le soutien.

Je remercie du fond du cœur ma famille, dont le soutien ne faiblissait pas malgré l'éloignement. Leur aide et leurs conseils m'ont aussi guidé dans certains choix ainsi plus avisés.

Enfin, je porte une attention toute particulière à ces derniers remerciements, et non pas des moindres, à la personne qui est restée à mes côtés tout au long de ce Projet de fin d'études. Celle-ci même qui m'a apporté un soutien moral très important, m'exhortant à ne pas baisser les bras et à rester motivé, et ce, aussi ardue que fut la tâche. Je me devais d'avoir confiance en mon travail. Elle a également représenté une aide très précieuse pour la correction de certaines de mes erreurs, me conseiller lors de la mise en page ou encore le développement de certaines informations par des savoirs complémentaires. Merci Roxane.

TABLE DES MATIERES

1.	Une histoire de bois et de rivières.	1
2.	Un sujet présent dans la littérature.	4
2.1.	Logiciels et sites employés.	4
2.2.	Méthode de recherche.	4
3.	La création des tas de bois en rivière.	7
3.1.	Les éléments et conditions de formation.	7
3.2.	Processus de création et typologie.	10
4.	Évolution des tas.	12
4.1.	Démantèlement.	12
4.2.	Atterrissement.	13
4.3.	Pérennisation.	14
5.	Fonctions écologiques des tas.	14
5.1.	Pour le milieu abiotique.	14
5.1.1.	Influenceurs de la structure physique du milieu : facteur de sédimentation.	15
5.1.2.	Influenceurs de la structure physique du milieu : facteur d'érosion.	17
5.1.3.	Pourvoyeur de substrat nutritif.	20
5.2.	Un hotspot de biodiversité.	20
5.2.1.	Un phénomène entre diversification et stabilisation des habitats.	20
5.2.2.	La mise en place de chaînes trophiques complexes.	22
5.2.3.	Une réponse biologique des communautés.	23
6.	Évaluer le volume des tas de bois.	25
6.1.	Ressources bibliographiques.	25
6.2.	Éléments bibliographiques d'intérêt	26
6.3.	Les méthodes de la littérature.	33
6.4.	Proposition de méthode d'évaluation.	39
7.	Discussions	45
8.	Conclusion.	45
9.	Bibliographie.	49

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Résultats des recherches bibliographiques.	5
Tableau 2: Résultats des recherches bibliographiques par auteur.	6
Tableau 3: Synthèse des résultats de recherche bibliographique spécifique.	26
Tableau 4 : Volumes types et paramètres à relever sur le terrain.	40
Tableau 5 : Taille d'échantillon en fonction de la taille de la population, de la précision et de la marge d'erreur souhaitées.	42
Tableau 6 : Espèces cibles et gabarit de taille.	43

TABLE DES FIGURES

Figure 1: Délimitation d'une rivière dans le paysage par sa ripisylve.	1
Figure 2: Silure camouflé dans un tas de bois.	3
Figure 3 : Vue inférieure d'un tas de bois comportant des accumulations macrophytiques.	7
Figure 4: Processus dominants et caractéristiques de la dynamique du bois en rivière selon le style fluvial.	8
Figure 5: Exemple d'embâcles majeurs sur la rivière Saint-Jean, Gaspé en 2010.	9
Figure 6 : Exemple d'embâcles en rivière à lit étroit à sec (affluent de L'Escotais).	9
Figure 7: Les cinq types de tas de bois identifiés en fonction de leur cœur ; (a) Rocheux, (b) Arbre debout, (c) Arbre couché, (d) Élément grossier et (e) Anarchique.	11
Figure 8: Longueur et taille (diamètre) du bois stable dans les canaux des cours d'eau.	12
Figure 9: Exemple d'atterrissement de bois en rivière.	13
Figure 10: A) Rehaussement du niveau d'eau et accumulation de sédiments ; B) Exemple sur la rivière À Pierre, Mont-Saint-Pierre, Gaspésie.	15
Figure 11: Cartographie des amas de bois, du relief et de l'hétérométrie du substrat dans la rivière Mill Creek.	16
Figure 12: a) Vue en plan d'un embâcle redirigeant l'écoulement ; b) Sédiments à l'aval de l'embâcle.	17
Figure 13: Champs de vitesse et zones d'érosion/sédimentation à proximité d'un embâcle.	18
Figure 15: Type de fosse selon la nature de l'embâcle ayant causé sa formation.	19
Figure 14: Les 4 types d'embâcles (et l'érosion engendrée) selon leur position dans le chenal.	19

Figure 16: Processus et communautés dégradant la matière organique morte en milieu aquatique.	20
Figure 17 : Hypothèse de perturbation intermédiaire.	21
Figure 18 : Part d'ouvrages relatant des intensités de réponse du biotique à la présence de bois en rivière.	24
Figure 19: Réponse biologique de salmonidés à la présence de bois en rivière.	24
Figure 20: Impact du retrait des DLF puis des DLM sur les vitesses d'écoulement à proximité du tas de bois. Wrapped : tas imperméabilisé, Natural : sans traitement, Partial : sans DLF, Key member : sans DLF ni DLM (très poreux).	29
Figure 21:Exemple de classification des tas de bois selon leur porosité, la structure et la diversité de tailles des composants.....	30
Figure 22:Porosité des tas de bois en fonction de l'agencement et des diversités de tailles des composants.	31
Figure 23 : Evolution structurelle d'un tas de bois face à différents débits.	33
Figure 24:Comparaison de deux méthodes d'évaluation de porosité.	34
Figure 25: Illustration de l'échelle de porosité telle que proposée par Scott et al (2019).	37
Figure 26: Illustration des modèles 2.5D et 3D utilisés pour l'approche volumétrique de quantification de la porosité ainsi que de volume de référence en broyat.	38
Figure 27 : Triptyque vers un compromis pour l'efficacité d'une méthode.....	47

1. Une histoire de bois et de rivières.

Les territoires sont façonnés par de nombreux éléments, dont les rivières. Celles-ci sont notamment remarquables via leur parcours bordé d'arbres qui se distingue dans le paysage. Il en va de soi que cette configuration n'est pas une simple coïncidence. De nombreux chercheurs, au fil du temps, ont mis en évidence les interactions et phénomènes se produisant entre cette ripisylve et le cours d'eau qui la borde (Figure 1). La production de biomasse qui résulte de l'activité de croissance de cette flore donne lieu à des débris, qui, bien que passant inaperçus pendant longtemps, se révèlent être des composants dont l'influence sur leur environnement, et notamment les hydrosystèmes, est non négligeable.

En effet, il s'avère que ces débris, en s'accumulant sous forme de tas de bois dans les cours d'eau, génèrent de nombreux enjeux, qu'ils concernent les usages anthropiques ou bien des questions de gestion de la biodiversité. En effet, un des risques majeurs pour la société



Figure 1: Délimitation d'une rivière dans le paysage par sa ripisylve.
(Source: Wallhere : <https://wallhere.com/fr/wallpaper/848>)

est l'obstruction d'ouvrages tels que des ponts, pouvant mener soit à la destruction de l'ouvrage, causée par la pression hydraulique supérieure à la résistance de la construction, soit à une augmentation significative des risques d'inondation et de la violence de celle-ci. Ce phénomène est décuplé pour des événements dont la période de retour est de 20 à 50 ans, obstruant partiellement voire totalement certains ouvrages (Wang et al., 2017). À ce titre, des termes peu élogieux y font encore référence, tels que « embâcle » (Loi n° 95-101 du 2 février 1995 relative au renforcement de la protection de l'environnement, 1995) ou encore « épave » introduit en 1669 (Louis XIV, 1669 in Le Lay, 2007).

Pourtant, les tas de bois représentent des atouts écologiques pour les hydrosystèmes. Ils pourraient être de possibles habitats d'espèces, pour certaines potentiellement protégées. Ce pourrait également être un facteur déclencheur de processus liés au domaine abiotique des hydrosystèmes. L'étude des tas de bois en rivière est donc un sujet aux multiples enjeux dont il est important de comprendre les mécanismes pour prendre les meilleures décisions à l'avenir, vis-à-vis des enjeux de prévention des crues et de protection de la biodiversité.

S'intéresser aux tas de bois dans les cours d'eau mène ainsi à se questionner sur leur genèse, leurs trajectoires ainsi que les fonctions qu'ils occupent. En considérant les tas de bois

comme un habitat, il conviendra également d'évaluer l'espace habitable qu'ont à offrir ces amas de bois en proposant un protocole. Ces termes se doivent d'être définis.

La genèse fait référence à la manière dont les tas de bois se forment. Ceux-ci étant des agglomérats de matière organique d'origine végétale, les « tas de bois » peuvent donc étymologiquement désigner des assemblages de deux éléments ou plus. La genèse de ceux-ci fait donc référence aux conditions dans lesquels ces assemblages se produisent et la nature des éléments initiant ce phénomène. Ainsi, il est possible de poser l'hypothèse que ce qui est désigné par « tas de bois » est en réalité un ensemble d'entités de nature, de structure et d'origine variées.

Ces paramètres sont indissociables des termes « cours d'eau » puisque ceux-ci imposent de fait des conditions découlant de leur fonctionnement. Des facteurs à considérer sont notamment la ripisylve ainsi que les paramètres morphologiques caractérisant les rivières, telles que la largeur, la pente, le débit ou l'hydrologie.

Peu d'éléments de l'environnement sont figés dans un état à un « instant t ». Il en va de même pour les tas de bois, qui présentent des trajectoires évolutives. Similairement à une trajectoire en physique qui est l'ensemble des positions d'un objet, la trajectoire des tas de bois peut se définir sur le plan spatial, avec les différentes positions qu'ils occupent au cours du temps. L'influence du cours d'eau n'est donc pas négligeable dans le déplacement de ces amas. La trajectoire peut également être considérée sur le plan temporel, au regard des différentes formes qu'ils adoptent dans le temps. Il est donc intéressant de se questionner sur les échelles auxquelles doivent être étudiés les tas de bois fluviaux, et si les dimensions spatiale et temporelle peuvent se dissocier l'une de l'autre. Il semblerait alors plus cohérent de parler « des trajectoires » plutôt que d'une unique. Dans un sens, la genèse et la ou les trajectoires prises traduisent une période d'existence propre à un tas.

De ces différents états peuvent découler des fonctions, surtout au sens écologique. Ces fonctions sont des interactions entre les éléments et les processus biologiques et physiques, nécessaires au maintien de l'état écologique, physique et chimique d'un écosystème et à son bon fonctionnement. Dans le cas d'un hydrosystème, ces fonctions peuvent par exemple comprendre la régulation de la physico-chimie de l'eau, l'influence sur des processus externes ou les services rendus à la faune et la flore (*Fonctions écologiques*, s. d.). Il convient cependant de se demander si les tas de bois fluviaux peuvent réaliser ces processus tout au long de l'année, de manière continue. Parmi ces fonctions peuvent être cités le ralentissement des écoulements ou l'habitat fourni à la faune. Cependant, toute la faune n'exploite pas les tas de bois comme habitats, cela dépend de l'habitabilité que ceux-ci leur offrent. Le terme « habitat » implique de plus un critère de taille et de caractéristiques écologiques des amas fluviaux. Ces dernières étant variables entre les tas de bois, ces tas peuvent ainsi se définir soit comme « habitat » soit comme « microhabitat ».

L'habitabilité se définit comme la qualité de ce qui est habitable, ce qui offre plus ou moins de place pour des individus (*habitabilité - Dico en ligne Le Robert*, s. d.). Ainsi, la définition montre que l'habitabilité varie d'un individu à l'autre, ou, en écologie, d'une espèce à l'autre. Celles-ci ayant des besoins différents, elles ne les satisferont pas tous ni au même degré, ce qui entraîne une variabilité dans l'habitabilité. Dans le cas d'une étude sur les tas de bois en rivière se voulant plus spécifique et plus centrée sur un nombre restreint d'éléments, il est intéressant de commencer par définir l'espèce piscicole cible. Une étude préalable permet tout d'abord de confirmer que l'espèce cible présente au moins une phase de son

cycle pouvant être en lien avec les tas de bois. Ensuite, cela permet, entre autres, de limiter les recherches aux zones de répartition de ladite espèce, ce qui induit des conditions abiotiques spécifiques (en fonction de l'ordre de Strahler notamment) ainsi que des pools d'espèces végétales relativement bien définis. Une espèce piscicole qui pourrait particulièrement bien se prêter à l'étude serait le Silure glane (*Silurus glanis*), pour qui les tas de bois en rivière peuvent fournir de bonnes caches où ils peuvent chasser, se nourrir et se reproduire, d'autant qu'il est lucifuge, ce qui forme pour lui un bon abri (Copp et al., 2009; *Fiches espèces Shna-Ofab*, s. d.; Spange, 2018)(Figure 2).



Figure 2: Silure camouflé dans un tas de bois.

(Source : "Le silure, les dents de la rivière", Stéphane Granzotto)

L'habitabilité dépend donc fortement de l'espèce considérée. Cette affirmation se justifie également en abordant la notion d'espace habitable. Les tas de bois, bien que de natures très variées, sont un assemblage de morceaux d'arbres, soit des composants ayant une structure rigide en trois dimensions. La croissance des arbres s'effectue de sorte à optimiser l'exposition des feuilles à la lumière pour la réalisation de la photosynthèse. Il en résulte un volume occupé important à l'intérieur duquel la structure de l'arbre n'occupe qu'une petite partie, le reste étant du « vide ». Cette structure se conserve pendant la formation des tas de bois, et, malgré l'imbrication des composants, il résulte que les tas de bois possèdent une structure poreuse. Cette porosité même représente l'espace pouvant être valorisable en tant qu'habitat pour les êtres vivants, soit « l'espace utile ». La quantification de l'espace utile des tas de bois nécessitera à la fois de quantifier le volume total utile, ainsi que la taille des espaces poreux, celle-ci conditionnant les espèces pouvant s'y réfugier et ainsi l'habitabilité du tas de bois.

Le sujet de ce rapport concerne donc plusieurs aspects. Il soulève trois questionnements principaux. Comment approcher le cycle de vie des tas de bois fluviaux ? Quels usages écologiques induisent ces habitats ? Comment évaluer le volume offert par les tas de bois ?

Après avoir présenté la méthode employée pour la réalisation de l'état de l'art, il est nécessaire de comprendre ce qui régit l'existence de ces tas de bois en rivière, d'abord au travers de leur création puis de leurs trajectoires. Puis, cet amoncellement de débris organiques sera cerné par la suite afin de comprendre ce qu'il représente en écologie ainsi que les fonctions qu'il assure. Enfin, un protocole sera proposé pour quantifier le « volume utile » aux êtres vivants à l'intérieur des tas de bois.

Ce raisonnement pose hypothétiquement que la formation et l'évolution des tas de bois en rivières sont contrôlées par les dynamiques fluviales, et qu'au cours de son existence, un tas de bois a des effets sur le domaine biotique et abiotique.

2. Un sujet présent dans la littérature.

2.1. Logiciels et sites employés.

La constitution d'un état de l'art traitant des tas de bois en rivière s'est faite au moyen de l'outil informatique. La première source de données littéraires a été la bibliothèque en ligne de l'Université de Tours, Colibri, qui regroupe nombre d'articles en ligne à disposition des élèves, et de manière relativement pratique grâce aux filtres pouvant être appliqués aux termes de la recherche. L'accès à certains sites complémentaires s'est effectuée grâce à l'abonnement de cette même université, qui permet aux élèves de consulter les articles scientifiques qui y sont. C'est le cas notamment pour les sites Elsevier, JSTOR, ISTEEX, ResearchGate (via l'adresse électronique étudiante). Enfin, des sites libres d'accès ont également été une source précieuse d'information, en particulier google scholar, thèses.fr, HAL.fr et pour finir doi.org. L'outil émergent qu'est l'intelligence artificielle a également été utilisé, via le site d'open.ai, connu sous le nom de ChatGPT pour la recherche d'articles scientifiques. L'ensemble des références est compilé dans le gestionnaire Zotero.

2.2. Méthode de recherche.

La phase de recherche bibliographique s'est donc articulée autour des sites présentés précédemment. Dans un document servant de cahier de notes, chaque moteur de recherche est inscrit. À chaque recherche sur l'un des moteurs cités, les mots clés employés sont indiqués, à côté desquels figurent le nombre de résultats obtenus directement. Les résultats correspondant à cette étude sont présentés dans le Tableau 1. Si le nombre de résultats est inférieur ou égal à 100, alors une lecture des titres est réalisée sur l'ensemble des résultats (appelé « Appréciation basée sur le titre » dans le tableau) pour sélectionner les plus pertinents. En cas d'ambiguïté dans le titre, le résumé du ou des articles concernés est lu afin de statuer sur la pertinence ou non de le ou les garder dans la bibliographie. Si le site de recherche ne propose pas l'option permettant d'appliquer des filtres, et c'est notamment le cas pour ResearchGate et Google Scholar, alors un tri par pertinence est appliqué aux résultats. Le titre de chaque résultat est alors lu, et la sélection effectuée pour chaque ouvrage pertinent, jusqu'à ce que les résultats proposés ne soient plus assez pertinents ou en trop faible nombre, ou que le corpus ainsi formé comporte assez de références. Cette méthode est aussi appelée « Appréciation basée sur le titre » dans le tableau-ci dessous. Pour compléter des données scientifiques ou des notions mineures permettant une meilleure compréhension des œuvres, l'intelligence artificielle a été sollicitée avec des requêtes plus poussées apparaissant plutôt sous forme de phrase ou de groupes nominaux, dont les termes principaux sont précisés. Chaque œuvre sélectionnée est ensuite enregistrée dans le gestionnaire de bibliographie Zotero, dans lequel les références sont aussi classées par moteur de recherche employé.

Tableau 1 : Résultats des recherches bibliographiques.

MOTEURS DE RECHERCHE	COLIBRI	PUBMED	RESEARCH GATE	CHATGPT
MOTS-CLÉS	River wood pile	River wood pile	River wood pile	-Article, accumulation, débris, ponts, crues -Silurus glanis, tas de bois
NOMBRE DE RESULTATS	163	4	1000	9
MODALITÉS D'EXCLUSION	Filtres : ingénierie, sciences de l'environnement, écologie, biologie, gestion forestière, sciences appliquées, botanique, appréciation basée sur le titre	Appréciation basée sur le titre	Tri par pertinence puis appréciation basée sur le titre	Appréciation basée sur le titre
NOMBRE D'OUVRAGES RETENUS	9	1	21	1

Suite à ces recherches et à des discussions avec la personne encadrant le travail, deux noms sont ressortis : Neil Pettit (ou Neil E. Pettit) ainsi que Jean Paul Bravard. Ce premier s'est en effet révélé être un nom relativement récurrent dans la bibliographie issue de Colibri (4 résultats sur les 9 sélectionnés sont de Mr Pettit), ainsi que présentant des articles dans d'autres moteurs, mais en moins grande proportion. Associé de recherche doctorant à l'Université d'Australie-Occidentale, dans le domaine de la botanique, l'écologie et la limnologie, il est donc intéressant de porter une attention particulière aux documents qu'il a rédigé. Mr Bravard quant à lui est un membre honoraire de l'Université de Lyon, Professeur en Géomorphologie, environnement, et géoarchéologie qui aurait déjà travaillé sur le sujet des tas de bois en rivière, mais dont la documentation est peu répandue. Pour ces deux personnes, des recherches nominatives ont été menées sur les moteurs de recherches présentés dans le *Tableau 2*, en appliquant la méthode de traitement des résultats présentée plus tôt. La recherche à partir des noms uniquement se veut volontairement vaste pour observer le plus de thèmes abordés par l'auteur et ainsi ouvrir les possibilités de considération pour le présent travail, peut-être évoquant des pistes non considérées.

Tableau 2: Résultats des recherches bibliographiques par auteur.

MOTEURS DE RECHERCHE	GOOGLE SCHOLAR	THESES.FR	HAL.FR	ISTEX	COLIBRI
MOTS-CLÉS	J.P.Bravard	J.P.Bravard	J.P.Bravard	J.P.Bravard	Neil Pettit
NOMBRE DE RESULTATS	100	38	45	122	50
MODALITÉS D'EXCLUSION	Appréciation basée sur le titre	Appréciation basée sur le titre	Appréciation basée sur le titre	Filtres : écologie animale, végétale et microbienne, invertébrés, sylviculture, sciences exactes et technologies, microbiologie, appréciation basée sur le titre	Appréciation basée sur le titre
NOMBRE D'OUVRAGES RETENUS	2	0	5	4	4

Certaines références ont été citées plusieurs fois, que ce soit entre plusieurs sites ou bien au sein de la même recherche sur le même site. Cette redondance vise à être limitée par l'utilisation d'un seul logiciel centralisant toutes les références.

Au final, presque 50 références pertinentes ont pu être trouvées, ce qui témoigne d'un sujet dont l'existence n'est pas négligée dans la littérature.

À l'issue de ces recherches, le corpus bibliographique formé permet un départ avec de solides bases, qui seront complétées par l'ajout de références. La lecture de chaque article s'est effectuée en complétant simultanément une synthèse dans un fichier propre à chaque ouvrage. Cela permet notamment d'isoler les arguments pertinents, les figures d'intérêt ainsi que les références complémentaires faites par l'auteur, indiquant des ouvrages qu'il est pertinent de lire. Ces « matériaux » serviront de support à l'étude des tas de bois en rivière.

3. La création des tas de bois en rivière.

La création des tas de bois en rivière dépend de plusieurs conditions préalables. En décrivant celles-ci, il est donc possible de mieux comprendre les processus menant à la création des tas de bois.

