

PLANIFICATION DE STRATÉGIES D'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE FONDÉES SUR LA NATURE POUR
L'ATTÉNUATION DES RISQUES D'INONDATION
Étude de cas du bassin versant de la Rivière-à-la-Truite

Par
Stéphanie Paradis-Léger

Essai présenté au Centre universitaire de formation
en environnement et développement durable en vue
de l'obtention du grade de maîtrise en environnement (M. Env.)

Sous la direction de Dodick Gasser, Ph. D.

MAÎTRISE EN ENVIRONNEMENT
UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

21 janvier 2023

SOMMAIRE

Mots clés : solutions fondées sur la nature, gestion intégrée des risques d'inondation / des ressources en eau, aménagement du territoire, analyse multicritère, carte d'aptitude, services écosystémiques, ingénierie écologique, infrastructure verte / à faible impact, capital naturel, restauration, changements climatiques

Les projections des modèles climatiques pour l'est du Canada prévoient une amplification de la fréquence et de la magnitude des inondations sous l'effet d'averses torrentielles, de fonte des neiges rapide et de la formation d'embâcles de glace. Les infrastructures d'ingénierie conventionnelles, telles que les barrages et les murs de retenue, offrent peu de flexibilité d'adaptation à ces nouvelles réalités hydroclimatiques, en plus de procurer des bénéfices limités en termes d'avantages environnementaux et sociaux.

Compte tenu de ces faits, l'objectif principal de cette étude est d'évaluer la stratégie d'aménagement fondée sur la nature la plus appropriée pour le bassin versant de la Rivière-à-la-Truite afin d'atténuer les risques d'inondation dans un contexte de changement climatique. La caractérisation du risque de l'aléa démontre que les principaux types d'inondations dans le bassin sont les débordements en eau libre, ainsi que les refoulements de la rivière Madawaska et des égouts pluviaux. Les facteurs contribuant à ces risques dérivent principalement des conditions climatiques dans le bassin et sont exacerbés par les activités humaines liées à l'aménagement des cours d'eau, aux changements du couvert végétal et à l'utilisation du territoire.

L'analyse du concept de solutions fondées sur la nature, et plus spécifiquement des techniques liées aux aménagements naturels et fondées sur la nature, démontre que celles-ci représentent une alternative viable aux infrastructures conventionnelles, malgré certaines limitations techniques et conceptuelles. Sur cette base, l'élaboration de stratégies d'aménagement pour l'atténuation des risques d'inondation à l'échelle du bassin versant se base sur la mise en œuvre de deux méthodologies. Tout d'abord, l'élaboration d'une analyse multicritère selon des indicateurs de performance technique, environnementale, sociale et économique a permis d'effectuer une sélection d'aménagements maximisant les bénéfices et adaptée au contexte local. Dans un deuxième temps, la réalisation de cartes d'aptitude pour chaque aménagement sélectionné a contribué à l'identification de zones prioritaires pour l'établissement de ceux-ci selon les principales opportunités et contraintes du territoire.

En fonction de ces résultats, les stratégies d'aménagement proposées constituent des outils d'aide à la décision pour les intervenants locaux afin d'élaborer un plan d'action avisé pour l'atténuation des risques d'inondation dans la région. Afin d'assurer la réussite de sa mise en œuvre et maximiser les bénéfices des aménagements, la gestion du projet devra intégrer des initiatives d'atténuation des risques ainsi qu'une approche adaptative et systémique.

ABSTRACT

Keywords: nature-based solutions, integrated flood management, integrated water resources management, land-use planning, multicriteria analysis, suitability mapping, ecosystem services, green infrastructure, low-impact infrastructure, natural flood management, restoration, climate change

Climate change projection models in Eastern Canada are predicting a rise in the frequency and magnitude of flooding due to more severe storms, rapid snowmelt, and ice jams. Traditional engineering infrastructures, such as dams, levees, and dykes, fail to provide flexibility for adaptation to these new hydroclimatic realities, as well as having limited outcomes in terms of ecological and social benefits.