3.1. Les éléments et conditions de formation.

La formation de tas de bois en rivières résulte de la présence de bois, mort principalement, dans des zones accessibles pour la rivière.

Les tas de bois en rivières sont souvent décrits comme des amas de bois morts, mais cette notion est très réductrice par rapport à la réalité. Il serait plus juste de parler de « bois charriable » pour étudier les conditions de formation. Les tas de bois ne se composent en effet pas uniquement de bois mort, qui plus est sous une seule forme. Ceux-ci peuvent se composer de quatre types différents d'éléments (Pettit et al., 2006) :

- De branchages, éclats, et autres parties d'arbres de petites tailles
- De troncs morts
- De troncs encore vivants avant d'être déracinés
- De troncs cassés mais encore vivants et enracinés

Cette définition de « tas de bois » exclu cependant les autres types de composants pouvant se retrouver dans ces amas. En effet, il est courant que d'autres types de matière s'accumulent dans ces tas, comme de la matière végétale issue de macrophytes ou d'algues (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Sans que les piles de bois soient composées exclusivement d'un type d'élément, les différences dans la composition majoritaire témoignent de fonctionnements hydrologiques, de temporalités, de physico-chimie des eaux ainsi que d'origines différentes. Il est donc possible de les interpréter en liant d'abord cette diversité à l'hydrologie du cours d'eau considéré. La formation de tas de bois se produit par l'accumulation de morceaux pour former un ensemble. Ainsi, la taille des composants des piles dépend de la « capacité de transport » du cours d'eau pour rassembler ces unités.



Figure 3 : Vue inférieure d'un tas de bois comportant des accumulations macrophytiques.

(Source : "Le silure, les dents de la rivière", Stéphane Granzotto)

Trois paramètres caractérisant une rivière sont donc à prendre en compte pour définir « la capacité de transport » de celle-ci ; le gabarit de son chenal en eau, son débit et sa puissance (Jacobson et al., 1999). Comme cela a pu être démontré pour les sédiments (Miller et al., 1977), la puissance du cours d'eau définit la capacité de transport des sédiments. Ce peut donc également être appliqué, de manière qualitative certes, aux débris végétaux. De plus, un cours d'eau à forte puissance sur un substrat mobilisable est de fait plus enclin à être latéralement mobile, et donc pouvoir éroder les berges, causant la chute d'arbres dans le cours d'eau (Boivin et al., 2019).

Ce dernier point génère également un autre lien du transport de bois avec le gabarit du cours d'eau, et concerne plus principalement le style fluvial (Figure 4). En effet, ces deux éléments sont fortement liés, car la puissance du cours d'eau détermine son gabarit et son style, comme cela est notamment mis en avant dans la classification de Rosgen ou encore celle de Church. Le gabarit influence le style fluvial (et réciproquement), qui lui-même influence la nature des composants retrouvés dans les tas de bois.

<i>Linéaire Seuil-mouille</i>	<i>Méandres stables</i>	<i>Méandres dynamiques</i>
<p><i>Succession de seuil et de mouille</i> <i>Érosion dans les mouilles et accumulation dans les seuils</i></p>  <p><i>Recrutement par mortalité naturelle</i> <i>Zone de transport de bois</i> <i>Accumulation de bois possible sur les seuils</i></p>	<p><i>Débordements sur plaine inondable (limons)</i></p>  <p><i>Recrutement par mortalité naturelle</i> <i>Accumulation dans les apex de méandres</i> <i>Débordement si obstruction importante</i> <i>Bois mort a peu d'influence sur la mobilité du chenal</i> <i>Accumulation de bois possible dans les méandres</i></p>	<p><i>Migration latérale avec banc de convexité</i> <i>Recoupement de méandres</i> <i>Débordement sur plaine inondable</i> <i>Forte connectivité avec relief négatif</i></p>  <p><i>Recrutement par migration latérale</i> <i>Zone de production de bois</i> <i>Accumulation de bois possible sur les apex méandre et bancs convexité</i> <i>Le bois mort peut avoir une forte influence sur la mobilité du cours d'eau</i></p>
<i>Divagant</i>	<i>En tresses</i>	<i>Anastomosé</i>
<p><i>Migration latérale avec bancs centraux et de convexité</i> <i>Chenaux secondaires et possibilité de changement brusque de chenal principal lors des inondations</i></p>  <p><i>Zone de production et d'accumulation</i> <i>Recrutement par migration latérale et avulsion</i> <i>Accumulation à l'apex des méandres, sur les bancs de convexité et les bancs centraux</i> <i>Le bois mort peut avoir une grande influence sur la mobilité du cours d'eau (migration et avulsion)</i> <i>Il peut initier la formation d'îlots végétalisés et de lambeau de plaine protégés de l'écoulement</i> <i>Il peut aussi engendrer des avulsions et le développement de chenaux secondaires</i></p>	<p><i>Migration latérale avec bancs centraux</i> <i>Chenaux multiples</i> <i>Changements périodiques du chenal le plus actif</i></p>  <p><i>Zone accumulation</i> <i>Accumulation sur les bancs ou dans les chenaux peu profonds</i> <i>Le bois mort peut avoir une grande influence sur la mobilité du cours d'eau (migration et avulsion)</i> <i>Peut initier la formation d'îlots végétalisés dans un environnement autrement trop dynamique pour permettre le développement de végétation</i></p>	<p><i>Débordements sur plaine alluviale (limons)</i> <i>Avulsion</i></p>  <p><i>Zone d'accumulation</i> <i>Faible capacité de transport</i> <i>Accumulation principalement dans les chenaux étroits</i> <i>Recrutement possible par avulsion</i> <i>Le bois peut avoir un grand effet sur la mobilité du chenal en initiant des avulsions</i></p>

Figure 4: Processus dominants et caractéristiques de la dynamique du bois en rivière selon le style fluvial.

(Source : Boivin et al., 2019)

Les cours d'eau ayant des profils en plan plutôt linéaires comportent généralement des tas de bois caractérisés par des composants morts naturellement et ayant chuté.

La dessiccation peut également mener à la présence plus importante de composants de petite taille. Au contraire, les arbres qui vont être identifiés dans un style fluvial méandriforme et dynamique seront majoritairement des arbres déracinés, encore vivants. La production en bois est donc directement influencée par le taux d'érosion des berges. Ainsi, il existe une corrélation entre le recrutement du bois en rivière et le style fluvial. (Boivin et al., 2019)

Cependant, à l'échelle des arbres, le gabarit du cours d'eau conditionne également la taille des éléments transportables. S'il n'est pas assez large ou trop peu profond, les gros éléments sont moins transportés (Jacobson et al., 1999)(Figure 6).

Il est donc possible d'associer des gabarits de tas de bois aux caractéristiques d'un cours d'eau, via notamment le β -ratio, pour des événements hydrologiques caractéristiques puisque la puissance et la hauteur en eau varient selon le débit. Ces événements hydrologiques caractéristiques sont à savoir le module, l'étiage et la crue. Ces variables permettent de définir plusieurs principes ; dépendamment des scénarios, certains cours d'eau ou tronçons auront la capacité d'évacuer le bois, alors que d'autres les accumuleront (Boivin et al., 2019). De plus, pour de faibles débits, la capacité de transport est faible, résultant en une taille moyenne des composants plus faible. Pour des débits plus importants, tels que ceux d'une crue, la hauteur et la puissance augmentent permettant de transporter des éléments plus importants tels que des troncs, voire arracher ceux-ci (Figure 5). Enfin, certains bois présentent une densité supérieure à celle de l'eau ce qui ne permet pas, en condition de débits non suffisantes de les déplacer, bien que ces bois soient morts. Le terme de « bois charriable » permet donc de caractériser pour chaque cours d'eau l'ensemble des éléments pouvant créer des tas de bois en rivière.

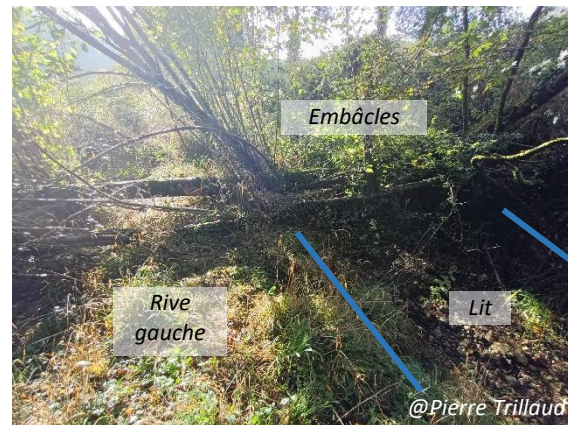


Figure 6 : Exemple d'embâcles en rivière à lit étroit à sec (affluent de L'Escotois).



Figure 5: Exemple d'embâcles majeurs sur la rivière Saint-Jean, Gaspé en 2010. (Source : Boivin et al., 2019)

L'analyse des tas de bois se concentre donc majoritairement dans la littérature sur des phénomènes postérieurs à des crues, dans le but d'observer la plus grande diversité de tas de bois fluviaux, d'autant plus si l'évènement présente une période de retour très grande (environ 100 ans pour l'étude de Pettit et al., 2006).

Pour pouvoir charrier ce bois, il doit être disponible et accessible. La capacité de formation dépend de la quantité de bois disponible (Bilby & Likens, 1980; Jones, & Smock, 1991 and Webster et al., 1994 in Jacobson et al., 1999). La densité de la forêt alluviale et de la ripisylve conditionne donc la charge potentielle en bois de la rivière. Par exemple, les forêts alluviales des régions tempérées sont souvent plus grandes et plus denses que celles des régions semi-arides. Cela démontre également un lien entre la quantité de bois pouvant être fournie, résultant en une charge potentielle en bois plus ou moins forte, et le climat (Bull, 1979). Toutefois, la densité a également un effet limitant. Si elle est source de bois charriable, une forte densité d'arbre peut aussi avoir un effet de « peigne » sur les éléments emportés par le courant. Une forte densité laissera moins facilement « s'échapper » les gros éléments charriés. Cela favorise également un nombre plus important d'amas ayant peu d'éléments, la quantité disponible étant divisée en plusieurs points au lieu que le bois ne s'accumule au sein du lit mineur du cours d'eau.

Une influence de la fréquence et l'intensité des crues a également pu être relevée sur la quantité de bois disponible, tout en présentant une dichotomie. Jacobson et al. (1999) ont montré que des périodes importantes entre deux crues permettent un développement important d'arbustes dans le lit mineur et le lit majeur, sans qu'ils soient cassés. Ceux-ci immobilisent une partie du bois au sol. Toutefois, la multiplication des arbustes offre une source accrue de débris végétaux. De même, la quantité disponible peut varier selon les conditions abiotiques (tempêtes, sol instable) ou bien des caractéristiques des espèces (système racinaire superficiel), résultant en un plus grand nombre de déracinements, chutes de bois et donc une augmentation de la quantité disponible.

3.2. Processus de création et typologie.

Remobilisé par le cours d'eau, le bois s'accumule autour d'obstacles pour former des motifs récurrents ayant pu être mis en avant dans la littérature (Abbe & Montgomery, 2003; Pettit et al., 2006). Quatre niveaux de différenciation ordonnée des tas de bois ont pu être observés, traduisant leurs processus de formation sur une étude de 421 tas de bois sur la rivière Sabie (Pettit et al., 2006):

- La **position dans le lit majeur** : un tas de bois traduira les conditions hydrologiques dans lesquelles il s'est formé selon s'il se situe dans le lit mineur, la ripisylve ou à fortiori la plaine alluviale, puisque ces lieux sont respectivement atteints pour des évènements de plus en plus intenses.
- Le **mécanisme de formation** distingue deux grands types de tas de bois ; les tas de bois déplacés (allochtone) ou ceux formés sur place (autochtone). Ces derniers sont caractérisés par un centre immobile (arbre debout, arbre couché mais enraciné, rochers) dont la position et l'état avant et après accumulation des bois sont identiques. Les piles allochtones comportent quant à elles un noyau qui n'est pas fixé au substrat et provenant de l'amont, autour duquel les éléments se sont accumulés, puis s'est posé sur les sédiments ou dans la plaine.

- Les **composants** : dépendant du mécanisme de formation de la pile de bois, ce paramètre vise à caractériser son centre. Pour les tas allochtones, une distinction doit être réalisée entre les tas à cœur composés d'éléments disposés de manière anarchique et de petite taille (4% des cas), et les tas présentant un cœur distinct formé par un élément grossier (bûche, tronc) (environ 24% des cas). Il en va de même pour les amas fixes, selon s'ils sont sur un élément rocheux (environ 2% des cas), un arbre debout (9% des cas) ou un arbre couché (60% des cas) (Figure 7).
- La **disposition dans le lit mineur** : pour les tas de bois disposés dans le lit mineur ou la ripisylve, il convient de différencier la portion du tas de bois incluse dans le lit mineur. Sont différenciables les cas où :
 - Les piles ne sont pas dans le lit mineur du cours d'eau.
 - Les piles sont en partie dans le lit.
 - Les piles sont totalement dans le lit du cours d'eau et en dépassent.

La différenciation des mécanismes de création et d'organisation intrinsèque explique les voies multiples d'évolution des tas de bois.

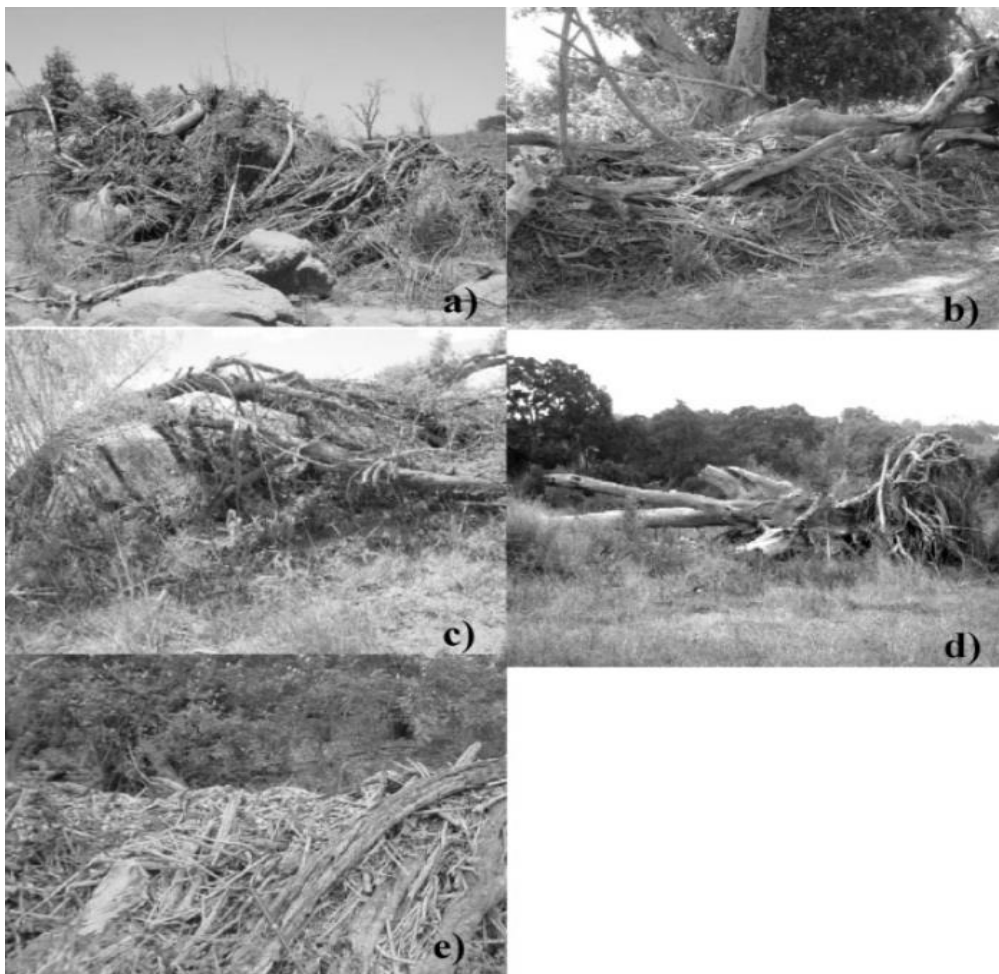


Figure 7: Les cinq types de tas de bois identifiés en fonction de leur cœur ; (a) Rocheux, (b) Arbre debout, (c) Arbre couché, (d) Élément grossier et (e) Anarchique.

(Source : Pettit et al., 2006)

4. Évolution des tas.

Trois principales voies d'évolution ont été mises en avant par Pettit et al. (2006).

4.1. Démantèlement.

L'évolution des tas de bois fluviaux ne se passe pas au même rythme dépendamment de la position où se situe l'amas. En effet, certains tas de bois sont issus de crues relativement peu fréquentes, de l'ordre du siècle. Roni et al. (2015) ont également identifié des tas de bois dont l'âge approche le siècle (entre 70 et 100 ans). Cela signifie soit qu'ils sont très stables et peu fréquemment mobilisés, soit qu'ils ne sont que rarement atteints par les flots en crues. Les tas de bois plus proches du lit mineur sont souvent soumis aux écoulements de crues, ce qui implique une remise en mouvement plus fréquente. Ces tas intègrent, suite à une crue, ce que l'on nomme la « quantité de bois disponible », pouvant être remobilisé lors de la suivante.

Pour revenir sur la notion de stabilité d'un tas de bois, celle-ci, telle que définie par Roni et al. (2015), dépend de deux paramètres. En effet, au sein des cours d'eau, la mobilité du bois varie selon la taille du canal ou sa position dans le réseau fluvial et le diamètre du bois. Ainsi, plusieurs études ont révélé que la mobilité du bois est proportionnelle à l'augmentation de la taille du canal mais inversement proportionnelle au temps de séjour (Roni et al., 2015). La stabilité, ici comprise comme un temps de séjour long, est donc inversement proportionnelle à la taille du chenal. Avec ces principes et en utilisant les données issues de l'étude de la Queets River par Abbe et Montgomery (2003), il est possible de caractériser numériquement un tronç stable. Ce principe peut s'appliquer de même à un tas de bois. Plus ce dernier comporte de troncs considérés comme stables, alors plus l'amas est stable, et inversement. La zone de stabilité des troncs est définie en Figure 8.

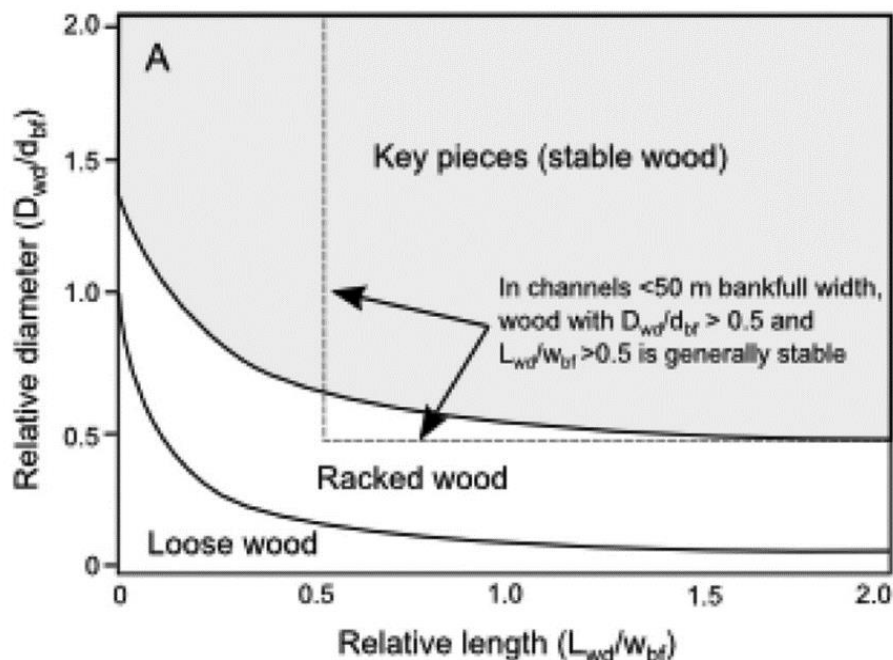


Figure 8: Longueur et taille (diamètre) du bois stable dans les canaux des cours d'eau.

. D_{wd} , diamètre du bois ; d_{bf} , profondeur du canal à plein bord ; L_{wd} , longueur du bois ; w_{bf} , largeur du canal à pleine capacité. (Source : Roni et al., 2015)

Le bois « stocké » (« raked ») est du bois mobile accumulé dans les embâcles, alors que le bois en « libre » (« loose ») est généralement dispersé sur des barres de graviers. Ce graphique montre que le bois de grande taille ne sera pas le composant principal de tas de bois, puisqu'il ne s'y accumule pas, à moins d'avoir un diamètre suffisant (la courbe délimitant les « libres » admet une asymptote horizontale). Par contre, les troncs dont le diamètre est supérieur à la profondeur ne dépendent pas de la longueur et seront soit « stockés » soit stables, donc participants dans tous les cas à la formation d'embâcles, ce qui correspond aux observations de Jacobson et al. (1999).

Ainsi, il est à noter que les piles désignées comme étant des piles autochtones peuvent très bien devenir une pile allochtone si elle n'est pas assez stable, que les bois accumulés sont emportés ou si le noyau est arraché du substrat.

D'autres évolutions, indépendantes des cours d'eau peuvent être envisagées, telles que leur décomposition, leur incinération ou leur dégradation par les termites.