Considering these facts, the aim of this project is to evaluate the most appropriate land management strategies based on ecosystem functions to attenuate flood risk for the Rivière-à-la-Truite watershed in the context of climate change. In this regard, an assessment of the hazard indicates that the main types of flooding in the catchment are riverine flooding, as well as backwaters from the Madawaska River and the urban storm sewer system. The main contributing factors to these risks originate from anthropogenic actions linked to hydromorphological changes to the fluvial system, vegetation cover alterations and land-uses.

A review of nature-based solutions concepts, and more specifically the techniques associated with natural and nature-based features, demonstrate that these measures provide a viable alternative to traditional infrastructures, despite having some technical and conceptual limitations. On this basis, the development of a land management strategy for flood mitigation at the watershed spatial scale makes use of two methodologies. Firstly, a multicriteria analysis was applied based on a series of indicators to measure technical, environmental, social, and economic performances. This tool enabled the selection of features that maximise benefits and are adapted to the local context. Secondly, a suitability mapping methodology was developed and performed to determine site suitability for each structural feature by identifying the main constraints and opportunity of the catchment characteristics.

The combination of the two analytical methodologies resulted in three proposed land and water management strategies for the Rivière-à-la-Truite watershed in the context of climate change. These decision support tools provide the basis for the drafting of an action plan to increase flood resilience in the region. In order to support its implementation success and maximise the ecological and social benefits of the features, the project management must integrate risk mitigation strategies and an adaptive and systematic approach.

REMERCIEMENTS

Cet essai constitue l'aboutissement d'un parcours universitaire nomadique parfois mouvementé et plein de défis qui n'aurait pu être possible sans la contribution de plusieurs personnes tout au long de la rédaction.

Tout d'abord, je tiens à remercier mon directeur d'essai, Dodick Gasser, qui a su m'inspirer et m'appuyer de façon continue tout au long de ce projet. Sa flexibilité, son regard critique, et ses bons conseils ont fait de lui un collaborateur idéal pour la concrétisation de cet essai. Nos nombreuses rencontres ont toujours été une source d'inspiration et de camaraderie et son dévouement pour le projet a été bien au-delà du rôle attendu pour une personne dans sa position.

Je souhaite également remercier tous les collaborateurs qui ont partagé leurs expertises et contribué à la réalisation de cet essai. Je pense notamment à Gordon Fairchild qui a su guider mes réflexions en me partageant sa « confusion » avisée. Un énorme merci à Laurie Vidal qui a su relever les nombreux défis géomatiques de ce projet avec brio et sans laquelle celui-ci n'aurait pu être aussi exhaustif. Je tiens également à souligner la contribution significative d'Alexandra Lang Lavoie, de Fares Dhane et de Thomas Labelle qui ont produit de nombreuses couches cartographiques essentielles pour l'analyse.

Un grand merci également à tous les intervenants qui ont dévoué une portion de leur précieux temps de travail pour répondre à mes nombreuses questions, m'accompagner lors d'une visite sur le terrain et répondre au questionnaire partagé. Votre participation a permis de collecter des données essentielles pour la production d'une analyse pertinente et adaptée au contexte local. Un merci tout spécial à Alain Laplante et Adrian Prado qui m'ont offert un soutien continu et précieux tout au long du projet.

Par ailleurs, la réalisation de ce projet n'aurait pu se faire sans l'appui financier d'ÉCO Canada, de la Commission des services régionaux du Nord-Ouest et de la municipalité d'Edmundston. L'attribution d'une subvention salariale m'a permis de me dévouer complètement à la réalisation de cette étude, d'en élargir la portée et de contribuer grandement à la qualité des données produites. Je suis ainsi extrêmement reconnaissante de la confiance et de l'appui que vous m'avez démontré, ainsi que pour la relève professionnelle dans le domaine de l'environnement.