4.2. Atterrissement.

Le deuxième point pouvant être souligné est la possibilité d'atterrissement des tas de bois (Figure 9). En effet, les tas de bois se forment majoritairement lors des crues, période à laquelle le transport sédimentaire est très important, dû à un débit conséquent, soit une force de cisaillement accrue (Miller et al., 1977). Cela sera abordé de manière plus détaillée par la suite, mais les tas de bois sont des catalyseurs qui déclenchent des mécanismes de sédimentation se traduisant par l'ensevelissement de ceux-ci, notamment lorsqu'ils se trouvent dans le lit mineur car en contact plus longtemps et plus fréquemment avec les sédiments transportés.



Figure 9: Exemple d'atterrissement de bois en rivière.

Les amas de bois sont effectivement des structures dont l'assemblage a des impacts sur les dynamiques sédimentaires. L'entremêlement des composants génère un effet de peigne, qui capte ainsi les sédiments en suspension et charriés via la perte de charge générée. Des sédiments fins peuvent ainsi se déposer sur les bancs d'accumulation ou sur la plaine alluviale. Lorsque ces surfaces d'accumulation dépassent le niveau d'eau puis le niveau plein bord, elles sont colonisées par la végétation. Les peuplements observés diffèrent selon le niveau d'exhaussement pour des questions de stabilité des sédiments. Subissant des remobilisations ou des rajouts annuels tant que le niveau ne dépasse pas le niveau de plein bord, la végétation sera elle-aussi annuelle. Une fois le niveau plein bord dépassé, les espèces seront hors de portée des crues fréquentes, ce qui fera tendre ce système vers un fonctionnement plus stable et l'apparition d'espèces ligneuses notamment, à condition que ni les sédiments ni l'embâcle ayant permis la formation ne soient remobilisés.

4.3. Pérennisation.

La troisième piste d'évolution possible est la pérennisation des tas de bois par la formation de rejets. Dans l'étude de Pettit et al., cela concerne 28% des tas de bois. Les possibilités de prise de rejets sont liées au phénomène de facilitation de développement des jeunes pousses explicité plus haut. La diminution de la fréquence des crues permet aux rejets de se développer plus facilement dans les zones moins soumises. Les espèces présentes dans les tas de bois ainsi que la quantité de graines contenues conditionnent le développement de ces rejets. Certaines espèces, notamment les pionnières, présentent des facultés de germination ou de repousse accrues. Le développement de la végétation face à l'amont permet de protéger en partie l'aval du tas de bois ce qui permet le recrutement et la protection de graines, leur permettant un meilleur développement ; c'est le « nursing effect ».

Il est important de noter que ce type de dépôt favorise la croissance et le développement des espèces végétales composant la ripisylve (Francis et al., 2008) ; les sédiments fluviaux sont en effet réputés pour être très riches en nutriments. La position de l'embâcle dans le lit mineur permet dans le même temps un accès à l'eau pour les racines, tout en traversant un substrat meuble et cela avec l'influence du « nursing effect » : les conditions sont donc favorables à un bon développement végétal. Les racines, en traversant l'ensemble de la structure, fixent solidement les différents éléments entre eux ce qui garantit la cohésion de l'ensemble et donc la pérennité.

5. Fonctions écologiques des tas.

Les accumulations de bois en rivière ne sont cependant pas de simples éléments entremêlés les uns aux autres et présents dans les cours d'eau. Au contraire, et comme chaque composant de la nature, ceux-ci interagissent de différentes manières avec le milieu les environnant, les processus qui s'y déroulent et la biocénose. Les interactions engendrées ont un rôle important dans la dynamique des écosystèmes, c'est pourquoi il est question de « fonctions » écologiques des tas de bois.

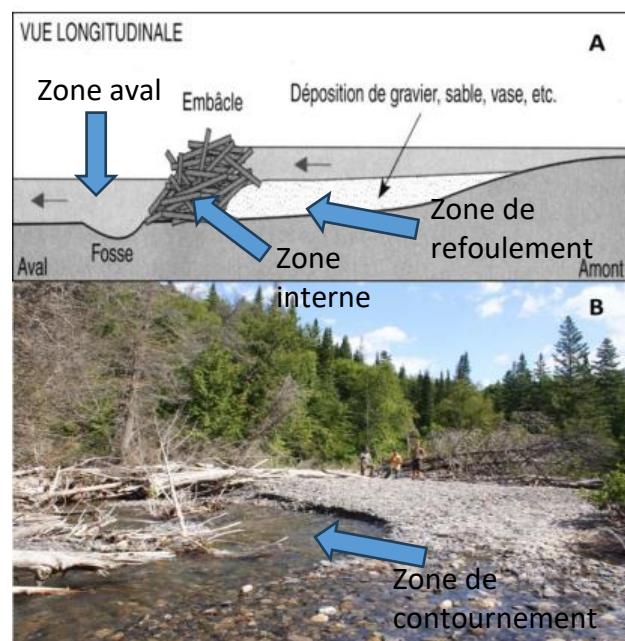
5.1. Pour le milieu abiotique.

Le bois en rivière peut être force de stabilisation, ou représenter un facteur important de perturbation des paramètres abiotiques. Un nouvel embâcle « oblige le cours d'eau à se réajuster », pour retrouver un fonctionnement optimal, en jouant notamment sur les trois paramètres essentiels définissant un habitat en rivière : la hauteur d'eau, la vitesse et le substrat. (Pouilly & Souchon, 1995) Deux cas principaux sont à distinguer : l'augmentation des vitesses et donc du diamètre médian des sédiments -l'érosion emportant les sédiments fins-, ou à l'inverse un affaiblissement des vitesses se traduisant par une augmentation de la hauteur d'eau et la sédimentation de particules plus fines. Ce point implique également que les bois en rivière ont la capacité de changer la morphologie voire le style fluvial d'un secteur (Boivin et al., 2019). Les cas extrêmes seront généralement observés entre autres pour des amas stables dans le temps et volumineux, puisqu'ils influencent le milieu sur le plus long terme (Lassetre & Harris, 2001; Montgomery et al., 2003), mais l'impact est aussi corrélé à d'autres facteurs tels que la proportion du chenal obstrué, la position, l'orientation, la dimension ou encore la porosité (et donc l'âge) de l'amas. (A. Gurnell, 2015; Manners, 2006).

5.1.1. Influenceurs de la structure physique du milieu : facteur de sédimentation.

Comme évoqué précédemment, les amas de bois peuvent occuper différentes positions dans le lit mineur, produisant des effets différents. Toutefois, il est possible de distinguer des similitudes, comme la division de l'écoulement. Les amas ne sont pas des éléments imperméables. Au contraire, leur structure plus ou moins poreuse laisse s'écouler l'eau au travers des différents composants. L'augmentation de la rugosité qui en résulte produit un ralentissement des écoulements à l'intérieur et un refoulement de l'eau incidente à l'amont de l'embâcle. Ce phénomène de refoulement est notamment observable lorsque l'obstruction concerne plus de 10% de la largeur du chenal. Quatre zones majoritaires, observables sur la Figure 10 sont à distinguer, et sont caractérisées par leur vitesse d'écoulement :

- La zone de **refoulement**, qui est caractérisée soit par un phénomène de rehaussement de la ligne d'eau (dans le cas où l'obstacle représente plus de 10% de la largeur plein bords) soit par un ralentissement de l'écoulement. Les vitesses d'écoulement y sont donc très faibles voire nulles ;
- La zone de **contournement**, qui concentre les flux refoulés par l'amas de bois et les flux incidents « non directement affectés » ; la concentration d'un débit plus important sur une plus petite section entraîne une augmentation des vitesses ;
- La zone **interne** au tas de bois, comportant de très faibles vitesses, causées par le nombre important de turbulences générées par les matériaux accumulés. L'importante surface de contact produit également un ralentissement par friction non négligeable ;
- La zone **aval**, avec des vitesses plus ou moins faibles selon la porosité de l'embâcle, mais étant tout de même plus élevées qu'en zone interne, notamment car l'écoulement est moins perturbé (absence de branches). Dépendamment de la structure de l'embâcle et du débit, cette zone peut être soit caractérisée par de la sédimentation soit par de l'érosion.



Les processus de sédimentation vont s'observer au niveau des ralentissements des écoulements. Dans le cas d'un amas surélevé par rapport au fond, il y aura également de la sédimentation après le ressaut hydraulique, en aval. Des phénomènes d'érosion seront quant à eux associés aux zones de vitesses plus importantes, et seront abordés plus tard.

Dans les zones internes et celles de refoulement, des accumulations de sédiments plus fins que ceux qui composent le lit de la rivière se mettent en place. Les phénomènes de « peigne » et « d'effet plan d'eau » entraînent une perte de charge de l'écoulement et donc le dépôt de sédiments fins jusqu'alors en suspension, comme cela a pu être montré pour une rivière à lit graveleux présentant des accumulations sédimentaires dont la diversité granulométrique s'étend des sables aux argiles (Montgomery et al., 2003; Skalak & Pizzuto, 2010). La généralisation à l'échelle du tronçon hydrographique des processus de sédimentation provoque l'exhaussement du lit. Il est donc observable une diversification des faciès granulométriques, des reliefs bathymétriques (création de radiers et mouilles notamment (Figure 11) et également une capacité de débordement accrue pour le cours d'eau en période de hautes eaux. Cette dernière peut d'ailleurs résulter, pour les cours d'eau suffisamment dynamiques, par un début de recouplement de méandre ou le développement de chenaux d'avulsion.

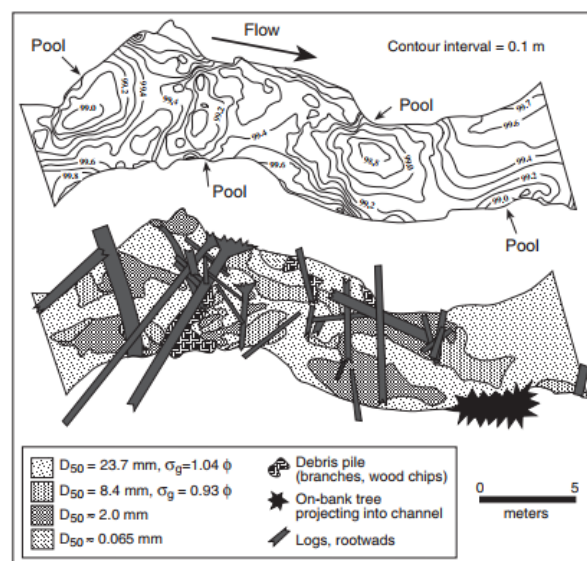


Figure 11: Cartographie des amas de bois, du relief et de l'hétérométrie du substrat dans la rivière Mill Creek.

(Source : Montgomery et al., 2003)

Il est également intéressant de rappeler que les tas de bois sont des éléments dynamiques destinés à se dégrader et à libérer les sédiments captés jusqu'alors. Le démantèlement d'un embâcle, qu'il soit naturel ou anthropique, est généralement suivi d'un apport massif de sédiments vers l'aval (relargage). Beschta R.L. (1979) a illustré que la présence d'un embâcle peut forcer l'accumulation de sédiments sur 250 m en amont, (dépendamment de l'âge de l'embâcle, entre autres). Suite au démantèlement de celui-ci, plus de 5000 m³ de sédiments ont été libérés lors du premier évènement hydrologique intense, changeant drastiquement la dynamique du cours d'eau en provoquant une incision (des sédiments déposés) de plus de 2 m par endroits (Beschta R.L., 1979). Certaines études évoquent un pic du taux de transport en charge de fond après un démantèlement d'embâcle quatre fois supérieur au taux habituel. Sur le long terme, des rivières riches en bois présentent donc des taux de transport sédimentaire faible, mais des pentes plus importantes que des rivières comparables mais qui sont pauvres en bois (Montgomery et al., 2003). Des pentes plus importantes permettent ainsi des dynamiques écologiques plus vertueuses, évitant l'eutrophisation et un échauffement moindre des eaux.

Lorsque les vitesses d'écoulement à l'aval d'une obstruction sont réduites, le principe est le même, cela entraîne une perte de charge, la sédimentation et la formation d'un banc d'accumulation (Figure 12) pouvant atteindre le niveau plein bord au fil des rehaussements via les sédiments apportés en crues.

Enfin, les débris ligneux peuvent s'accumuler parallèlement à la berge, ce qui représente un obstacle direct au frottement de l'eau sur la berge, contribuant à limiter l'érosion de celle-ci. Mais le champ de vitesses du chenal est aussi altéré dans le sens transversal. Alors qu'au sein des chenaux non obstrués, les vitesses maximales se situent en extrados et à l'aval d'un méandre, les chenaux présentant des tas de bois, se concentrent le long de ces embâcles, soit plus proche du centre du chenal. Ils réduisent ainsi la pression érosive exercée sur la berge. Toutefois, la concentration d'une force de cisaillement importante vers le centre du chenal favorise la formation d'un profil en « V » et une incision locale du lit.

Cependant, il existe simultanément à ces phénomènes, des phénomènes d'érosion causés également par les tas de bois en rivière.

5.1.2. Influenceurs de la structure physique du milieu : facteur d'érosion.

En réduisant la section d'écoulement, les embâcles forcent le contournement des écoulements et accélèrent localement l'écoulement pour maintenir un débit équivalent (théorème de Bernoulli). Ces zones, ont un niveau énergétique plus élevé, et donc une capacité de transport accrue. Cela est d'autant plus vrai pour des amas ancrés dans le substrat. Comme le montre la Figure 13, l'intensité de l'effet est fonction de la proximité à l'obstacle : plus l'obstacle est proche, plus le courant sera détourné et devra chercher un passage alternatif autour de l'obstacle.

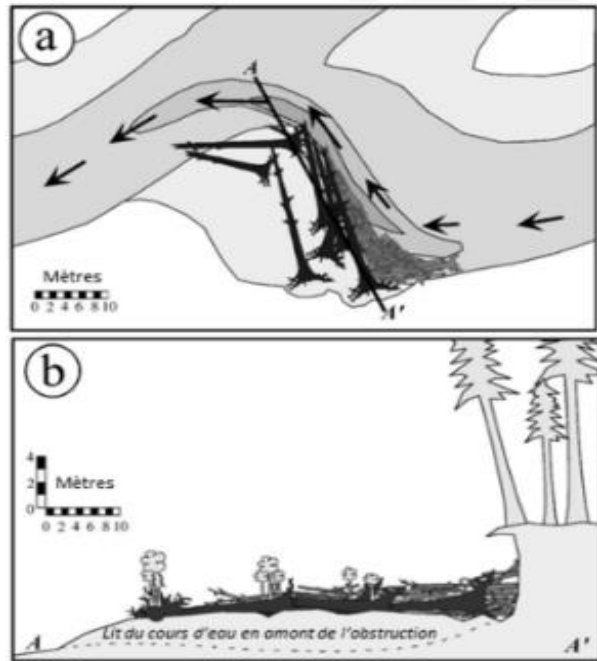


Figure 12: a) Vue en plan d'un embâcle redirigeant l'écoulement ; b) Sédiments à l'aval de l'embâcle.

(Source : Boivin et al., 2019, adaptée de Abbe et Montgomery, 2003)

La proximité des sédiments aux vitesses les plus importantes explique ainsi pourquoi des embâcles ancrés dans le substrat provoquent un charriage plus important. Cette modification hydraulique améliore l'affouillement des mares. La typologie de Montgomery et al. (2003) dresse les motifs érosifs associés aux différentes configurations de bois. En fonction de son orientation et de sa position au-dessus du lit (généralement entre 40° et 90° par rapport au sens d'écoulement de l'eau), le bois peut former quatre types d'obstacles de base (verticaux, inclinés, horizontaux et en marche), chacun correspondant aux types de fosses (Figure 15)(Montgomery et al., 2003) :

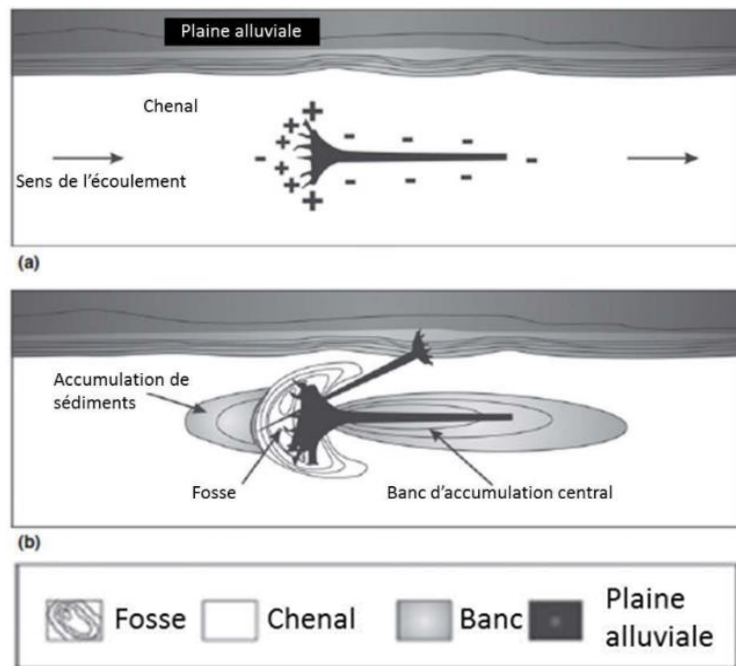


Figure 13: Champs de vitesse et zones d'érosion/sédimentation à proximité d'un embâcle.

(Source : Adapté de Boivin et al., 2019)

- Les **obstructions verticales** se comportent comme des culées et des piliers de pont, créant des turbulences en fer à cheval et des tourbillons qui parcourent le lit du canal. La profondeur d'affouillement varie proportionnellement au rapport de la largeur obstruée à la profondeur d'écoulement (Buffington et al., 2002b in Montgomery et al., 2003). Des processus de sédimentation à l'aval direct de l'obstacle sont observables (Figure 13b).
- Les **obstructions horizontales**, subparallèles à la surface de l'eau, contraignent les écoulements vers le substrat du lit, où il y a de l'érosion. Le ressaut hydraulique provoqué permet la sédimentation. L'écoulement peut aussi être dirigé vers la ou les berges. (Figure 14a et b).
- Les **obstructions inclinées** sont des rondins orientés obliquement par rapport à la surface de l'eau. La structure de l'écoulement et les mécanismes d'affouillement des grumes inclinées sont similaires à ceux des obstructions verticales de type « pilier », mais ces mécanismes sont compliqués par les accélérations de l'écoulement au-dessus, au-dessous et autour des débris. L'affouillement des fosses pour les obstructions horizontales et inclinées dépend du diamètre des bois, de l'angle d'attaque, de la vitesse d'écoulement, de la hauteur au-dessus du lit et de l'inclinaison par rapport à l'horizontale (Beschta 1983 ; Cherry et Beschta 1989 in Montgomery et al., 2003) (Figure 14c).
- Les **marches de bois** créent des écoulements turbulents en aval qui creusent des fosses de chute dont la profondeur est fonction de l'énergie de l'écoulement, de la profondeur et du degré de turbulence. Il y a également une perte de charge en amont, avec de la sédimentation. Cela illustre bien la notion d'équilibre sédimentaire des écoulements (Figure 14d).

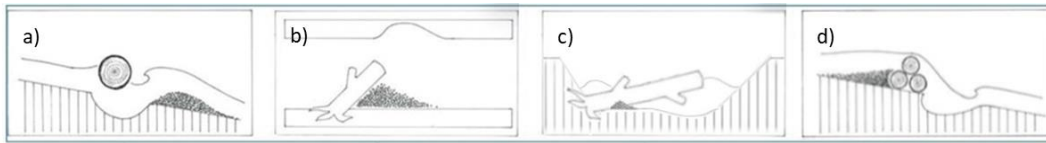


Figure 15: Les 4 types d'embâcles (et l'érosion engendrée) selon leur position dans le chenal.
(Source : Adapté de Boivin et al., 2019)

Pour chaque situation, la réactivité du milieu et l'intensité des changements dépendent aussi de paramètres tels que la géométrie du chenal, la taille des grains de la surface du lit, la force de cisaillement critique des particules (rugosité relative), les sources et la granularité de la charge du lit et le gradient du canal (Buffington et al., 2002 in Montgomery et al., 2003).

L'expression plus importante du phénomène d'érosion sur les tronçons de rivières présentant des embâcles de bois génère un nombre de fosses généralement plus élevé que sur ceux qui ne comptent pas ou peu d'embâcles. Il est globalement pris comme référence que la distance moyenne entre les fosses correspond à cinq à sept fois la largeur plein bord du cours d'eau (Thompson, 2018). Cependant, dans des cours d'eau ayant une forte « activité ligneuse », la distance des séquences est réduite de manière significative, pouvant atteindre 0.8 à 4 fois la largeur plein bord selon les auteurs et les études. (Montgomery et al., 1995; Webb & Erskine, 2003; Wyrick & Pasternack, 2014)

En plus d'influencer les mésoformes du lit mineur, les embâcles peuvent aussi influencer sur sa structure en plan notamment en redirigeant l'écoulement vers une berge plutôt que vers le lit. L'érosion, ainsi exacerbée, provoque un élargissement du chenal. Différents types d'embâcles peuvent avoir cet effet. C'est par exemple le cas des embâcles horizontaux ou des embâcles situés à l'apex de bancs d'accumulation centraux. En obstruant une partie de la section transversale, ils repoussent l'écoulement de part et d'autre du chenal, ce qui a pour effet d'éroder la berge et de favoriser la migration du cours d'eau (Figure 15). Dans ces circonstances-ci, l'élargissement peut atteindre plus de 50 % de la largeur initiale du chenal. Des phénomènes de recoupement de méandres ou d'avulsion peuvent aussi être envisagés, comme présenté précédemment.

Les tas de bois fluviaux ont donc la particularité de favoriser à la fois la sédimentation, de protéger les berges et d'exacerber les processus d'érosion déjà à l'œuvre dans le cours d'eau, simultanément. Cependant, ce ne sont pas là les seules fonctions écologiques leur étant associées.

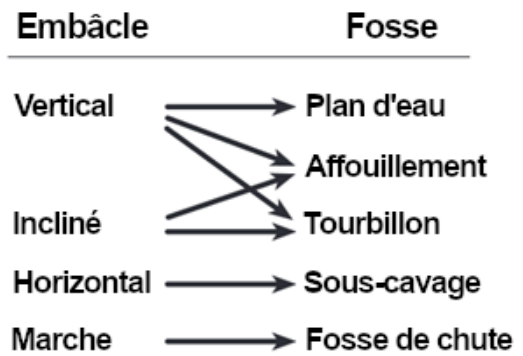


Figure 14: Type de fosse selon la nature de l'embâcle ayant causé sa formation.

(Source : Adapté de Montgomery et al., 2003)

5.1.3. Pourvoyeur de substrat nutritif.

Comme cela a pu être expliqué en partie 4 quant à l'atterrissement et la pérennisation, les tas de bois forment des substrats de choix pour le développement végétal. En plus des sédiments riches en nutriments, en se dégradant, les tas de bois enrichissent directement en matière organique le substrat accumulé. Les microorganismes minéralisent cette matière organique qui sera utile à la croissance des arbres qui poussent près du bois en rivière ou directement dessus. Ainsi, le bois facilite la croissance de la ripisylve qui elle-même sert de refuge à la faune terrestre, mais aussi aquatique. Le développement d'un écosystème sur la partie supérieure met en place un apport régulier supplémentaire de matière organique, pouvant ensuite tomber dans l'eau et servir d'abris et de source nutritive.

Le tas de bois qui se dégrade et les divers apports extérieurs (feuilles, excréments, ... de la vie se développant sur le tas de bois pérennisé) sont tout autant de sources d'alimentation pour les poissons, les invertébrés et les microorganismes (bactéries, biofilms, moisissures, ...) (Figure 16) permettant la décomposition de la matière. Les tas de bois filtrant les différents éléments en suspension, il y a ainsi une grande diversité « d'aliments », sous différentes formes, des plus grossières (Particules de Matière Organique Grossière (CPOM)) aux plus fines (Particules fines de Matière Organique (FPOM) voire de la Matière Organique Dissoute (DOM)) pouvant s'accrocher sur les aspérités des tas de bois, adapté aux détritivores, décomposeurs, etc. et permettant donc une plus grande diversité des espèces ayant ces rôles. (Allan et al., 2021; Boivin et al., 2019; Wantzen et al., 2008)

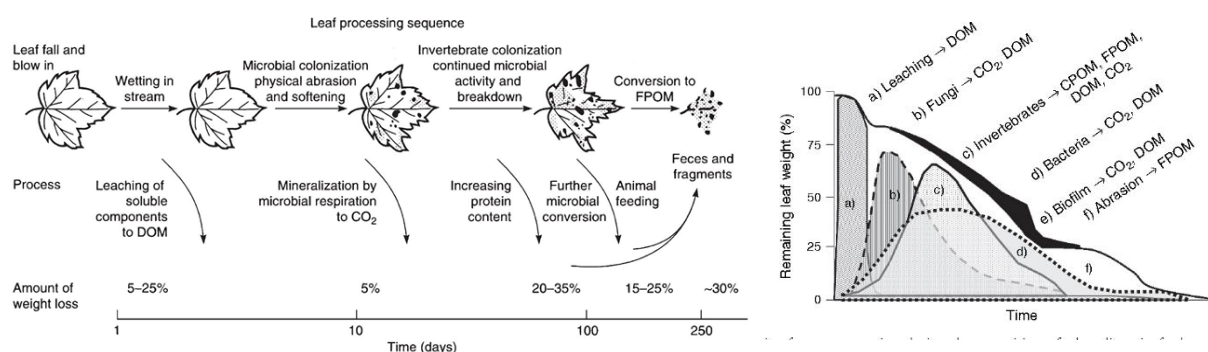


Figure 16: Processus et communautés dégradant la matière organique morte en milieu aquatique. (Sources: Allan and Castillo 2007, Stream Ecology; Wantzen, Yule, Mathooko & Pringle 2006)

5.2. Un hotspot de biodiversité.

Les tas de bois fluviaux exercent une influence majeure sur les cours d'eau, au travers des différents processus géomorphologiques. De surcroît, ces changements se répercutent tout autant sur les caractéristiques des habitats que sur les peuplements de ces rivières.

5.2.1. Un phénomène entre diversification et stabilisation des habitats.

Les tas de bois confèrent aux cours d'eau la capacité de s'élargir, de développer des chenaux secondaires, de sortir de son lit plus facilement, de même qu'ils apportent une rugosité additionnelle, grâce à leur structure poreuse. « Le bois force » la dissipation de l'énergie du cours d'eau, notamment lors de crues, les rendant moins intenses et moins

rapides, aussi bien à l'échelle des embâcles que du tronçon si ces structures sont suffisamment nombreuses et conséquentes. Par ce forçage, le bois stabilise les cours d'eau en améliorant la résistance de l'hydrosystème à des perturbations majeures. Cet effet stabilisateur a pu être prouvé sur des tronçons ayant une forte activité ligneuse, jusqu'à des événements de récurrence d'environ 5 ans, et peut avoir des conséquences non négligeables sur la biodiversité du milieu (Faustini & Jones, 2003; A. M. Gurnell et al., 2002).

La stabilisation du milieu est un facteur conditionnant la diversité, comme l'a démontré Connell (1978) : des perturbations importantes fréquentes ne sont pas souhaitables pour avoir une diversité maximale, de même qu'aucun changement n'est pas préférable car cela entraîne la dominance de quelques espèces compétitives. Une fréquence de 5 ans offre ainsi un compromis sur le graphe de l'hypothèse de perturbation intermédiaire (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) proposé par Connell, favorisant une certaine diversité, aussi bien de milieux que d'espèces.

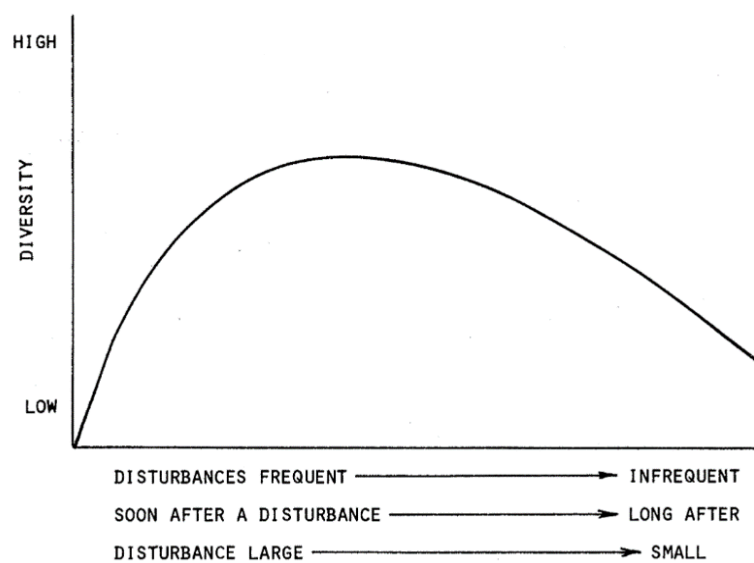


Figure 17 : Hypothèse de perturbation intermédiaire.

(Source : Connell, 1978)

Par ailleurs, cette étude a précédemment mis en exergue à quel point les accumulations de bois complexifient les milieux hydriques que sont les cours d'eau. Elles rendent possible la proximité des processus antagonistes de sédimentation et d'érosion en influant notamment sur la diversité des vitesses d'écoulement, via la présence de zones avec de faibles vitesses juxtaposées à des zones de très fortes vitesses. Ce phénomène a été démontré par Shields et Smith (1992) en comparant les profils de vitesses de leur site d'étude avant et après démantèlement d'un l'embâcle. En effet, la vitesse d'écoulement de l'eau en aval d'un embâcle est proche d'une valeur nulle alors que les vitesses de l'eau déviée dépassaient les 2 m/s. Après démantèlement de l'embâcle, les vitesses maximales atteintes étaient de 1,6 m/s sur l'ensemble de la section transversale. En l'absence d'obstruction, il est très rare de retrouver des zones où les vitesses d'écoulement sont si contrastées dans un environnement restreint. Au contraire, comme c'est le cas après démantèlement, les vitesses sont uniformes. Cela entraîne par la même occasion un lissage du fond et une homométrie du substrat en raison des conditions sont relativement homogènes, longitudinalement comme latéralement. La diversité hydraulique engendrée par les embâcles permet ainsi la diversification des habitats au sein du chenal, qu'ils soient lotiques ou lentiques.

5.2.2. La mise en place de chaînes trophiques complexes.

Les tas de bois en rivière entraînent une modification des vitesses de courant et créent des zones lenticules. Ces zones sont des environnements propices au développement de biofilms et d'algues. Leur développement est facilité par la complexité des structures de bois et l'hétérogénéité des textures en surfaces. L'implantation d'espèces végétales attire les consommateurs primaires. Ces espèces viennent se nourrir des algues ainsi que des débris portés par le courant. Ils constituent ainsi les premiers maillons de la chaîne trophique des tas de bois en rivière. Ainsi, plus la diversité d'espèces pionnières est élevée, plus grande est la diversité chez les organismes qui les consomment, par exemple, les macro invertébrés benthiques (Cashman, 2014; Hax & Golladay, 1993). La présence en quantité de macro invertébrés, venus se nourrir sur un site aussi restreint qu'un tas de bois, attire leurs prédateurs naturels qui à leur tour font des tas de bois leur terrain de chasse préférentiel. Se met ainsi en place sur quelques mètres carrés seulement, un réseau trophique complexe incluant une grande variété d'espèces.

Outre l'aspect de site de nourrissage, les tas de bois représentent un refuge de qualité tant sur le plan hydraulique, que thermique et face à la prédation.

La complexification de la rivière crée des refuges hydrauliques permettant aux espèces de s'abriter des courants plus rapides et de se reposer. Wright & Flecker (2004) ont mis en évidence un changement de structure de la population en présence d'abris. Ce fait est relevé en comparant la structure du peuplement piscicole retrouvé dans des fosses sans bois avec le peuplement de ces mêmes fosses après avoir ajouté du bois. Il a ainsi été constaté une augmentation significative du nombre d'espèces et d'individus, avec plus d'espèces rares, et un peuplement atteignant des caractéristiques similaires aux fosses naturellement formées par le bois (Cashman, 2014). Cela témoigne assurément de la plus-value écologique qu'apportent les tas de bois aux habitats aquatiques.

Les fosses formées par le bois en rivière sont généralement plus profondes que celles formées sans bois. Leur formation, accompagnée de la repousse d'arbres sur les tas, crée un espace frais et ombragé bénéfique à de nombreuses espèces de poissons. Ces environnements permettent l'abri d'espèces présentant des individus matures de taille conséquente, telles que la truite fardée (*Oncorhynchus clarkii*), le saumon coho (*Oncorhynchus kisutch*) et le silure glane (*Silurus glanis*), entre autres, aussi bien pour faire face aux forts courants de crues, à la prédation, au manque d'eau en étiage ainsi qu'à l'échauffement important des eaux durant cette même période, et ce davantage si les fosses sont recouvertes par un toit de bois ou matière végétale. Les tronçons de cours d'eau qui comprennent le plus de bois affichent généralement une température inférieure à ceux qui n'en comptent pas ou peu. (Boivin et al., 2019; Ebersole et al., 2003; Fausch & Northcote, 1992; Trancart et al., 2023).

Le phénomène d'isolation visuelle des individus, généré par la présence d'obstacles végétaux est également important. Il diminue la prédation, la compétition pour la ressource alimentaire ainsi que les comportements agressifs (Schneider & Winemiller, 2008). Il en résulte une densité d'individus, une diversité d'espèces et d'âges accrues, ainsi que des individus de taille supérieure. Si l'ichtyofaune bénéficie de ces avantages, il en va de même pour les macro invertébrés, qui peuvent être très vulnérables face à la prédation ou une augmentation des vitesses d'écoulement.

Les tas de bois jouent effectivement un rôle important sur les caractéristiques des populations de macro invertébrés qu'ils abritent. Comme l'a présenté Cashman (2014), la diversité d'espèces, la densité et la biomasse par individu tendent à être plus élevés dans des cours d'eau présentant des tas de bois que dans des rivières qui en sont appauvries. La combinaison de la disponibilité des nutriments et de l'effet de refuge contre les perturbations (crue ou prédation) des aspérités contribuent également à assurer la diversité des espèces d'invertébrés. (Boivin et al., 2019)

La diversité concrétisée par l'action des tas de bois n'influence pas que les paramètres démographiques des populations, mais aussi les populations elles-mêmes par la présence de différentes vitesses.

De nombreuses espèces de la faune aquatique dépendent de l'hétérogénéité créée par ces vitesses diverses (Cashman, 2014; Douglas Shields & Smith, 1992) :

- Un substrat grossier en zone lotique, tel que des graviers, est favorable à l'**éclosion** des œufs de **salmonidés** (via leur bonne oxygénation)
- La proximité de zones lenticules (de repos) et lotiques est attrait fort pour les carnassiers, capables ainsi de se **poster en chasse** à l'abris et se jeter sur sa proie passant dans le courant
- Les dépôts de sédiments fins, protégés du courant, sont des zones **prisées par les macro invertébrés** et les salmonidés juvéniles, ceux-ci se nourrissant de macro invertébrés
- Certaines espèces de macro invertébrés n'ont pu être **identifiées qu'au sein d'habitats** formés par les bois fluviaux.

5.2.3. Une réponse biologique des communautés.

En 2015, Roni et al. ont conduit une analyse de la littérature scientifique abordant la réponse biologique des espèces aquatiques en présence de bois fluvial. La réponse biologique conceptualise les changements observables sur des individus, une population voire un peuplement des suites de la modification de leur habitat. Sur les 122 études analysées, 96 ont signalé des réponses biologiques au placement du bois, dont 68 ont rapporté un résultat positif sur des paramètres majeurs de population (abondance, biomasse, survie des poissons pour au moins une espèce de poisson à un stade de vie (juvéniles ou adultes)), 27 n'ont signalé aucune variation significative, et 7 ont signalé une réponse négative (Figure 18). En complément de l'étude de Whiteway et al. (2010), il est ainsi montré la réponse des salmonidés par rapport à d'autres espèces ainsi que des invertébrés, bien que les résultats pour ceux-ci ne permettent pas de conclusion sur l'effet ou non du bois. D'autres études permettent toutefois d'affirmer que les salmonidés (famille des *Salmonidae*) ainsi que le brochet (*Esox lucius*), le doré (*Sander vitreus*) et les carpes (famille des *Cyprinidae*) affichent une réponse biologique très positive dans des habitats formés de bois (Boivin et al., 2019).

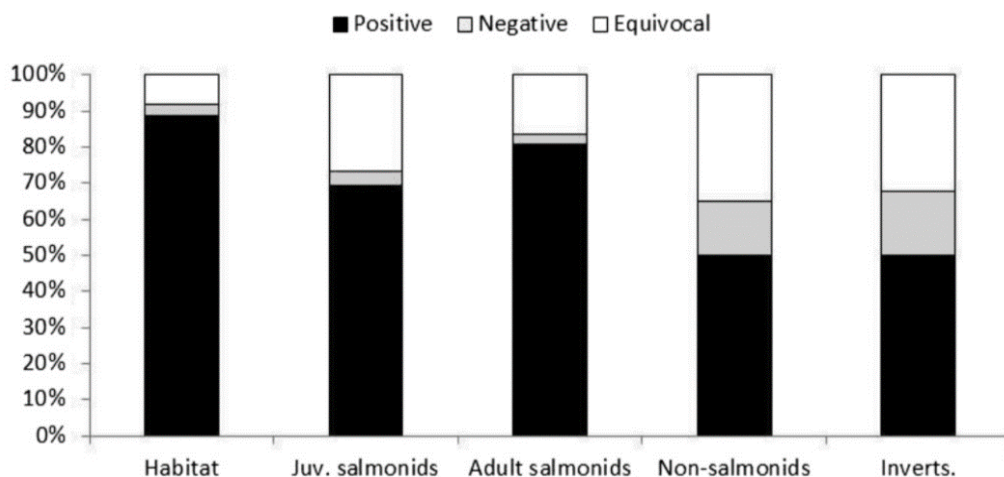


Figure 18 : Part d'ouvrages relatant des intensités de réponse du biotique à la présence de bois en rivière.

(Source : Roni et al., 2015)

Si chacune des espèces de ces réseaux trophiques n'a pas pu faire l'objet d'études, il est néanmoins d'ores et déjà possible de mettre en avant le lien entre certaines espèces piscicoles et la présence de tas de bois, au-delà de l'aspect nutritif. Whiteway et al. (2010) montrent notamment que les Salmonidés, famille largement étudiée dans le domaine scientifique, ont une réponse d'adaptation forte à la présence de tas de bois, se traduisant par une augmentation importante de la densité d'individus, notamment pour la truite arc-en-ciel (rainbow trout), contrairement à la truite « steelhead », qui a la plus faible réponse bien que ce soient deux sous-espèces d'*Oncorhynchus mykiss* (Figure 19).

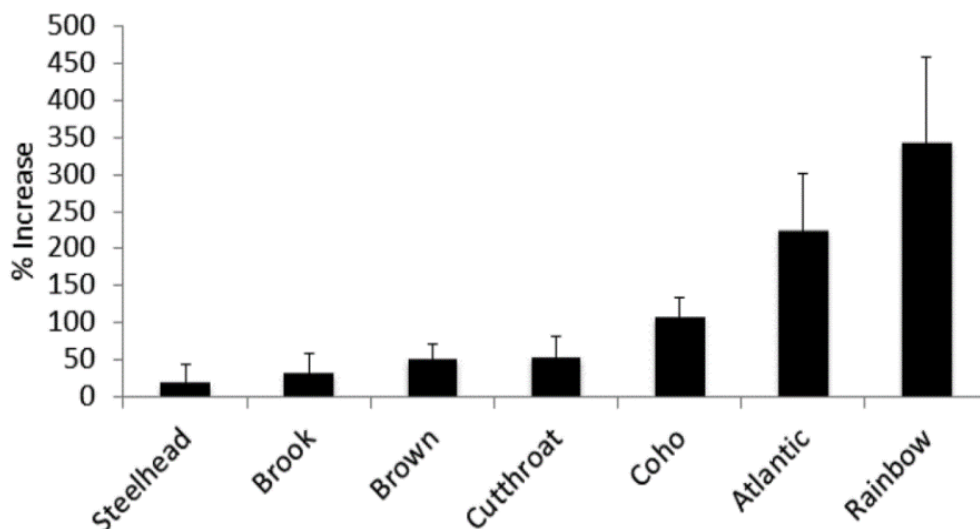


Figure 19: Réponse biologique de salmonidés à la présence de bois en rivière.

(Source : Roni et al., 2015 adapté de Whiteway et al. 2010)

6. L'évaluation de la porosité des tas de bois dans la littérature.

De nombreux processus géomorphologiques et biologiques ayant lieu en rivière se sont révélés être dépendant de la présence de bois en rivière. Les tas de bois participent notamment à la complexification du milieu, c'est-à-dire la création et la diversification des habitats dans les hydrosystèmes. Les positionnements, compositions et structures des tas de bois dans les cours d'eau sont au même titre très variables, tel qu'ont pu le montrer Montgomery et al., (2003) ou Pettit et al. (2005). Il convient de se questionner sur ce qu'implique leur diversité sur les fonctions qu'ils exercent, en particulier ce qui a attiré à l'habitabilité des tas de bois, au travers des espaces libres présents à l'intérieur de ceux-ci.

Ebersole et al. (2003) démontraient que l'espace offert par les amas conditionne les caractéristiques des individus en présence. Pour déterminer les potentialités d'habitat, il semble donc nécessaire de pouvoir quantifier à la fois le volume total disponible dans le tas de bois (espace disponible), mais également la taille des espaces poreux pour des raisons d'accessibilité des espèces. Cette démarche permettra donc de déterminer l'espace habitable, propre à chaque espèce.

La consultation des méthodes déjà existantes permettra d'isoler les points d'intérêt ou critiques de celles-ci. Par la suite, l'adaptation d'éléments de méthodes et la conception d'un protocole d'étude de la structure et des espaces poreux des tas de bois seront réalisées.

6.1. Ressources bibliographiques.

La constitution d'une base bibliographique, plus centrée sur le sujet de la caractérisation des paramètres des tas de bois, s'est articulée en deux temps. Le premier a consisté à parcourir la liste bibliographique précédemment formée, présentée en partie 2, afin de sélectionner à partir de leur titre, les ouvrages pouvant être utiles à l'étude parmi ceux déjà sélectionnés en suivant la méthode explicitée plus haut.

Ainsi, 8 documents sont ressortis de cette nouvelle sélection.