Enfin, la réalisation de cet essai n'aurait été possible sans le soutien et les encouragements de mes parents, Sylvie Paradis et Robert Léger. Votre appui inconditionnel tout au long de mon parcours scolaire fut une source de motivation inestimable. Finally, I would like to give very special thanks to my husband, Ethan Middleton. Your unwavering love and support gave me strength and sanity throughout every stage of the project.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	1
1. MISE EN CONTEXTE DU BASSIN VERSANT RIVIÈRE-À-LA-TRUITE	4
1.1 CARACTÉRISTIQUES NATURELLES	4
1.1.1 Hydrologie et morphologie	5
1.1.2 Géologie et sols	8
1.1.3 Flore et faune	8
1.1.4 Climat	9
1.2 OCCUPATION DU TERRITOIRE	10
1.3 GESTION DE L'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE ET DES RESSOURCES HYDROLOGIQUES	11
1.3.1 Cadre politique et réglementaire au Québec	11
1.3.2 Cadre politique et réglementaire au Nouveau-Brunswick	12
1.3.3 Parties prenantes	13
2. ANALYSE DES RISQUES ET DES ENJEUX	15
2.1 HISTORIQUE DES INONDATIONS	17
2.2 MODIFICATIONS DU TERRITOIRE CONTRIBUANT AUX RISQUES D'INONDATION	19
2.2.1 Modifications hydromorphologiques	20
2.2.2 Altération des dynamiques sédimentaires	24
2.2.3 Aménagement du territoire	27
2.3 IMPACTS ANTICIPÉS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES	31
2.4 OBJECTIFS PRÉLIMINAIRES DE GESTION INTÉGRÉE DES RISQUES D'INONDATION	34
3. SOLUTIONS FONDÉES SUR LA NATURE	36
3.1 CRITÈRES ET PRINCIPES CLÉS DES SFN ET DES ANFN	38
3.2 PERTINENCE ET LIMITES POUR LA GESTION INTÉGRÉE DES RISQUES D'INONDATION	39
3.2.1 Avantages des ANFN	40
3.2.2 Limites méthodologiques et techniques des ANFN	41
3.3 REVUE DE LA LITTÉRATURE	42
3.4 INVENTAIRE DES AMÉNAGEMENTS CONSIDÉRÉS	48
3.4.1 Gestion hydromorphologique	49
3.4.2 Gestion des dynamiques sédimentaires	57
3.4.3 Gestion de l'aménagement du territoire	59

4. ANALYSE MULTICRITÈRE.....	63
4.1 DÉMARCHE MÉTHODOLOGIQUE.....	63
4.2 DESCRIPTION DES CRITÈRES	66
4.3 INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS.....	68
4.3.1 Matrice d'analyse multicritère.....	68
4.3.2 Pondération des critères.....	70
4.3.3 Constats globaux et spécifiques de l'analyse.....	71
4.3.4 Sélection d'ANFN pour le bassin versant Rivière-à-la-Truite	75
5. CARTE D'APTITUDE.....	77
5.1 DÉMARCHE MÉTHODOLOGIQUE.....	77
5.2 JUSTIFICATION DES CRITÈRES	81
5.2.1 Critères généraux	81
5.2.2 Critères spécifiques	82
5.3 VALIDATION ET LIMITES DE LA MÉTHODE.....	85
6. RECOMMANDATIONS.....	87
6.1 PROPOSITION DE SCÉNARIOS D'AMÉNAGEMENT.....	87
6.1.1 Scénario 1 : Performance globale.....	89
6.1.2 Scénario 2 : Performance technique	93
6.1.3 Scénario 3 : Performance économique	96
6.2 ATTÉNUATION DES RISQUES.....	100
6.3 CONTINUITÉ DU PROJET.....	102
6.4 LEVIERS D'ACTION ET LIMITES DE L'ÉTUDE	108
6.4.1 Identification des opportunités locales	108
6.4.2 Limites méthodologiques des analyses	109
CONCLUSION.....	111
RÉFÉRENCES	114
BIBLIOGRAPHIE	128
ANNEXE 1 VISITE SUR LE TERRAIN – 7 JUIN 2022	130
ANNEXE 2 MATRICE D'ÉVALUATION DES INDICATEURS.....	134
ANNEXE 3 QUESTIONNAIRE POUR LA PRIORISATION DES CRITÈRES PAR LES PARTIES PRENANTES	138