Parmi ces articles, quatre se sont révélés être dans un but de gestion et de valorisation forestière, c'est-à-dire la quantification massive et volumique du bois en rondins, à l'aide de procédés d'analyse 3D ou de photogrammétrie (Cremer et al., 2020; de Miguel-Díez et al., 2021; Herbon et al., 2015; Moskalik et al., 2022). Cependant, les méthodes telles que développées dans ces ouvrages, ne sont pas applicables à une grande partie des tas de bois notamment à cause :

- De la distorsion optique générée par l'indice de réfraction de l'eau plus élevé que l'air
- De la réflexion des faisceaux laser type LiDAR sur l'eau (notamment LiDAR rouge)
- De la morphologie du bois mesuré, très différente de celle des rondins
- De l'organisation aléatoire des composants pouvant masquer d'autres éléments à l'intérieur du tas, ou des vides internes au tas.

L'ouvrage de Boivin et al. (2019) quant à lui se concentre sur la dynamique du bois en rivière plus que sur la description et la caractérisation des tas de bois. Les procédés de

quantification ne sont pas abordés, au profit d’une réflexion sur les processus de formation et d’évolution des tas de bois à l’échelle du bassin versant.

Ces cinq ouvrages n’ont donc pas été retenus pour la suite de l’étude. Les trois autres articles identifiés dans la liste bibliographique présentent néanmoins un lien plus pertinent avec la caractérisation des tas de bois en rivière.

La seconde partie a été nécessaire car le bagage scientifique n’était pas suffisant avec ces trois ouvrages et de nombreux points restaient à être traités. Une recherche plus spécifique que celle présentée en partie 2 a dû être réalisée. En utilisant le site Colibri, les termes « woodpile porosity » puis « wood pile porosity » ont d’abord été saisis. En appliquant un tri par pertinence et en effectuant une appréciation sur le titre, aucun ouvrage pertinent n’a été relevé respectivement sur les 25 premiers puis 16 premiers et seuls résultats. Une troisième recherche employant les mots clés « river wood porosity » a permis de sélectionner 7 résultats intéressant au regard du titre sur les 25 premiers résultats triés par pertinence. Un d’entre eux avait d’ores et déjà été sélectionné lors de la phase précédente de tri de la liste bibliographique, composée au début de la partie 6.1. Ces résultats sont synthétisés dans le Tableau 3.

Tableau 3: Synthèse des résultats de recherche bibliographique spécifique.

Bibliothèque consultée	Termes de la recherche	Filtres appliqués	Nombre de résultats retenus
Bibliothèque constituée en partie 2		Appréciation sur titre	8
Colibri	Woodpile porosity	Appréciation sur titre	0
Colibri	Wood pile porosity	Appréciation sur titre	0
Colibri	River wood porosity	Appréciation sur titre	7

6.2. Éléments bibliographiques d’intérêt.

L’état de l’art ainsi réalisé a permis de mettre en avant de nombreuses méthodes employées par divers chercheurs sur des rivières de pays et continents différents (Europe, États-Unis, Canada, ...). Toutefois, ces méthodes semblent toutes très axées sur la connaissance de la porosité des tas de bois pour des applications en modélisation de crues sur des logiciels de simulation, la compréhension des mécanismes morphologiques à l’œuvre, etc. mais très peu de possibilités d’utilisation pour la biologie sont évoquées. C’est en ce point que la présente étude apporte un regard nouveau sur la porosité des tas de bois, car elle vise à lier la porosité à l’utilisation possible par les peuplements aquatiques. Afin de limiter à la fois l’impact sur le fonctionnement des écosystèmes, le matériel nécessaire et les temps de collecte et d’analyse des données, seuls les éléments non intrusifs seront considérés.

L'élément constitutif des tas de bois est bien évidemment le bois. La rivière étant un intégrateur du bassin versant, une importante diversité d'éléments ligneux se retrouve dans la rivière et donc les tas de bois. Ainsi, il est important de poser avant tout une classification des pièces de bois pouvant se retrouver dans les amas fluviaux. Une classification est communément utilisée dans les protocoles de quantification des tas de bois (Baillie et al., 1999; Livers et al., 2020; Manners et al., 2007; Scott et al., 2019; Thevenet et al., 1998), ce qui permet d'uniformiser en partie les résultats et la réutilisation des données par d'autres chercheurs. Cette classification comporte trois catégories qui sont admises par une majorité des auteurs bien que certains considèrent des répartitions différentes des tailles au sein de ces 3 classes dans leur étude :

- Les Débris Ligneux Grossiers (DLG) : pièces dont le diamètre est supérieur à 10cm ; pour Scott et al. (2019), Platts et al. (1983, in Thevenet et al., 1998) et Livers et al. (2020), les DLG doivent également avoir une longueur supérieure à 1m
- Les Débris Ligneux Moyens (DLM) : correspondent aux pièces de bois dont le diamètre est compris entre 1 et 10cm de diamètre ou aux débris de plus de 10cm de diamètre mais faisant moins de 1m de long
- Les Débris Ligneux Fins (DLF) : éléments ligneux dont le diamètre est inférieur à 1cm

Les DLG, DLM et DLF sont couramment connus sous les appellations LWD, MWD et SWD pour respectivement « Large, Medium et Small Woody Debris ». Certains auteurs, proposent des alternatives aux DLF car il est difficile de différencier des éléments ligneux des non ligneux à cette échelle. Livers et al. (2020) parlent ainsi de CPOM pour « Coarse Particular Organic Matter » ou « Particules de Matière Organique Grossière », qui comprennent aussi les éléments issus de la décomposition de feuilles, macrophytes, ... Thevenet et al. (1998), quant à eux identifient également les buissons dans une classe à part entière, définie par des pièces présentant 3 à 10 branches majeures dont le diamètre est inférieur à 10cm.

Cette classification est importante car les éléments en présence conditionnent la porosité du tas de bois. La porosité « n », généralement exprimée en pourcents, se définit aisément comme le rapport de volume de vide « \emptyset_{tb} » sur le volume total « V_{tot} » du tas de bois (Pagliara et Carnacina, 2010 in Spreitzer et al., 2020) (qu'il faut multiplier par 100 pour l'obtenir en pourcentage), soit :

$$n = \frac{\emptyset_{tb}}{V_{tot}} \quad (1)$$

Qu'il est possible de remplacer dans la formule de Livers et al. (2020) :

$$V_b = V_{tot}(1 - n) \quad (2)$$

Cela permet d'obtenir :

$$V_{tot} - V_b = \emptyset_{tb} \quad (1 \text{ et } 2)$$

Avec :

- n : La porosité
- V_b : Le volume de bois
- V_{tot} : Le volume total du tas de bois
- \emptyset_{tb} : Le volume de vide dans le tas de bois

Il est ainsi démontré que bien que les espaces vides puissent difficilement être quantifiées en eux-mêmes, ils peuvent l'être par la différence du volume total du tas de bois duquel est soustrait le volume du bois. Il est ensuite possible de déterminer la porosité de la pile de bois.

Livers et al. (2020) introduisent également une variable α qu'il définissent comme étant la proportion des autres éléments solides pouvant être retrouvés dans un tas de bois et n'étant pas ligneux (déchets, plastiques, sédiments, matière organique, ...) qui participent également à la réduction de la porosité des tas de bois. Cette variable permet donc de rendre plus fidèlement compte de l'espace réellement disponible pour la biocénose à l'instant du relevé :

$$\alpha = \frac{V_{sa}}{V_{tot}} \quad (3)$$

D'où, d'après Livers et al. (2020) :

$$V_b = V_{tot}(1 - n)(1 - \alpha) \quad (4)$$

Ou encore :

$$V_b = V_{tot}\left(1 - \frac{\emptyset_{tb}}{V_{tot}}\right)\left(1 - \frac{V_{sa}}{V_{tot}}\right) \quad (4 \text{ et } 3 \text{ et } 1)$$

Ce qui donne :

$$\emptyset_{tb} = V_{tot} - \frac{V_b * V_{tot}}{V_{tot} - V_{sa}} \quad (5)$$

Avec :

- V_b : Le volume de bois
- V_{tot} : Le volume total du tas de bois
- \emptyset_{tb} : Le volume de vide dans le tas de bois
- V_{sa} : Le volume de composants solides non ligneux
- α : La proportion d'éléments solides non ligneux
- n : La porosité

L'équation (5) met ainsi en avant la possibilité de calculer le volume de vide dans un tas de bois en prenant en compte à la fois les composantes structurelles que sont les pièces de bois, au travers du volume de bois de l'amas, mais également d'autres composantes pouvant venir réduire la porosité des tas de bois, tels que des plastiques, de la matière organique, des sédiments, etc.

Thevenet et al. (1998), puis de manière plus notable Manners et al. (2007), ont effectivement montré que la porosité des tas de bois influence particulièrement la circulation de l'eau à l'intérieur de celui-ci. Si l'eau n'est pas à même de traverser efficacement le tas de bois, l'accès en sera tout aussi compliqué pour la biocénose, qui aura moins d'abris. Toutefois, comme le montrent les graphiques de la Figure 20, la complexification du milieu par un tas de bois crée une zone d'abris à l'aval avec de faibles vitesses. L'intensité de la protection dépend de la résistance du bois à l'écoulement, qui bloque le passage de l'eau à cause de la saturation des espaces vides. Le retrait des fractions plus fines génère une ré-homogénéisation des vitesses sur la zone. Conceptuellement, cela s'explique par le fait que « les pièces de bois moyennes peuvent "remplir les trous" créés par les grandes et les petites pièces font de même pour les pièces moyennes » (Manners et al., 2007). Les tas de bois saturés créent donc

également des habitats longitudinalement, en plus de la porosité dans la dimension verticale. Ce point peut être intéressant à aborder sous le regard de la plus-value qu'il apporte au milieu pour la biocénose.

La composition des tas de bois en chaque fraction (c'est à dire DLF, DLM et DLG) n'est pas le seul élément expliquant la variabilité de la porosité. La considération des fractions est d'ailleurs plus pertinente pour l'étude de la porosité que la comparaison des volumes de tas de bois, étant donné que la porosité des amas fluviaux semble indépendante de l'échelle considérée (Livers et al., 2020). Il s'agit en effet du rapport de vide sur le volume total, d'où l'affranchissement des dimensions. Certains auteurs considèrent cependant que le volume total des tas de bois est fidèlement corrélé au nombre d'éléments composants l'amas, ce qui aurait pour conséquence d'augmenter la complexité du tas de bois et de lui faire présenter une plus grande porosité. Or la deuxième partie de cet argument, par son manque de précision, vient contredire les faits énoncés ci-dessus. Il est donc important de tenir compte de la taille des composants du tas de bois en plus de leur nombre, pour réaliser une caractérisation plus précise puisque le nombre d'éléments et le volume sont corrélés.

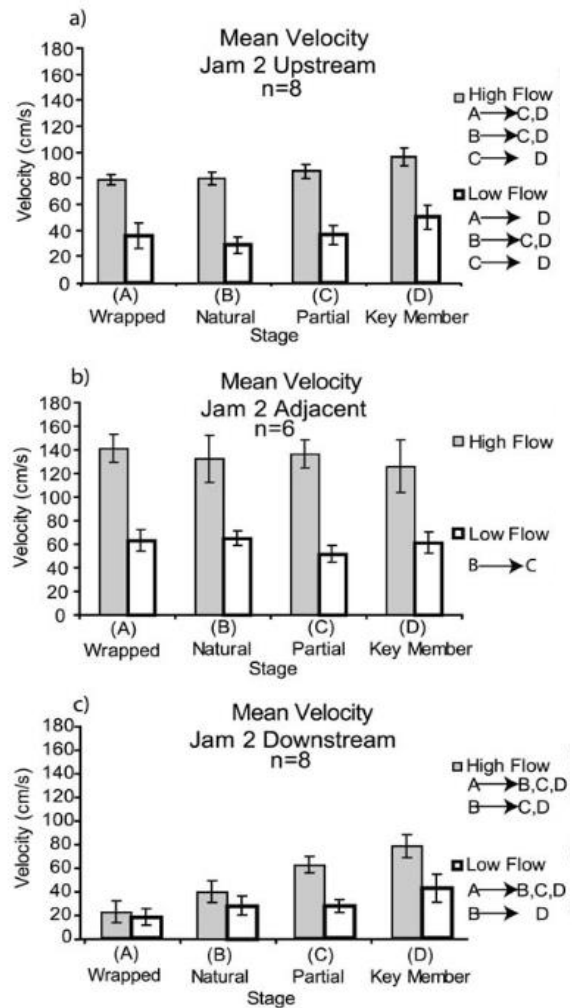


Figure 20: Impact du retrait des DLF puis des DLM sur les vitesses d'écoulement à proximité du tas de bois. Wrapped : tas imperméabilisé, Natural : sans traitement, Partial : sans DLF, Key member : sans DLF ni DLM (très poreux).

(Source : Adapté de Manners et al., 2007)

Ces auteurs reportent aussi que, plus que le nombre de pièces présentes, les processus de formation de la structure des amas conditionne fortement la porosité. Ces processus sont composés du tri fractionnel, c'est-à-dire quelles sont les fractions de bois présentes, comme expliqué plus haut, et le tri spatial de ces fractions, autrement dit, quelle est la structure, l'agencement des fractions dans l'espace (Figure 21).

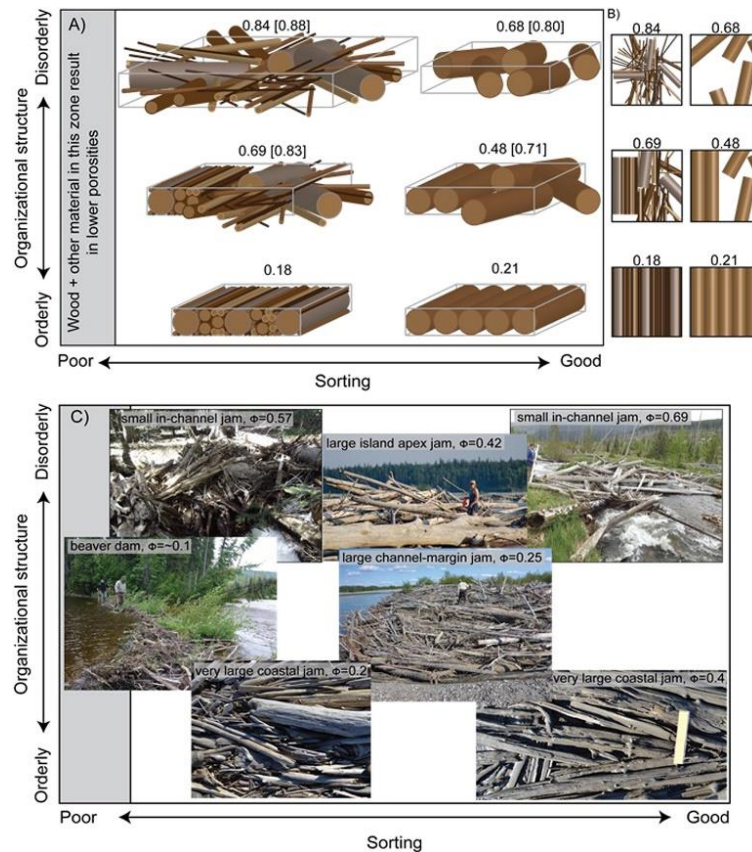


Figure 21: Exemple de classification des tas de bois selon leur porosité, la structure et la diversité de tailles des composants.

(A) Graphique conceptuel de porosité de tas de bois théoriques en fonction de leur diversité de tailles (de "mauvais" à "bon") et de leur agencement (de "ordonné" à "désordonné"). Les porosités sont trouvées à partir des méthodes des boîtes ajustées et des boîtes complètes (ces dernières entre parenthèse). (B) Représentation 2D des tas de bois en (A). Les composants de diamètres différents ont des couleurs différentes. (C) Graphique conceptuel présenté en (A) avec des photos de tas de bois réels, placés selon leur diversité de tailles et leur structure. (Source : Adapté de Livers et al., 2020)

Cette figure met en avant le lien existant entre le tri des fractions et le positionnement des pièces de bois. Il est aisé de noter que plus les tas de bois sont ordonnés et ont de fractions différentes, plus aisément les vides pourront être comblés par les fractions inférieures, et moins la porosité sera grande. En revanche, il est intéressant de noter que la porosité maximale est atteinte pour un tas de bois présentant un nombre de gabarits très différents et très désordonnés. La porosité de tas présentant une gamme de tailles plus restreinte est plus faible, ce qui permet de démontrer que dans certaines conditions, les éléments plus fins ne comblent pas systématiquement la porosité, mais peuvent aussi l'améliorer (Livers et al., 2020). L'utilisation d'un graphique tel que proposé par Spreitzer et al. (2020b) (Figure 22) permet de déterminer de manière plus continue et plus précise une porosité pour chaque intersection possible de structure et de diversité de tailles. Cependant la difficulté se reporte sur la définition des classes de taille et de structure intermédiaires, qui pour l'instant sont qualitatives. L'utilisation d'une table de valeurs continues à partir de critères par définition discrets ne semble pas pertinente.

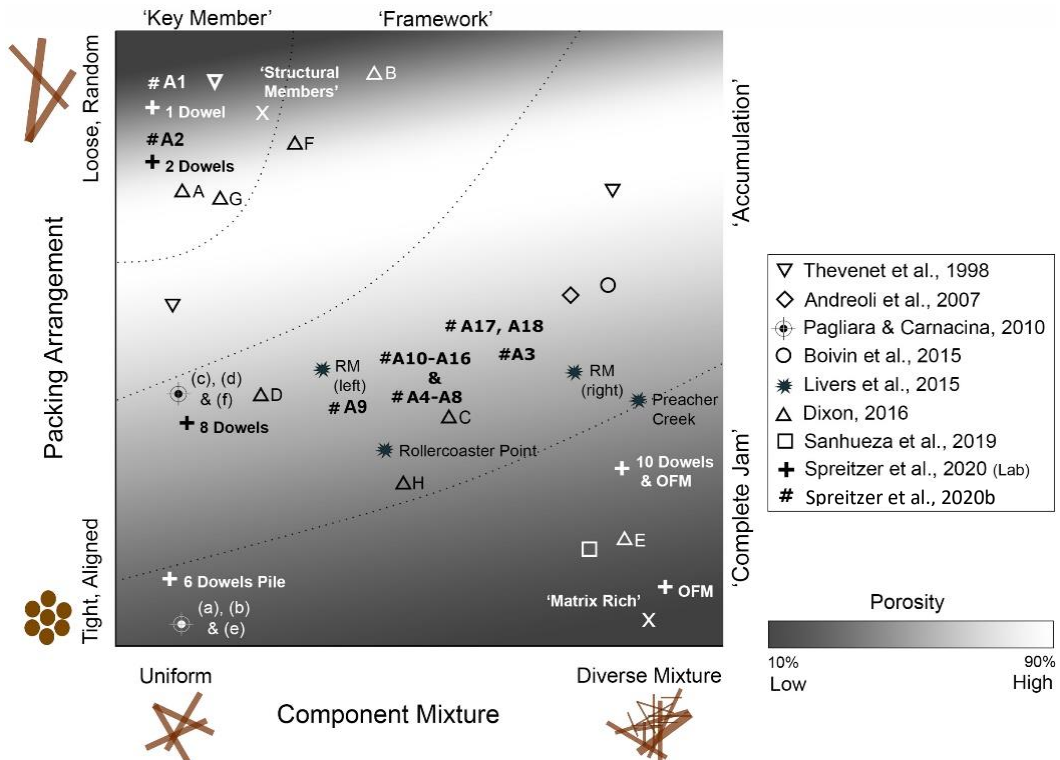


Figure 22: Porosité des tas de bois en fonction de l'agencement et des diversités de tailles des composants. La porosité la plus faible pouvant être obtenue pour des cylindres uniformes est de 9 %. La porosité diminue au fur et à mesure que des éléments plus petits occupent les espaces interstitiels. Les amas aléatoires d'éléments ligneux présentent généralement une porosité d'environ 70 % ou moins, tandis que les éléments structurels individuels peuvent également présenter des porosités plus faibles (10-30 %). Les exemples tirés de la littérature sont indicatifs. Leurs paramètres ont été estimés subjectivement à partir des données fournies ou des photos les accompagnant. (Source : Spreitzer et al., 2020b)

Le modèle proposé par Livers et al. (2020) reste lui aussi partiel car il admet les morceaux de bois comme des cylindres, or le comportement d'accumulation dépend des caractéristiques du bois (bourrelets de racines, branches, ...). De surcroît, la saturation α , n'est pas prise en compte et doit être ajoutée par la suite, réduisant encore la porosité. Ce modèle permet tout de même d'estimer qu'il est peu probable qu'un tas de bois, même parmi les plus désordonnés et mal triés (à l'exception des tas de bois avec des morceaux très longs) dépassent des porosités de $\approx 0,9$, en utilisant la méthode de la boîte complète (« complete box », expliquée plus loin). De même, une porosité inférieure à 0,2 voire 0.09 (selon les auteurs), est peu probable, à moins que les pièces de bois présentent une large gamme de tailles d'éléments et des quantités notables de solides non ligneux remplissant les pores (α) (région ombrée, Figure 21) ou des morceaux très longs mesurés avec la méthode de la boîte ajustée (« best-fit box », expliquée plus loin). La littérature sur ce sujet évoque généralement des valeurs de porosité variant de 0.6 à 0.7, en particulier pour le squelette de DLG formant l'ancrage des tas (Livers et al., 2020; Spreitzer et al., 2020b). De telles conclusions amènent à penser qu'il serait possible, voire même nécessaire, de mettre au point un guide visuel liant l'aspect « générique » des tas de bois à différentes porosités, à l'instar de la grille de Braun Blanquet, pour calibrer les estimations visuelles de la porosité sur le terrain et les rendre plus aisées. (Livers et al., 2020 ; Spreitzer et al., 2020b)

Spreitzer et al. (2020b) proposaient une relation exponentielle de facteur 1.22 environ liant rapidement le volume total de tas de DLG avec la porosité. Bien qu'encore expérimental, ce coefficient est applicable à des éléments cylindriques et ayant un ratio d'aspect similaire, ce qui n'est pas le cas dans la réalité, limitant les possibilités d'utilisation. Une autre relation, linéaire cette fois, a également été élaborée, mais elle reste aussi à affiner pour diverses configurations de tailles et de structures pour être applicable et juste en milieu naturel.