ANNEXE 4 TABLEAU DES CRITÈRES D'APTITUDE	143
ANNEXE 5 CARACTÉRISATION DES BANDES RIVERAINES ET DES FOSSÉS DÉNUDÉS	146
ANNEXE 6 CARTES D'APTITUDE SPÉCIFIQUES POUR CHAQUE AMÉNAGEMENT	147
ANNEXE 7 PROJET DE PARC DANS LA PLAINE INONDABLE DU BASSIN VERSANT	155
ANNEXE 8 PROPOSITION DE RESTAURATION PRÈS DE LA RUE DEMERS.....	156
ANNEXE 9 PROJET DE RESTAURATION DES BERGES D'UN TRONÇON DE LA RIVIÈRE À LA TRUITE	157

FIGURES ET TABLEAUX

Figure 1.1	Réseau hydrographique du bassin versant Rivière-à-la-Truite	4
Figure 1.2	Profil altimétrique de la rivière à la Truite	6
Figure 1.3	Zones du bassin versant Rivière-à-la-Truite	6
Figure 1.4	Diagramme ombrothermique de la ville d'Edmundston	10
Figure 1.5	Parties prenantes pour la gestion des risques d'inondation du BV Rivière-à-la-Truite	14
Figure 2.1	Approche conceptuelle du risque d'inondation	15
Figure 2.2	Carte des zones inondables	16
Figure 2.3	Évolution de la morphologie de la rivière à la Truite entre 1967 et 2018	22
Figure 2.4	Couverture du sol et impacts sur la capacité de régulation des inondations	27
Figure 2.5	Facteurs contribuant aux risques d'inondation dans le bassin versant Rivière-à-la-Truite ...	34
Figure 3.1	Classification des concepts associés aux SFN dans le cadre de la gestion intégrée des risques d'inondation	37
Figure 4.1	Système de notation pour l'évaluation des critères et indicateurs	64
Figure 4.2	Résultats de la pondération moyenne des critères par les parties prenantes	70
Figure 4.3	Score et classement des ANFN selon l'analyse multicritère	71
Figure 5.1	Diagramme des processus pour la réalisation de la carte d'aptitude	79
Figure 5.2	Comparaison de cartes d'aptitude avec les images aériennes	84
Figure 5.3	Exemples d'erreurs d'identification entre les cartes d'aptitude et l'occupation du sol	86
Figure 6.1	Agrégation des sites selon la priorité majoritaire	86
Figure 6.2	Scénario de performance globale recommandé	88
Figure 6.3	Scénario de performance technique recommandé	92
Figure 6.4	Scénario de performance économique recommandé	95
Figure 6.5	Étapes du cadre de gestion pour la mise en œuvre d'ANFN	92

Tableau 1.1	Caractéristiques hydromorphologiques du bassin versant Rivière-à-la-Truite	8
Tableau 2.1	Historique des inondations	18
Tableau 3.1	Analyse critique de la littérature disponible	43
Tableau 3.2	Critères de présélection	48
Tableau 3.3	Aménagements pour la restauration de la rivière	50
Tableau 3.4	Aménagements pour la restauration de la plaine inondable et de ses milieux humides	52
Tableau 3.5	Aménagements pour la création de zones de stockage	54
Tableau 3.6	Aménagements pour la gestion des débris ligneux	56
Tableau 3.7	Aménagements pour la gestion des dynamiques sédimentaires	58
Tableau 3.8	Aménagements pour le reboisement	60
Tableau 3.9	Aménagements pour les bandes riveraines	62
Tableau 4.1	Grille de pondération des critères	65
Tableau 4.2	Description des critères pour chaque dimension	66
Tableau 4.3	Matrice d'analyse multicritère	69
Tableau 4.4	Sélection d'ANFN selon trois scénarios	76
Tableau 5.1	Répartition des ANFN selon la zone du bassin versant	77
Tableau 6.1	Combinaisons optimales des ANFN sélectionnés	87
Tableau 6.2	Stratégies d'atténuation	98
Tableau 6.3	Recommandations pour la mise en œuvre des scénarios d'ANFN	101