Puisque selon Livers et al. (2020) les processus de formation conditionnent la porosité des tas, alors des amas s'étant formés dans les mêmes conditions présentent la même porosité. C'est ce qui est aussi mis en avant au cours de leur étude, où des tas de bois occupant une place particulière dans le chenal présentaient des structurations et donc des porosités similaires. Les tas situés à l'apex des îles étaient généralement désordonnés avec une faible diversité de diamètres. À contrario, les amas côtiers ou en zone de faible dynamisme présentaient une structure ordonnée ainsi qu'une variété de tailles très importante. Cela s'explique probablement par l'environnement qui est de faible énergie et de l'action bidirectionnelle des vagues, qui permettent un agencement en douceur des rondins les uns par rapport aux autres, leur calage ainsi que la complétion par les plus petites fractions qui ne sont pas emportées par le courant.

La question de la structure des tas de bois met en exergue que les variations de volume total et le réarrangement des éléments structurels au sein même de cette matrice d'accumulation modifient la porosité, mais pas le volume des bois en lui-même ; le volume des éléments constitutifs reste constant car le bois est difficilement compressible. Or comme cela a été expliqué précédemment, l'eau applique une contrainte non négligeable sur les tas de bois, d'autant plus forte qu'ils sont imperméables (Manners et al., 2007). La porosité des amas fluviaux est donc susceptible d'être sous-estimée lorsqu'elle est cartographiée pendant les événements de forts débits (Figure 23), en raison des processus de compression observés. Un phénomène de décompactage et d'expansion vers l'amont a lieu lorsque la contrainte appliquée par l'eau diminue, c'est-à-dire lors de la phase descendante de la crue. Le point à partir duquel la diminution de la pression permet un décompactage est appelé « point de relaxation ». Le volume retrouvé post-crue n'est cependant pas le même qu'avant la crue. Les crues ont donc aussi un impact structurel dans le long terme sur les tas de bois. Il est donc préférable de quantifier la porosité des tas de bois à un débit d'étiage ou de base afin d'éviter la sous-estimation de la porosité, en plus des avantages d'accessibilité au tas qu'offrent des faibles débits (Spreitzer et al., 2020b). L'étude de ce phénomène pourrait permettre de créer un coefficient de correction pour des tas de bois qui seraient mesurés en crue, mais il serait nécessaire de savoir combien de crue un tas a déjà supporté, étant donné qu'il ne retrouve

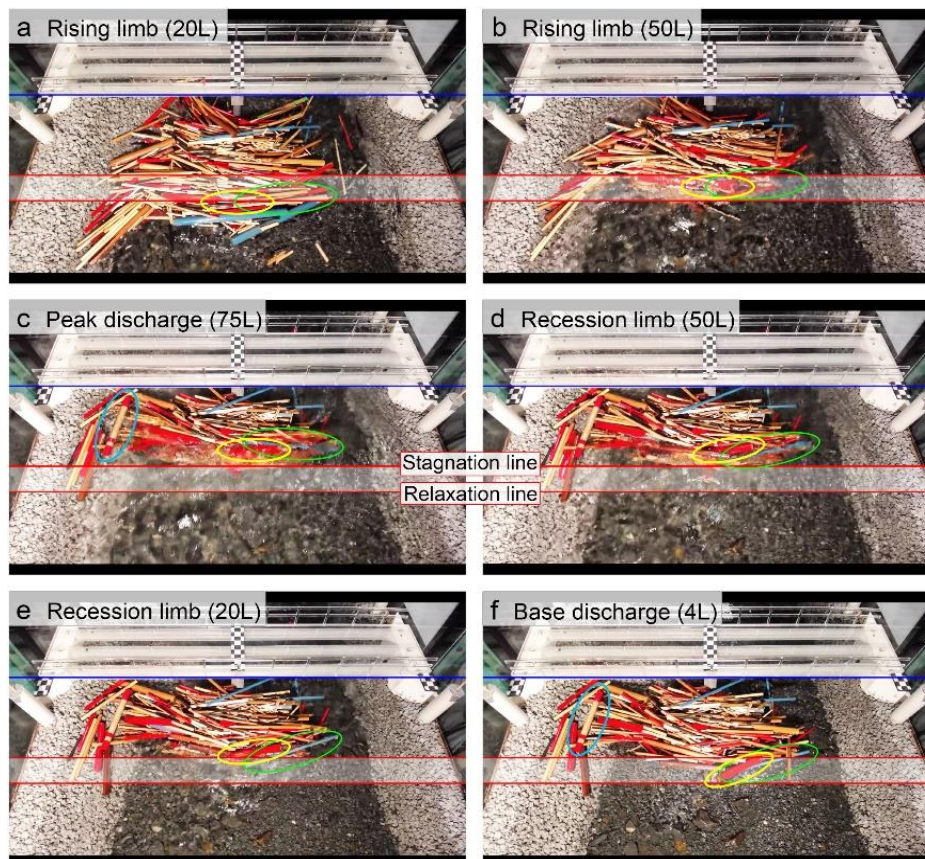


Figure 23 : Evolution structurelle d'un tas de bois face à différents débits.

Les bois, simulés par des cylindres de bois individuels, subissent un hydrogramme variant de 20 L.s-1 (a) à 75 L.s-1 (c), puis diminuant jusqu'au débit de base de 4 L.s-1 (f). Une compaction du tas par la crue jusqu'à la ligne de stagnation est visible, avant d'observer une expansion du tas jusqu'à la ligne de relaxation au débit de base. (Source : Spreitzer et al., 2020b)

pas son état d'origine après le passage. Sa compression à la crue suivante pourrait donc différer.

Divers principes, facteurs et processus sont donc à prendre en compte dans la conception d'un protocole d'analyse des tas de bois fluviaux afin de les décrire fidèlement. Il est également utile de s'intéresser aux méthodes couramment employées afin d'identifier des pratiques plus ou moins applicables selon les conditions.

6.3. Les méthodes de la littérature.

Trois types principaux de méthodes peuvent être distingués. Le premier consiste en une analyse in-situ des tas de bois, généralement de manière non intrusive. Le second consiste en une analyse in-situ des tas de bois avec un démantèlement de ceux-ci afin de les analyser plus précisément selon leur masse, le volume de bois réel, la densité de bois humide ou sec, etc. Enfin, cela peut être la collecte de données numériques sur site, à l'aide d'appareils photo (pour la photogrammétrie) ou bien de dispositifs tels que le LiDAR.

L'analyse in situ non intrusive sera traitée de manière prioritaire et plus exhaustive étant donné les avantages qu'elle offre, notamment :

- La non-perturbation du fonctionnement du milieu ;
- Le peu de matériel nécessaire à sa réalisation sur le terrain et en laboratoire ensuite ;
- Le temps de réalisation qui est court (plus ou moins dépendamment de la rigueur et la précision voulant être appliquées)(Livers et al., 2020) ;
- Une précision moindre que certaines méthodes plus calculatoires mais permettant une plus grande adaptabilité (Livers et al., 2020) (sous-estimation via la méthode des boîtes ajustées (Sanhueza et al. (2019) in Livers et al., 2020) mais surestimation jusqu'à 6 fois plus via celle des boîtes complètes (Livers et al., 2020)) (Figure 24) ;
- La possibilité d'observer des espaces poraux cachés par une fine couche opaque qui ne laisseraient pas passer des faisceaux LiDAR ;
- La possibilité de décomposer un tas de bois en plusieurs sections homogènes plus petites (Livers et al., 2020).

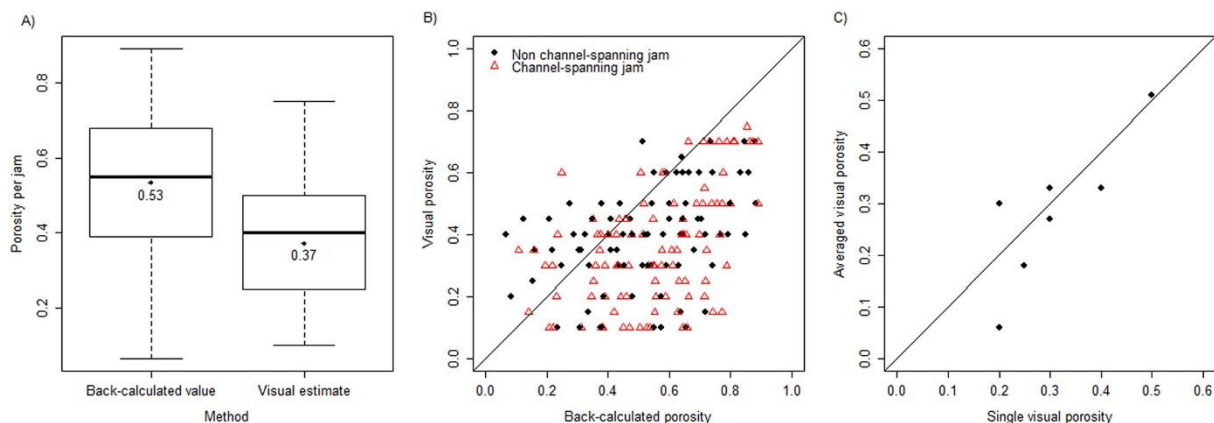


Figure 24: Comparaison de deux méthodes d'évaluation de porosité.

Comparaison pour les jeux de données comportant plusieurs embâcles. Pour les petits embâcles en canal : (A) estimation de la porosité des embâcles par méthode avec l'indication des moyennes et (B) porosité estimée visuellement en fonction de la porosité calculée des embâcles par rapport à la ligne 1:1. Pour les gros embâcles en marge du chenal : (C) porosité visuelle moyenne par rapport à l'estimation visuelle unique de la porosité par rapport à la ligne 1:1. (Source : Livers et al., 2020)

Alors que Baillie et al. (1999) reportent avoir utiliser la méthode des transects (Van Wagner, 1968 in Baillie et al., 1999), bien qu'elle semble rapide et non intrusive, elle n'apparaît pas cohérente avec les nécessités de cette étude. En effet, celle-ci consiste à évaluer le volume des tas de bois présents sur des transects traversant la rivière étudiée, en relevant le diamètre de chaque pièce de bois croisant le transect. Cette méthode s'applique aux troncs orientés de manière aléatoire reposant sur une surface horizontale, devant par la suite être corrigée par un facteur selon des classes de pente du sol. Il en résulte donc une quantification des tas de bois peu pertinente à l'échelle du tas de bois, comme les auteurs l'expliquent, ainsi que des approximations liées aux coefficients de correction qui sont sous forme de valeurs discrètes et non continues. Leur étude aboutit à l'évaluation d'une densité de bois en m³/ha, dont la méthode ne peut pas être appliquée à une échelle inférieure. La porosité n'est pas non plus abordée dans cet article. La méthode semble ainsi peu pertinente pour l'objectif d'évaluation du bois et de la porosité à l'échelle du tas de bois.

Une autre méthode consiste à utiliser les équations présentées en partie 6.2 afin de calculer la porosité des amas de bois à partir du volume total et du volume de bois, qui sont des grandeurs plus facilement mesurables. Cette méthode a notamment été introduite par

Thevenet et al. (1998), lesquels appliquaient deux principes, respectivement pour l'évaluation du volume total et du volume de bois. Ces deux principes sont :

- La quantification du volume du tas de bois : Cette méthode est dite « méthode des boîtes complètes » (complete box). Elle consiste à inclure l'ensemble du tas de bois dans un parallélépipède, passant au plus près des extrémités, et dont les dimensions peuvent être par la suite mesurées, de sorte à avoir un volume défini d'influence du tas de bois. Ce volume est le volume total.
- La quantification du volume de bois : en appliquant à chaque pièce du tas la formule mise au point par De Vries (De Vries, 1974 in Thevenet et al., 1998) :

$$V_{dv} = \frac{\Pi}{8 * L} * (d_1^2 + d_2^2) \quad (6)$$

○ Avec :

- V_{dv} : Volume de bois selon De Vries
- d_1 : Diamètre du tronc à sa première extrémité
- d_2 : Diamètre du tronc à sa seconde extrémité
- L : Longueur du tronc

Il est ainsi possible à partir de l'équation (1 et 2) de déterminer le volume de vide dans le tas de bois puis la porosité à partir de l'équation (1).

Bien que la mesure de chaque pièce de bois composant le tas soit chronophage, cette méthode a l'avantage d'être représentative de l'ensemble des pièces de bois puisqu'elle prend la totalité de ceux-ci en compte. Il n'y a pas l'application d'un diamètre moyen comme cela pouvait être le cas avec la méthode de Baillie et al. (1999). De plus, la reproductibilité des boîtes complètes, bien que semblant très subjective, est en réalité très bonne. En effet, la totalité des pièces devant être prise en compte, au plus près, il n'y a pas de possibilité de la réduire ou l'agrandir, elle suit simplement les bois. Thevenet et al. (1998) et Boivin et al. (2015) (in Livers et al., 2020) montrent que l'application de cette méthode par différents opérateurs donne des résultats relativement similaires, présentant des marges d'erreur statistiques insignifiantes. Toutefois, la force et la faiblesse de cette méthode est qu'elle considère les parties extrémales des tas de bois, ce qui résulte certes en une meilleure évaluation du volume de bois, mais aussi en une surestimation des volumes poraux puisque les tas de bois sont généralement moins denses aux extrémités qu'au cœur. La valeur maximale de porosité de 0.9 citée en partie 6.2 peut être dépassée dans ce cas.

Un moyen d'éviter cette surestimation a été développé grâce à une alternative. Il s'agit de la méthode de la boîte ajustée (best-fit box), qui est relativement similaire à la démarche proposée par Thevenet et al. (1998) à la différence que la boîte déterminant le volume total considéré n'englobe cette fois pas la totalité du tas mais simplement le cœur. La représentativité de la majeure partie du tas de bois est accrue. Les pièces de bois dépassant de cette boîte sont considérées comme entièrement comprises dedans, et sont donc mesurées sur toute leur longueur, même si elles dépassent de la boîte. Cela peut donc générer des volumes de bois supérieurs au « volume total ajusté ». La valeur minimale de porosité de 0.2 citée en partie 6.2 peut être franchie dans ce cas, voire même atteindre 0 si les bois dépassant équivalent au volume de la boîte ajustée. Dernièrement, la détermination des limites de la boîte est cette fois-ci beaucoup plus variable entre les différents opérateurs, ce

qui impacte négativement la reproductibilité de cette méthode (Scott et al., 2019; Dixon, 2016 in Livers et al., 2020).

Il est à noter que les deux méthodes des boîtes ne permettent pas la prise en compte directe des autres éléments pouvant réduire la porosité (α).

Manners et al. avaient évoqué en 2007 une approche novatrice de la mesure de la porosité des tas de bois en se reportant sur la perturbation de l'écoulement que génère un tas de bois. L'étude montre effectivement un lien entre le degré de saturation des tas de bois (ou imperméabilité) et le passage ou la déflexion du courant. Toutefois, cette méthode, bien que non intrusive, requiert du matériel de pointe, tel qu'un appareil ADCP (Courantomètres Acoustiques à Effet Doppler) pour mesurer la perturbation des champs de vitesses, à proximité des tas de bois, mais les paramètres à considérer sont très nombreux, ce qui rend la démarche très incertaine pour le stade de développement où elle en est. En effet, la perturbation des vitesses peut dépendre de : du débit, du niveau d'eau pendant la prospection, de la forme du tas de bois, s'il est recouvert par l'eau ou non, la présence de trous dessous, la largeur du chenal, son angle d'implantation par rapport à l'écoulement, ...

Pour l'évaluation directe de la porosité des tas de bois, Scott et al. proposaient en 2019 une échelle de porosité basée sur des critères visuels. Le but de cette démarche était de calibrer l'œil des opérateurs afin d'estimer directement sur site la porosité des tas de bois, sans passer par une phase calculatoire. Cette échelle de porosité comporte 3 classes, illustrées en Figure 25:

« 1. La porosité estimée est comprise entre 10% et 30% : L'opérateur ne peut pas voir la lumière traverser la majeure partie de l'embâcle. L'embâcle crée un important reflux et l'écoulement à travers l'embâcle est fortement obstrué.

2. La porosité estimée est de 40% à 60% : L'opérateur peut voir la lumière passer à travers l'embâcle, mais ne peut pas voir à travers l'embâcle en de nombreux endroits. L'écoulement est obstrué, mais des quantités importantes d'eau peuvent encore passer à travers l'embâcle. Changement notable de l'élévation de la surface de l'eau entre l'amont et l'aval de l'embâcle.

3. La porosité est estimée entre 70 et 90 % : L'opérateur peut voir de la lumière à travers la plupart des parties de l'embâcle. L'eau rencontre une résistance mais peut s'écouler facilement à travers l'embâcle. Vides importants dans l'embâcle. » (Scott et al., 2019)

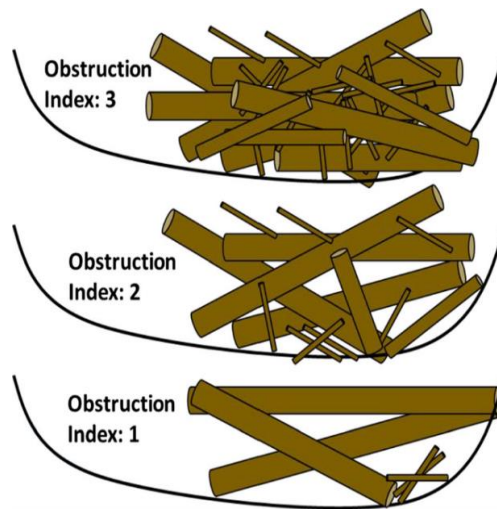


Figure 25: Illustration de l'échelle de porosité telle que proposée par Scott et al (2019).
(Source : Scott et al 2019)

La méthode proposée par Scott et al. (2019) est donc uniquement visuelle, réduisant l'erreur liée à l'approximation que les composants sont des cylindres. Au-delà de la praticité et de la rapidité de la méthode se pose le problème de l'homogénéité et de la véracité des résultats. En effet :

- La reproductibilité est faible à cause de la subjectivité de la technique ;
- L'œil humain est inconsciemment attiré par les parties les plus compactes du tas de bois, ce qui sous-estime la porosité, au détriment des zones au bord, plus poreuses. Ce problème peut être réduit en estimant la porosité du tas de bois en différents points puis en appliquant des moyennes pondérées ;
- Il n'y a pas de distinction de faite entre la porosité offerte par la structure du tas de bois et la porosité disponible, qui est généralement réduite par d'autres composés (DLF, matière organique, éléments solides divers (déchets, sédiments)) ;
- Il est difficile d'évaluer les parties non accessibles / non visibles ;
- Il est difficile d'évaluer à vue des parties immergées de tas de bois ou sur de grands volumes ou surfaces.

La méthode seule semble donc moins fiable que d'autres présentées dans ce document, et ne répondra pas aux objectifs de l'étude à savoir la quantification de la porosité des tas de bois et de l'espace disponible.

La dernière méthode consiste à employer les technologies de photogrammétrie 2.5D et 3D. La photogrammétrie consiste à prendre une série de photos très proches les unes des autres (le recouvrement des photos doit être d'au moins 60%) afin de recréer un modèle numérique 3D à l'échelle et très précis. La 2.5D consiste à projeter l'ombre modèle 3D du tas de bois sur la « base », ce qui donne une surface, pour laquelle, en chaque point la hauteur de la base au sommet du dernier morceau de bois rencontré est calculée (Figure 26).

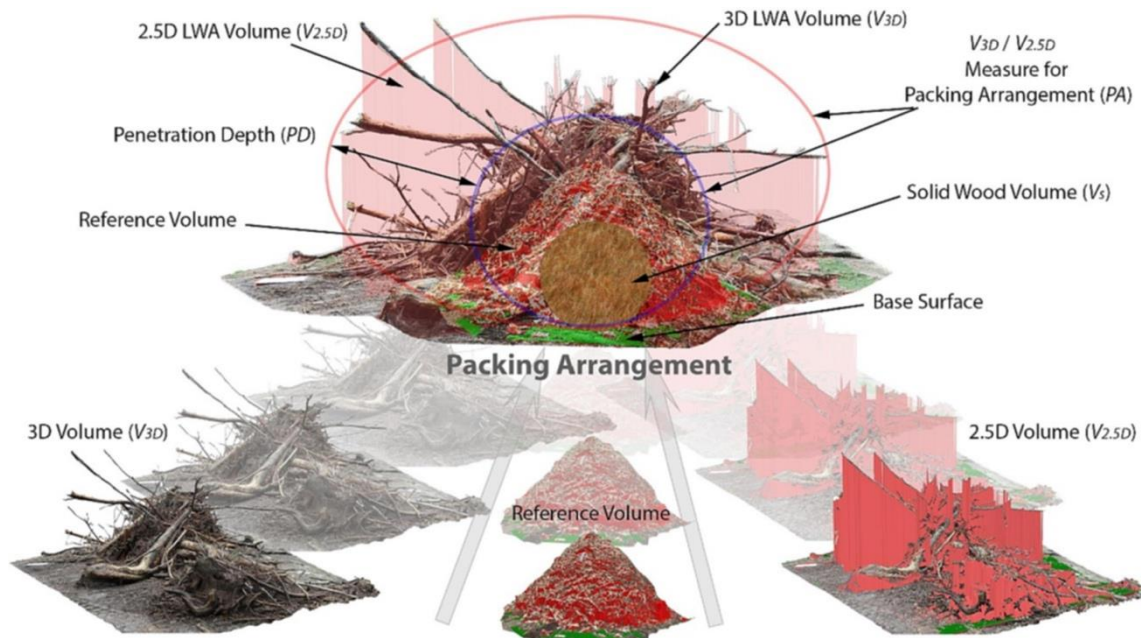


Figure 26: Illustration des modèles 2.5D et 3D utilisés pour l'approche volumétrique de quantification de la porosité ainsi que de volume de référence en broyat.

(Source : Spreitzer et al., 2022)

Le modèle 3D permet quant à lui de quantifier le volume de bois seul. Dans le cas d'une démarche intrusive, le bois peut être récupéré et broyé pour obtenir le volume de bois du tas avec précision. Par la suite, le calcul de la porosité repose sur le même principe qu'évoqué en 6.2 avec l'équation (1 et 2), où la porosité est obtenue par la différence du volume total ($V_{2.5D}$) moins le volume de bois (V_{3D} ou $V_{broyé}$) puis en le divisant par le volume total ($V_{2.5D}$). Le principe est similaire à celui des boîtes de Livers et al. (2020) ou Thevenet et al. (1998), en considérant qu'une boîte ajustée (à la résolution des données du modèle) est appliquée à chaque composant du tas de bois. Les portions extrêmes ne sont donc pas sur-représentées et la porosité n'est pas sous ou surestimée, ce qui en fait une méthode relativement précise.

Dans le cas d'une modélisation sans broyage du bois, il n'est pas possible d'évaluer précisément le volume de bois car le cœur du tas de bois est considéré comme un ensemble, un volume unique. Cela est dû à l'absence de possibilité de pénétration des faisceaux lasers dans le tas. Les espaces poreux réellement présents à l'intérieur sont ainsi remplacés dans le calcul par un volume de bois, ce qui a tendance à sous-estimer la porosité. Dans ce cas il est plutôt question de la « porosité accessible », c'est-à-dire la porosité visible de l'extérieur du tas.

Ces méthodes utilisant la photogrammétrie sont donc précises mais nécessitent beaucoup de matériel performant, à la fois sur le terrain (caméra, drones hautes résolutions) et au laboratoire pour l'analyse des données (les fichiers photogrammétriques sont comme les modèles 3D, très lourds car contenant beaucoup d'informations). Enfin, bien que le temps

de collecte des données soit restreint, puisqu'il « suffit » de prendre des photos du tas de bois, le temps de traitement des données, lui, est conséquent.

7. Proposition d'une méthode d'évaluation de la porosité et de l'habitabilité des tas de bois.

7.1. Principe.

La présente méthode vise à évaluer la porosité des tas de bois dans le but de déterminer l'habitabilité pour la biocénose aquatique. Pour cela, l'équation (5), qui est la plus complète et qui offre une relation directe entre toutes les variables pouvant être mesurées, sera utilisée. Pour rappel :

$$n = \frac{\emptyset_{tb}}{V_{tot}} \quad (1)$$

$$V_{tot} - V_b = \emptyset_{tb} \quad (1 \text{ et } 2)$$

$$\alpha = \frac{V_{sa}}{V_{tot}} \quad (3)$$

$$V_b = V_{tot}(1 - n)(1 - \alpha) \quad (4)$$

$$\emptyset_{tb} = V_{tot} - \frac{V_b * V_{tot}}{V_{tot} - V_{sa}} \quad (5)$$

Avec :

- V_b : Le volume de bois
- V_{tot} : Le volume total du tas de bois
- \emptyset_{tb} : Le volume de vide dans le tas de bois
- V_{sa} : Le volume de composants solides non ligneux
- α : La proportion d'éléments solides non ligneux
- n : La porosité

L'acquisition des données se fera donc sur 3 compartiments :

- Le tas de bois lui-même
- Le volume de bois
- Les éléments saturants

7.2. Matériel.

Pour la réalisation des mesures et le traitement des données, sont nécessaires :

- Une fiche de terrain telle que fournie en annexe A ;
- Un crayon ;
- Le fichier de calcul Excel associé à la fiche de terrain ;

- Un appareil photo, étanche de préférence ;
- Un gabarit de tailles définies ;
- Un mètre ruban ;
- Une mire télescopique rigide ;
- Des cuissardes ou waders ;
- Un ordinateur prenant en charge Excel ;
- Un set de piquets facilement visibles et un marteau.

7.3. Méthode.

7.3.1. Préparation du site.

La méthode de mesure se voulant non-intrusive, des piquets vont être implantés autour du tas de bois devant être caractérisé. L'opérateur devra s'assurer de pouvoir accéder en toute part au tas de bois sans marcher dessus. Dans le cas contraire, l'opérateur devra prendre les dispositions nécessaires pour pouvoir y accéder en gardant le tas de bois intact. Les emplacements des piquets devront diviser le tas de bois en sections que l'opérateur estimera homogènes en termes de comblement, par quelque élément que ce soit (sédiments, macrophytes, matière organique, bois, ...).

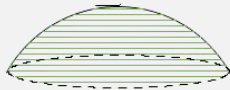

La création de sections d'études améliore la précision des données collectées (Livers et al., 2020).

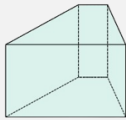

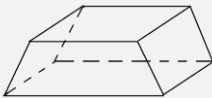

Chaque section ainsi délimitée se verra attribuer un identifiant unique qui sera reporté sur la feuille de terrain, dans la case prévue à cet effet. Des photos du tas de bois montrant toutes les faces et tous les piquets devront également être prises.

7.3.2. Calcul du volume total.

Pour chaque section, l'opérateur devra déterminer à quelle volume type parmi les 6 la section ressemble le plus. Il devra faire en sorte d'inclure la totalité de la section dans le volume type sélectionné. Pour chaque volume type des mesures particulières seront à prendre afin d'évaluer la taille du secteur et donc pouvoir en calculer le volume. Ce procédé suit la logique des « complete box » développées par Thevenet et al. (1998) mais en diversifiant les volumes considérés pour limiter la surestimation en collant au plus près à la forme du tas de bois. Il s'agit d'une version intermédiaire entre la « complete box » et la « best-fit box ». Les mesures nécessaires sont répertoriées dans le tableau suivant :

Tableau 4 : Volumes types et paramètres à relever sur le terrain

Volume type	Dimensions	Volume type	Dimensions
Calotte sphérique 	Diamètre au sol Hauteur au centre	Cylindre 	Rayon Longueur

Parallélépipède rectangle Prisme à base carrée/rectangulaire 	Longueur Largeur base 1 (large) Largeur base 2 (fine) Hauteur	Section de cylindre 	Largeur de la base (la corde) Hauteur au milieu de la base Longueur
Prisme à base trapézoïdale 	Hauteur Longueur Largeur base 1 (large) Largeur base 2 (fine)	Cône 	Diamètre 1 (large) Diamètre 2 (fin) Longueur

Une section homogène peut également présenter plusieurs volumes types. Dans ce cas, la fiche terrain permet de noter les paramètres nécessaires aux calculs de volume pour chacun des volumes types nécessités. Une case vide permet également de faire un croquis des différents volumes types sélectionnés et de leur agencement afin de représenter la section sous forme de croquis en guise de rappel si nécessaire pendant le traitement des données.

Le volume de section pris en compte doit être projeté jusqu'au sol. Par exemple, si une branche maintient un tas au-dessus du sol, alors l'espace à prendre en compte s'étend du dessus du tas en suspension jusqu'à la surface du sol sous le tas.

Le volume total du tas de bois sera égal à la somme des volumes de chaque section. Il est donc important de tenir compte des piquets placés au début lors du calcul du volume des sections afin de ne pas compter plusieurs fois une partie du tas.

7.3.3. Calcul du volume de bois.

Pour chaque section, le volume de bois de DLG va être quantifié selon la formule de De Vries (De Vries, 1974 in Thevenet et al., 1998). Les DLG sont les éléments dont le diamètre est supérieur à 10 cm. Pour rappel :

$$V_{dv} = \frac{\Pi}{8 * L} * (d_1^2 + d_2^2) \quad (6)$$

○ Avec :

- V_{dv} : Volume de bois selon De Vries
- d_1 : Diamètre du tronc à sa première extrémité
- d_2 : Diamètre du tronc à sa seconde extrémité
- L : Longueur du tronc

Il est ainsi nécessaire de mesurer tous les DLG contenus dans les limites du ou des volumes types de la section. Pour les éléments dépassant de la section ou du volume type,

seule la longueur comprise à l'intérieur doit être mesurée. Il en va de même pour les diamètres ; ils sont mesurés à la limite de la section pour les éléments dépassant de celle-ci.

Pour la classe des « buissons » telle que l'a catégorisée Thevenet et al. (1998), soit les éléments présentant 3 à 10 branches majeures inférieures à 10 cm de diamètre, il est nécessaire de choisir la moitié du nombre de branches, représentatives de l'autre moitié, et de les mesurer dans le but de leur appliquer également la formule de De Vries, qui devra être multipliée par deux pour obtenir le volume total du buisson. La base des buissons, étant généralement courte, elle pourra être assimilée à un cylindre car la variation de diamètre est généralement faible. Il faudra donc seulement mesurer le diamètre et la longueur de la base du buisson.

En ce qui concerne les DLM, un dénombrement rapide du nombre d'éléments dans la section devra être effectué. Ce nombre de DLM devra être reporté dans la case prévue à cet effet de la section DLM sur la fiche, et comparé avec le tableau 5 :

Tableau 5 : Taille d'échantillon en fonction de la taille de la population, de la précision et de la marge d'erreur souhaitées.

Niveau de confiance	Marge d'erreur	Nombre de Débris Ligneux Moyens (DLM)						
		10	15	30	50	100	150	200
99%	2%	10	15	30	50	98	145	191
	5%	10	15	29	47	87	123	154
	10%	10	14	26	39	63	79	91
95%	2%	10	15	30	49	96	142	185
	5%	10	15	28	45	80	108	132
	10%	10	13	23	33	49	59	65
90%	2%	10	15	30	49	95	138	179
	5%	10	15	27	43	73	97	115
	10%	9	13	21	29	41	47	51

Source : https://www.economie.gouv.fr/files/fiche_pratique_constitution_echantillonv1.pdf

Le nombre de Débris Ligneux Moyens présents à retenir est le plus proche supérieur dans le tableau. L'opérateur choisi ensuite le niveau de confiance et la marge d'erreur qu'il souhaite. Après détermination du nombre de DLM nécessaires à mesurer en utilisant le tableau ci-dessus, les éléments doivent être déterminés au hasard parmi les bois de la section puis mesurés. Leurs mesures doivent être reportées dans les sections appropriées pour les DLM et comprendre les mêmes paramètres que pour les DLG ou les buissons, puisque le volume sera calculé à l'aide de la formule de De Vries, c'est-à-dire le diamètre du DLM à sa première et sa seconde extrémité et sa longueur dans la section toujours.

Le nombre de DLM considéré par section n'excèdera pas les 200 car il est estimé qu'au-delà, un trop grand nombre d'éléments devra être compté. Si le nombre estimé dépasse 200 alors l'opérateur n'en tiendra pas compte et suivra la démarche pour une population de 200.

Comme il est difficile de mesurer les DLF ou de les distinguer des autres débris fins qui ne sont pas ligneux, ceux-ci seront quantifiés dans la dernière partie, en créant un ensemble des éléments fins plutôt qu'en les comptabilisant avec les autres bois.

Le volume de bois dans le tas de bois est donc égal à la somme des volumes de bois de chaque section, elle-même la somme des volumes de bois des trois types.

7.3.4. Calcul du volume d'éléments saturants.

Dans cette partie, l'opérateur appliquera seulement des estimations visuelles pour déterminer pour chaque section la saturation en éléments non ligneux, soit généralement les sédiments, les DLF ou les macrophytes et déchets. Cette estimation visuelle sera basée sur l'échelle proposée par Scott et al. (2019), à laquelle deux classes seront ajoutées :

- (A) La porosité estimée est de 0 % : L'opérateur ne peut voir nulle part la lumière traverser l'embâcle. La saturation de l'embâcle crée un important reflux et l'écoulement à travers l'embâcle est fortement restreint voire inexistant.
- (B) La porosité estimée est comprise entre 10% et 30% : L'opérateur ne peut pas voir la lumière traverser la majeure partie de l'embâcle. La saturation de l'embâcle crée un fort reflux et l'écoulement à travers l'embâcle est très restreint.
- (C) La porosité estimée est de 40% à 60% : L'opérateur peut voir la lumière passer à travers l'embâcle, mais ne peut pas voir à travers l'embâcle en de nombreux endroits. L'écoulement est contraint, mais des quantités importantes d'eau peuvent encore passer à travers l'embâcle. Changement notable de l'élévation de la surface de l'eau entre l'amont et l'aval de l'embâcle.
- (D) La porosité est estimée entre 70 et 90 % : L'opérateur peut voir de la lumière à travers la plupart des parties de l'embâcle. L'eau rencontre une résistance mais peut s'écouler facilement à travers l'embâcle. Vides importants dans l'embâcle.
- (E) La porosité est estimée est de 90 à 100 % : L'opérateur n'observe pas ou sur moins de 10% du volume de la section de dépôt de sédiments, de DLF, de macrophytes et déchets.

Toutefois l'opérateur ne devra pas considérer les bois dans l'observation mais devra être bien vigilant à ne considérer que les éléments non ligneux, donc les sédiments, les DLF ou les macrophytes et déchets pour ne pas fausser les calculs. Les valeurs seront à noter sur la fiche de terrain dans la partie adéquate (éléments saturants).

7.3.5. Estimation de l'habitabilité piscicole.

L'estimation de l'habitabilité piscicole sera mesurée directement sur le site, après avoir défini des espèces cibles et leur gabarit moyen. Ces espèces doivent définir 3 classes de taille, tel que montré dans le tableau 6 :

Tableau 6 : Espèces cibles et gabarit de taille.

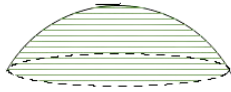

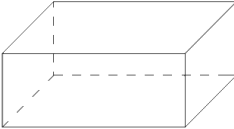

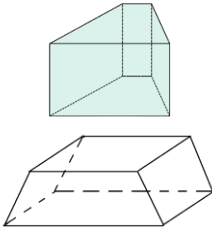

Classe de taille porale	Petite	Moyenne	Grande
Valeur de la classe	1	2	3
Taille moyenne adulte d'une espèce cible (cm)	7	40	150

Exemple d'espèces	Vairon commun (Phoxinus phoxinus)	Brème commune (Abramis brama)	Silure glane (Silurus glanis)
-------------------	--------------------------------------	----------------------------------	-------------------------------

L'opérateur devra se procurer des gabarits de taille correspondant aux tailles moyennes spécifiées afin de vérifier, pour chaque section, quel gabarit est le plus à même d'utiliser les pores du tas de bois. Cette information sera à noter sur la feuille de terrain dans la case « niveau d'habitabilité piscicole ».

7.4. Traitement des résultats.

Le traitement des résultats débutera par la saisie des valeurs mesurées sur le terrain sur la feuille de calcul Excel. Les calculs de volume pour chaque section se feront automatiquement selon les formules précisées.

Volume type	Volume	Volume type	Volume
Calotte sphérique 	$V = \frac{d^2}{8h} + \frac{h}{2}$	Cylindre 	$V = \pi * \frac{d^2}{4} * L$
Parallélépipède rectangle 	Longueur Largeur base 1 Largeur base 2 Hauteur	Section de cylindre 	$r = \frac{b^2}{8h} + \frac{h}{2}$ Puis $V = \frac{\pi}{3} * h^2 * (3r - h)$
Prisme à base trapézoïdale 	$V = \frac{1}{2} * (L_{b1} + L_{b2}) * h * L$	Cône 	$V_{dv} = \frac{\Pi}{8 * L} * (d_1^2 + d_2^2)$

Les calculs seront individualisés pour chaque section. Le calcul des volumes de bois se feront également automatiquement. Ils consisteront en l'application de la formule de De Vries à chaque DLG, buisson et DLM saisis à partir des données leur étant associées. Ces volumes ainsi calculés par unité seront sommés à l'échelle de la section.

$$\sum_{sec=1}^n \sum_{DLG, Buisson, DLM=1}^n \frac{\pi}{8L} * (d_1^2 + d_2^2) \quad (7)$$

Pour rappel : d_1 et d_2 sont les diamètres du tronc, L sa longueur.

Le volume de tas de bois de la section (V_{bs}) sera déduit du volume de la section ($V_{section}$)

$$TPLM = \frac{\emptyset_{tb}}{\sum L_b^n}$$

$$V_{sas} = (V_{section} - V_{bs}) * \alpha \quad (8)$$

pour obtenir l'espace poral idéal. À celui-ci sera appliqué le facteur de saturation α déterminé à partir de l'échelle de Scott et al. (2019) modifiée. Le volume saturant (V_{sa}) sera ainsi connu.

À l'aide de ces données et de l'équation (5), il sera donc possible de calculer le volume poral à l'échelle de la section. Si l'on adapte l'équation générale (5) à la section, la formule suivante est obtenue :

Avec :

$$\emptyset_{section} = V_{section} - \frac{V_{bs} * V_{section}}{V_{section} - V_{sas}} \quad (9)$$

- V_{bs} : Le volume de bois dans la section
- $V_{section}$: Le volume total de la section
- $\emptyset_{section}$: Le volume de vide dans la section
- V_{sas} : Le volume de composants saturants dans la section

Les volumes poraux et les volumes des sections seront sommés, indépendamment. Les données passeront ainsi de la subdivision du tas de bois à l'échelle du tas, permettant ainsi de caractériser la porosité du tas de bois en divisant le volume poral total par le volume total du tas de bois :

$$n = \frac{\sum \emptyset_{section}^n}{\sum V_{section}^n} \quad (10)$$

$$(11)$$

La taille moyenne des espaces poraux sera estimée en divisant l'espace poral du tas de bois (\emptyset_{tb}) par la longueur totale des pièces de bois du tas (L_b). La taille porale linéaire moyenne (TPLM) s'exprimera donc en m^3/m . Elle exprimera ainsi l'espace disponible en moyenne le long d'un élément de bois du tas de bois. Cette variable est pertinente car elle rend compte du phénomène de réduction de la porosité avec l'ajout de pièces de bois, donc qui font augmenter la longueur totale des pièces présentes dans le tas de bois.

Enfin, la moyenne des classes d'habitabilité piscicole sera réalisée à partir des valeurs de classes de chaque section (Val_{classe}).

8. Discussions.

$$Habitabilite = \frac{\sum Val_{classe}^n}{N} \quad (12)$$

La méthode présentée ci-dessus vise à proposer un protocole applicable, réaliste avec un minimum de matériel et en ne causant pas de dommage au tas de bois. Toutefois cette méthode présente de nombreuses limites.

La première est la considération des troncs comme étant des volumes lisses et réguliers. En effet, cela donne une approximation du volume de bois, mais de nombreuses ramifications ou reliefs du bois ne sont pas comptés, alors qu'ils ont un rôle important dans la création de porosité. La considération des DLG dans les sections réduit ce biais car si la section est petite, alors le tronc ne varie que peu sur la faible longueur, bien qu'il y ait des exceptions, comme les troncs présentant un départ de branche seulement ; il est trop court pour être quantifié en plus du tronc principal, mais il participe aussi à la structuration du tas de bois et au comblement du tas.

La deuxième limite de cette méthode est qu'elle ne prend pas en compte l'agencement ni la diversité de taille des composants de tas de bois. Livers et al. (2020) et Spreitzer et al. (2020b) avaient pourtant démontré le lien important existant entre la structure organisationnelle et la diversité de tailles de composants. Les possibilités d'utilisation de graphiques promettaient une application plus aisée mais les liens avec l'applicabilité sont encore trop complexes pour que ces résultats puissent être utilisés dans des protocoles.

L'utilisation d'une nouvelle variante des « complete box » ou des « best-fit box » permet de s'affranchir du problème de surestimation des espaces poraux aux extrémités, mais cette méthode renforce aussi la subjectivité de l'application. En plus des boîtes que l'opérateur doit lui-même définir, il doit placer les piquets repères au début de l'application pour définir les sections. Les possibilités de reproductibilité sont faibles.

Sur le même point que le précédent, l'estimation de la fraction fine saturant les tas de bois est issue d'une estimation visuelle. Bien qu'il existe des supports pour calibrer l'œil, il est difficile de rester objectif, mais également il est difficile de ne pas tenir compte des bois. Livers et al. (2020) annonçaient d'ailleurs à ce point que l'œil est naturellement attiré par les zones les plus compactes, ce qui avait tendance à sous-estimer la porosité. La division en sections homogènes permet ainsi d'éviter ces biais.

Enfin, pour obtenir une méthode précise, il est parfois nécessaire d'effectuer de nombreuses mesures. Or cela est très chronophage et multiplie aussi les erreurs de mesure. De plus amples études pourraient viser à développer des outils, se basant par exemple sur des lois statistiques, afin de n'avoir à prélever qu'un certain échantillon plutôt que toute une partie.