LISTE DES ACRONYMES, DES SYMBOLES ET DES SIGLES

ACB	Analyse coût-bénéfice
AGRCQ	Association des gestionnaires régionaux des cours d'eau du Québec
AMC	Analyse multicritère
ANFN	Aménagements naturels et fondés sur la nature
BV	Bassin versant
CARNO	Comité de l'aménagement rural du Nord-Ouest
CEPRI	Centre Européen de Prévention des Risques d'Inondation
CSRNO	Commission des services régionaux du Nord-Ouest
ENGEEES	École nationale du génie de l'eau et de l'environnement de Strasbourg
EPA	Environmental Protection Agency
GIRE	Gestion intégrée des ressources en eau
GIRI	Gestion intégrée des risques d'inondation
IBC	Insurance Bureau of Canada
INRAE	Institut national de la recherche agronomique
IPBES	Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
NNBF	Natural and Nature-Based Features
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
MEGL	Ministère de l'Environnement et des Gouvernements locaux
MELCC	Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques
MFFP	Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs
MNAI	Municipal Natural Assets Initiative
MNT	Modèle numérique de terrain
MRC	Municipalité régionale de comté

NCASI	National Council for Air and Stream Improvement
OBV	Organisme de bassin versant
ONU	Organisme des Nations Unies
PPRLPI	Politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables
ROBVQ	Regroupement des organismes de bassins versants du Québec
SARM	Société d'aménagement de la rivière Madawaska
SCADA	Système de contrôle et d'acquisition de données en temps réel
SEPA	Scottish Environment Protection Agency
SFN	Solutions fondées sur la nature
SIG	Système d'information géographique
TWI	Indice d'humidité topographique
UICN	Union internationale pour la conservation de la nature
UNDRR	United Nations Office for Disaster Risk Reduction
VTT	Véhicule tout-terrain
WWF	World Wildlife

LEXIQUE

Bathymétrie	[...] consiste en la mesure de la profondeur d'un plan d'eau. (Aquaportail, 2022)
Crue	Une crue d'un cours d'eau est un débit important d'eau douce, de courte durée, dans un courant d'eau, résultant d'un événement météorologique comme de fortes pluies ou la fonte rapide des neiges. Autrement dit, la crue qualifie un gonflement brusque de l'hydrogramme dû à l'augmentation du débit d'une rivière ou de l'onde de tout cours d'eau. (Aquaportail, 2022)
Débit de pointe	Débit maximum pendant une crue. (Chocat, 2017)
Écoulement	Un écoulement d'eau désigne une masse d'eau coulant dans un [cours d'eau se déplaçant en suivant un itinéraire préférentiel.]. On la définira par un débit volumétrique ou un débit horaire d'un flux. (Aquaportail, 2022)
Espace de mobilité	L'espace du lit majeur à l'intérieur duquel le ou les chenaux fluviaux assurent des translations latérales pour permettre une mobilisation des sédiments ainsi que le fonctionnement optimum des écosystèmes aquatiques et terrestres. (Chocat, 2017)
Étiage	Le niveau de débit le plus faible atteint par un courant d'eau au cours du cycle annuel. (Aquaportail, 2022)
Hydromorphologie	Étude de la morphologie des cours d'eau et des relations entre sa dynamique d'évolution et l'hydrologie ou les aménagements. On distingue de façon classique : l'étude des processus physiques qui régissent le fonctionnement du cours d'eau (la dynamique fluviale) ; l'étude des formes qui résultent de ces processus (la morphologie fluviale). (Chocat, 2017)
Lit mineur	Espace occupé en permanence par une rivière. (Chocat, 2017)
Lit majeur	Espace occupé temporairement par les rivières lors du débordement des eaux en période de crues. (Chocat, 2017)
Ordre de Strahler	Fait référence à la méthode de détermination du rang d'un cours d'eau [...]. Dans cette méthode, deux tronçons de même ordre qui se rejoignent forment un tronçon d'ordre supérieur, tandis qu'un segment qui reçoit un segment d'ordre inférieur conserve le même ordre. (SAGE Rance Frémur Baie de Beausseis, s. d.)
Période de retour	Moyenne à long terme de la durée séparant un événement hydrologique d'une certaine intensité d'un événement d'intensité égale ou supérieure. (Office québécois de la langue française, 2012)
Pic de crue	Le pic de crue définit le niveau le plus haut ou le débit le plus fort atteint par une crue dans un cours d'eau. Il est, finalement, le débit maximum de crue (débit horaire, éventuellement instantané). (Aquaportail, 2022)