9. Conclusion.

Les rivières sont généralement caractérisées par leur débit liquide et sédimentaire. Toutefois, un autre composant des hydrosystèmes moins souvent abordé, le bois, se révèle être un élément non négligeable dans le fonctionnement des cours d'eau. Montgomery et al. (2003) déclaraient même que « dans certaines rivières, des changements dans les flux de bois [...] peuvent résulter en des effets aussi importants que ceux provenant de changements dans l'approvisionnement en sédiments ou du régime hydrologique » (Montgomery et al., 2003).

Les actions du bois se traduisent notamment par la formation de tas de bois, lesquels vont ensuite façonner les cours d'eau, diversifier les peuplements et complexifier les habitats. Cela se produit de manière limitée dans le temps, car les tas de bois peuvent très vite être remobilisés sous différentes formes. Lorsque ces amas sont en place, les processus engendrés sont, pour la plupart, bien qu'antagonistes, simultanés et très proches spatialement. Rares sont les éléments de l'environnement qui permettent d'accomplir une telle diversité de

tâches. Cela explique d'ailleurs le fort attrait du monde vivant pour ce type d'habitat, puisqu'il permet d'optimiser les dépenses énergétiques de la faune, en créant des zones de repos à proximité des zones d'alimentation. Les tas de bois améliorent donc de manière générale la qualité de l'habitat qu'est la rivière.

Quantifier la qualité de cet habitat est un réel défi, qui vise à pouvoir justifier par la suite d'une amélioration ou non d'un habitat. Dans le cadre de cette étude, la qualité d'habitat a porté sur la quantification et la caractérisation de l'espace pouvant être utilisé par la biocénose aquatique, également appelé porosité, à des fins d'abris en particulier. La détermination de paramètres concrets pouvant être mesurés sur le terrain a mis en avant que ce qui est généralement pris pour un simple tas de débris, est en fait une structure complexe, qui met au défi les auteurs pour déterminer le plus précisément possible l'architecture de son cœur, encore souvent inaccessible sans détruire cette structure. Le développement de méthodes fiables et non intrusives est complexe. Cette complexité peut être expliquée sous forme de triptyque :

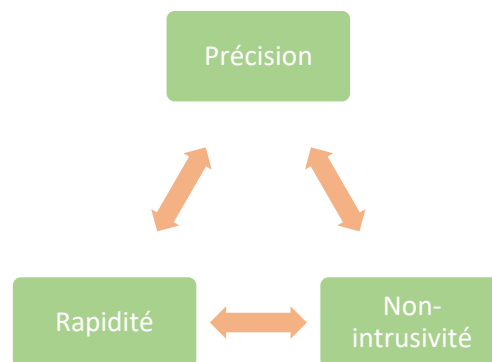



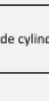
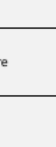



Figure 27 : Triptyque vers un compromis pour l'efficacité d'une méthode

Une méthode de collecte de données rapide et non intrusive ne sera pas précise (estimation visuelle), une méthode rapide et précise nécessitera des moyens drastiques et destructeurs (modèle numérique associé à un broyage ou une pesée), tandis qu'une méthode non intrusive et précise sera chronophage car très exhaustive (caractérisation multiparamétrique de chaque pièce de bois). Il est donc important d'équilibrer les outils d'application et de se baser sur les expériences éprouvées par les pairs pour faire progresser les méthodes de quantification de la porosité dans les tas de bois tout en gardant des protocoles réalistes, mais surtout fidèles et robustes.

La capacité structurante et à la fois mobile (dans l'espace et le temps) des tas de bois en rivière rend possible une diversification continue des cours d'eau, et une réponse à de nombreux besoins biologiques. C'est pourquoi les tas de bois doivent être perçus comme des **facteur de diversité et catalyseur de fonctionnalités** des hydrosystèmes.

10. Annexes

Annexe A : Feuilles de terrain

Numéro du tas de bois		Nom de l'opérateur		
Localisation	X:	Y:		
Date et Heure				
Volumes types et paramètres à relever sur le terrain				
Volume type	Illustration	Dimensions		
Calotte sphérique		Diamètre au sol		
		Hauteur au centre		
Parallélépipède rectangle Prisme à base carrée/rectangulaire		Longueur		
		Largeur		
		Hauteur base 1		
		Hauteur base 2		
Prisme à base trapézoïdale		Hauteur		
		Longueur		
		Largeur base 1		
		Largeur base 2		
Cylindre		Rayon		
		Longueur		
Section de cylindre		Largeur de la base (la corde)		
		Hauteur au milieu de la base		
Cône		Longueur		
		Diamètre 1		
		Diamètre 2		
Schéma à partir des volumes types, dessins, croquis et photographies du tas de bois évalué				
Paramètres permettant de déterminer le volume de bois				
Pour les Débris Ligneux Grossiers		Notes complémentaires		
Diamètre du tronc à la première extrémité du tas de bois				
Diamètre du tronc à la seconde extrémité du tas de bois				
Longueur du tronc du tas de bois				
Pour les Débris Ligneux Moyens				
Nombre de DLM estimé				
Diamètre du tronc à la première extrémité du tas de bois				
Diamètre du tronc à la seconde extrémité du tas de bois				
Longueur du tronc du tas de bois				
Pour les buissons				
Nombre de branches estimé par buisson				
Diamètre du tronc à la première extrémité du tas de bois				
Diamètre du tronc à la seconde extrémité du tas de bois				
Longueur du tronc du tas de bois				
Paramètres permettant de déterminer le volume d'éléments saturants				
Observations		Classe de porosité	Notes complémentaires	
La lumière ne traverse pas l'embâcle, important reflux et écoulement de l'eau à travers l'embâcle fortement obstrué voire inexistant.		0 %		
La lumière ne traverse pas une majeure partie l'embâcle, fort reflux et écoulement de l'eau à travers l'embâcle très restreint		10 à 30 %		
La lumière passe à travers l'embâcle en de nombreux endroits, l'écoulement est contraint et un changement notable de l'élévation de la surface de l'eau entre l'amont et l'aval de l'embâcle est observable		40 à 60 %		
La lumière passe à travers l'embâcle en de nombreux endroits, l'écoulement s'effectue facilement et des vides importants sont présents dans l'embâcle		70 à 90 %		
Absence ou dépôt sur moins de 10% du volume de la section de sédiments, de DLF, de macrophytes et déchets.		90 à 100 %		
Estimation de l'habitabilité piscicole				
Classe de taille porale	Petite	Moyenne	Grande	Notes complémentaires
Valeur de la classe	1	2	3	
Taille moyenne adulte d'une espèce cible (cm)	7	40	150	
Exemple d'espèces	Vairon commun (Phoxinus phoxinus)	Brème commune (Abramis brama)	Silure glane (Silurus glanis)	

11. Bibliographie.

- Abbe, T. B., & Montgomery, D. R. (2003). Patterns and processes of wood debris accumulation in the Queets river basin, Washington. *Geomorphology*, 51(1), 81-107. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00326-4](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00326-4)
- Allan, J. D., Castillo, M. M., & Capps, K. A. (2021). Detrital Energy and the Decomposition of Organic Matter. In J. D. Allan, M. M. Castillo, & K. A. Capps, *Stream Ecology* (p. 177-224). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-61286-3_7
- Baillie, B. R., Cummins, T. L., & Kimberley, M. O. (1999). Measuring woody debris in the small streams of New Zealand's pine plantations. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 33(1), 87-97. <https://doi.org/10.1080/00288330.1999.9516859>
- Beschta R.L. (1979). *Debris removal and its effects on sedimentation in an Oregon coast range stream*. 53.
- Bilby, R. E., & Likens, G. E. (1980). Importance of Organic Debris Dams in the Structure and Function of Stream Ecosystems. *Ecology*, 61(5), 1107-1113. <https://doi.org/10.2307/1936830>
- Boivin, M., Buffin-Bélanger, T., Maltais, M., Massé, S., Briand, Y., & Biron, P. (2019). *Guide d'analyse de la dynamique du bois en rivière. Guide scientifique présenté au Conseil de l'eau du Nord de la Gaspésie et à la Fondation de la Faune du Québec*.
- Buffington, J. M., Lisle, T. E., Woodsmith, R. D., & Hilton, S. (2002). Controls on the size and occurrence of pools in coarse-grained forest rivers. *River Research and Applications*, 18(6), 507-531. <https://doi.org/10.1002/rra.693>
- Bull, W. B. (1979). Threshold of critical power in streams. *Geological Society of America Bulletin*, 90(5), 453. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1979\)90<453:TOCPIS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1979)90<453:TOCPIS>2.0.CO;2)
- Cashman, M. J. (2014). *The effect of large wood on river physical habitat and nutritional dynamics*. Queen Mary, University of London.
- Connell, J. H. (1978). Diversity in Tropical Rain Forests and Coral Reefs : High diversity of trees and corals is maintained only in a nonequilibrium state. *Science*, 199(4335), 1302-1310. <https://doi.org/10.1126/science.199.4335.1302>
- Copp, G. H., Robert Britton, J., Cucherousset, J., García-Berthou, E., Kirk, R., Peeler, E., & Stakénas, S. (2009). Voracious invader or benign feline? A review of the environmental biology of European catfish *Silurus glanis* in its native and introduced ranges. *Fish and Fisheries*, 10(3), 252-282. <https://doi.org/10.1111/j.1467-2979.2008.00321.x>
- Cremer, T., Berendt, F., de Miguel-Díez, F., & Blasko, L. (2020). Accuracy of Photo-Optical Measurement of Wood Piles. In *Environmental Sciences Proceedings* (Vol. 3). <https://doi.org/10.3390/IECF2020-08192>
- de Miguel-Díez, F., Esteban, E., & Cremer, T. (2021). *3D-simulation of wood stacks to analyze the influence of log properties on stack volume*. 3.

- Douglas Shields, F., & Smith, R. H. (1992). Effects of large woody debris removal on physical characteristics of a sand-bed river. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 2(2), 145-163. <https://doi.org/10.1002/aqc.3270020203>
- Ebersole, J. L., Liss, W. J., & Frissell, C. A. (2003). Thermal heterogeneity, stream channel morphology, and salmonid abundance in northeastern Oregon streams. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 60(10), 1266-1280. <https://doi.org/10.1139/f03-107>
- Fausch, K. D., & Northcote, T. G. (1992). Large Woody Debris and Salmonid Habitat in a Small Coastal British Columbia Stream. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 49(4), 682-693. <https://doi.org/10.1139/f92-077>
- Faustini, J. M., & Jones, J. A. (2003). Influence of large woody debris on channel morphology and dynamics in steep, boulder-rich mountain streams, western Cascades, Oregon. *Geomorphology*, 51(1-3), 187-205. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00336-7](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00336-7)
- Fiches espèces Shna-Ofab.* (s. d.). Consulté 12 septembre 2023, à l'adresse https://www.shna-ofab.fr/fr/fiches-especes/silure-glane-silurus-glanis_45_T67585.html
- Fonctions écologiques.* (s. d.). Eaufrance. Consulté 15 avril 2023, à l'adresse <https://www.eaufrance.fr/glossaire/fonctions-ecologiques>
- Francis, R. A., Tibaldeschi, P., & McDougall, L. (2008). Fluvially-deposited large wood and riparian plant diversity. *Wetlands Ecology and Management*, 16(5), 371-382. <https://doi.org/10.1007/s11273-007-9074-2>
- Gurnell, A. (2015). *Large Wood and River Morphodynamics*. 131-134. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09054-2_25
- Gurnell, A. M., Piégay, H., Swanson, F. J., & Gregory, S. V. (2002). Large wood and fluvial processes. *Freshwater Biology*, 47(4), 601-619. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.2002.00916.x>
- habitabilité—Dico en ligne Le Robert.* (s. d.). Consulté 16 avril 2023, à l'adresse <https://dictionnaire.lerobert.com/definition/habitabilite>
- Hax, C. L., & Golladay, S. W. (1993). Macroinvertebrate colonization and biofilm development on leaves and wood in a boreal river. *Freshwater Biology*, 29(1), 79-87. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.1993.tb00746.x>
- Herbon, C., Tönnies, K., Otte, B., & Stock, B. (2015). Mobile 3D wood pile surveying. *Proceedings of the 14th IAPR International Conference on Machine Vision Applications, MVA 2015*, 422-425. <https://doi.org/10.1109/MVA.2015.7153101>
- Jacobson, P. J., Jacobson, K. M., Angermeier, P. L., & Cherry, D. S. (1999). Transport, Retention, and Ecological Significance of Woody Debris within a Large Ephemeral River. *Journal of the North American Benthological Society*, 18(4), 429-444. <https://doi.org/10.2307/1468376>
- Jones, J. B., & Smock, L. A. (1991). Transport and Retention of Particulate Organic Matter in Two Low-Gradient Headwater Streams. *Journal of the North American Benthological Society*, 10(2), 115-126. <https://doi.org/10.2307/1467572>

- Lassetre, N., & Harris, R. (2001). *The Geomorphic and Ecological Influence of Large Woody Debris in Streams and Rivers*.
- Le Lay, Y.-F. (2007). *Les hommes et le bois en rivière : Représentations, pratiques et stratégies de gestion dans le cadre de l'entretien des cours d'eau*.
- Livers, B., Lininger, K. B., Kramer, N., & Sendrowski, A. (2020). Porosity problems : Comparing and reviewing methods for estimating porosity and volume of wood jams in the field. *Earth Surface Processes and Landforms*, 45(13), 3336-3353. <https://doi.org/10.1002/esp.4969>
- Loi n° 95-101 du 2 février 1995 relative au renforcement de la protection de l'environnement, (1995).
- Louis XIV. (1669). *Ordonnance de Louis XIV, roi de France et de Navarre, sur le fait des eaux et forests ... Avec les règlemens rendus en interprétation jusqu'à présent. Nouvelle édition...* <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k96428905>
- Manners, R. B. (2006). *The structure and hydraulics of natural woody debris jams*.
- Manners, R. B., Doyle, M. W., & Small, M. J. (2007). Structure and hydraulics of natural woody debris jams. *Water Resources Research*, 43(6), 2006WR004910. <https://doi.org/10.1029/2006WR004910>
- Miller, M. C., McCAYE, I. N., & Komar, P. D. (1977). Threshold of sediment motion under unidirectional currents. *Sedimentology*, 24(4), 507-527. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1977.tb00136.x>
- Montgomery, D. R., Buffington, J. M., Smith, R. D., Schmidt, K. M., & Pess, G. (1995). Pool Spacing in Forest Channels. *Water Resources Research*, 31(4), 1097-1105. <https://doi.org/10.1029/94WR03285>
- Montgomery, D. R., Collins, B. D., & Buffington, J. M. (2003). *Geomorphic Effects of Wood in Rivers*.
- Moskalik, T., Tymendorf, Ł., Saar, J., & Trzciński, G. (2022). Methods of Wood Volume Determining and Its Implications for Forest Transport. *Sensors*, 22. <https://doi.org/10.3390/s22166028>
- Pettit, N. E., Latterell, J. J., & Naiman, R. J. (2006). Formation, distribution and ecological consequences of flood-related wood debris piles in a bedrock confined river in semi-arid South Africa. *River Research and Applications*, 22(10), 1097-1110. <https://doi.org/10.1002/rra.959>
- Pettit, N. E., Naiman, R. J., Rogers, K. H., & Little, J. E. (2005). Post-flooding distribution and characteristics of large woody debris piles along the semi-arid Sabie River, South Africa. *River Research and Applications*, 21(1), 27-38. <https://doi.org/10.1002/rra.812>
- Pouilly, M., & Souchon, Y. (1995). Méthode des microhabitats : Validation et perspectives. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, 337-338-339, 329-336. <https://doi.org/10.1051/kmae:1995037>
- Roni, P., Beechie, T., Pess, G., & Hanson, K. (2015). Wood placement in river restoration : Fact, fiction, and future direction. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 72(3), 466-478. <https://doi.org/10.1139/cjfas-2014-0344>

- Schneider, K. N., & Winemiller, K. O. (2008). Structural complexity of woody debris patches influences fish and macroinvertebrate species richness in a temperate floodplain-river system. *Hydrobiologia*, *610*(1), 235-244. <https://doi.org/10.1007/s10750-008-9438-5>
- Scott, D. N., Wohl, E., & Yochum, S. E. (2019). Wood Jam Dynamics Database and Assessment Model (WooDDAM): A framework to measure and understand wood jam characteristics and dynamics. *River Research and Applications*, *35*(9), 1466-1477. <https://doi.org/10.1002/rra.3481>
- Skalak, K., & Pizzuto, J. (2010). The distribution and residence time of suspended sediment stored within the channel margins of a gravel-bed bedrock river. *Earth Surface Processes and Landforms*, *35*(4), 435-446. <https://doi.org/10.1002/esp.1926>
- Spange, D. (2018). *Defining habitat demands of Wels catfish (Silurus glanis) in a Swedish lake*.
- Spreitzer, G., Tunnicliffe, J., & Friedrich, H. (2020a). Large wood (LW) 3D accumulation mapping and assessment using structure from Motion photogrammetry in the laboratory. *Journal of Hydrology*, *581*, 124430. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124430>
- Spreitzer, G., Tunnicliffe, J., & Friedrich, H. (2020b). Porosity and volume assessments of large wood (LW) accumulations. *Geomorphology*, *358*, 107122. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107122>
- Thevenet, A., Citterio, A., & Piegay, 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*(6), 467-483. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1646\(1998110\)14:6<467::AID-RRR514>3.0.CO;2-X](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1646(1998110)14:6<467::AID-RRR514>3.0.CO;2-X)
- Thompson, D. M. (2018). Pool–Riffle Sequences. In *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences* (p. B9780124095489110292). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.11029-2>
- Trancart, T., Robin, E., & Acou, A. (2023). *GLANISPOLMI : Etude globale de la prédation des migrateurs amphihalins par les silures (Silurus glanis) sur le bassin de la Loire*.
- Wang, L., Chang, M., Dou, X., Ma, G., & Yang, C. (2017). Analysis of River Blocking Induced by a Debris Flow. *Geofluids*, *2017*, 1-8. <https://doi.org/10.1155/2017/1268135>
- Wantzen, K. M., Yule, C. M., Mathooko, J. M., & Pringle, C. M. (2008). Organic Matter Processing in Tropical Streams. In *Tropical Stream Ecology* (p. 43-64). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-012088449-0.50005-4>
- Webb, A. A., & Erskine, W. D. (2003). Distribution, recruitment, and geomorphic significance of large woody debris in an alluvial forest stream: Tonghi Creek, southeastern Australia. *Geomorphology*, *51*(1-3), 109-126. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(02\)00327-6](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(02)00327-6)
- Webster, J. R., Covich, A. P., Tank, J. L., & Crockett, T. V. (1994). Retention of Coarse Organic Particles in Streams in the Southern Appalachian Mountains. *Journal of the North American Benthological Society*, *13*(2), 140-150. <https://doi.org/10.2307/1467233>
- Whiteway, S. L., Biron, P. M., Zimmermann, A., Venter, O., & Grant, J. W. A. (2010). Do in-stream restoration structures enhance salmonid abundance? A meta-analysis.

Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 67(5), 831-841.
<https://doi.org/10.1139/F10-021>

Wright, J. P., & Flecker, A. S. (2004). Deforesting the riverscape : The effects of wood on fish diversity in a Venezuelan piedmont stream. *Biological Conservation*, 120(3), 439-447.
<https://doi.org/10.1016/j.biocon.2004.02.022>

Wyrick, J. R., & Pasternack, G. B. (2014). Geospatial organization of fluvial landforms in a gravel–cobble river : Beyond the riffle–pool couplet. *Geomorphology*, 213, 48-65.
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.12.040>

Directrice de recherche :

Catherine Boisneau

Pierre Trillaud

PFE/DAE5

GAE/IMA

2023-2024

Les amas de bois fluviaux : Dynamiques, fonctions et porosité.

Résumé :

Les tas de bois en rivière sont des formations issues du fonctionnement des hydrosystèmes en lien avec leur ripisylve et leur plaine alluviale.

Pourtant le fonctionnement cyclique de l'environnement n'attribue pas la valeur de déchets, comme la société peut le faire, à ces habitats si particuliers. De nombreux enjeux gravitent autour de ceux-ci, faisant d'eux des zones d'intérêt, particulièrement pour la faune, la flore et le fonctionnement abiotique du milieu. La compréhension de leur fonctionnement est donc un passage essentiel vers la considération des tas de bois à leur juste valeur écologique.

De nombreuses caractéristiques les définissent, certaines parfois étroitement en lien avec les usages qui peuvent en découler, comme c'est le cas avec la porosité. Or, pour pouvoir parler de valeur écologique et mesurer des améliorations, il est nécessaire de pouvoir quantifier ces paramètres. Dans ce but, plusieurs méthodes ont été compilées et étudiées pour en identifier les avantages et inconvénients. Cela pour aboutir à une nouvelle méthode, s'appuyant sur des éléments de pratiques ayant déjà fait leurs preuves et d'autres au contraire très récents. Cette étude a aussi pour but de rappeler que les tas de bois, bien qu'influençant fortement la géomorphologie de la rivière, ont aussi un impact sur la biocénose aquatique et qu'il est intéressant et même urgent de comprendre les liens existants entre les tas de bois et la biocénose pour mieux protéger les espèces qui pourraient dépendre de cet habitat.

Mots Clés : environnement, hydrosystèmes, tas de bois, dynamiques, fonctions, biodiversité, structure, porosité