Plaine inondable	Zone proche d'un cours d'eau [qui] est susceptible d'être inondée en cas de crue de ce dernier. Cette zone [...] correspond alors au lit majeur du cours d'eau. (Chocat, 2017)
Pluie nette	Partie de l'averse qui atteint un cours d'eau par écoulement de surface direct. (Office québécois de la langue française, 2012)
Rugosité hydraulique	[Caractérise] la plus ou moins grande résistance qu'un tronçon oppose au passage de l'eau. (Office international de l'eau [OiEau], 2019)
Ruissellement	Partie de la précipitation qui s'écoule vers un cours d'eau à la surface du sol (ruissellement ou écoulement de surface) ou dans le sol (écoulement hypodermique ou ruissellement retardé). (Office québécois de la langue française, 2012)
Temps de montée	Au cours d'une crue, le temps nécessaire pour que le débit passe de sa valeur habituelle (début du temps de base) à son maximum. (Chocat, 2017)

INTRODUCTION

Les inondations constituent les aléas naturels les plus dommageables et fréquents au Canada. De ce fait, chaque année, elles engendrent en moyenne plus d'un milliard de dollars en dommages directs aux biens, aux infrastructures et aux résidences (Gouvernement du Canada, 2022). En plus, elles causent d'importants impacts pour la santé physique et psychosociale des citoyens. Les projections climatiques indiquent que la fréquence et la magnitude de ces aléas seront grandement amplifiées par les phénomènes de changements climatiques. De ce fait, l'augmentation de la température et la volatilité du climat qui leur sont associées intensifient le cycle de l'eau et les paramètres hydrométéorologiques associés à la genèse des inondations (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2022). Alors que les risques d'événements météorologiques extrêmes continuent d'augmenter, les modifications du couvert végétal, de l'utilisation des terres et de l'aménagement du territoire contribuent également à exacerber les phénomènes d'inondation. Afin de limiter les pertes futures et protéger les populations, la mise en pratique d'une gestion intégrée des risques d'inondation à long terme s'avère ainsi indispensable pour les communautés.

Jusqu'à tout récemment, la principale stratégie employée par les ingénieurs et les aménagistes afin de contrôler ces aléas s'appuyait uniquement sur des méthodes d'ingénierie conventionnelles telles que la construction de barrages ou de murs de retenue. Toutefois, ces ouvrages artificiels démontrent plusieurs limites techniques, notamment en matière d'adaptation aux changements climatiques (Alfieri et al., 2016; United Nations Office for Disaster Risk Reduction [UNDRR], 2021). De plus, en misant uniquement sur la réduction des dommages structurels, ces méthodes offrent peu de bénéfices supplémentaires pour la biodiversité, la résilience des milieux, le bien-être humain et l'attractivité des territoires. Afin de répondre à ces limitations, les solutions fondées sur la nature sont de plus en plus reconnues comme des stratégies viables pour l'atténuation des risques d'événements extrêmes. Ces techniques, qui misent sur les fonctions régulatrices naturelles des écosystèmes, incluent la création, l'agrandissement, la restauration, l'amélioration ou le renforcement d'infrastructures naturelles (Nesshover et al., 2017). Adaptées pour l'atténuation des risques d'inondation, elles s'intègrent aisément dans un processus de gestion intégrée des ressources en eau (GIRE), tout en générant des bénéfices complémentaires pour l'environnement, l'économie et la société (Bridges et al., 2021).

Le bassin versant de la Rivière-à-la-Truite, situé à cheval sur les provinces du Québec et du Nouveau-Brunswick, a récemment connu une succession d'importantes inondations printanières occasionnant de nombreux frais pour les résidents et la municipalité. Face aux risques accrus d'événements extrêmes engendrés par les changements climatiques, les intervenants municipaux souhaitent ainsi développer des

stratégies de gestion intégrée du territoire et des ressources en eau afin d'accroître la résilience des communautés. Devant les faits énoncés, un questionnement se pose à savoir comment évaluer l'adéquation de solutions fondées sur la nature à l'échelle d'un bassin versant en tenant compte du contexte local et des caractéristiques physiques. Dans cette visée, l'objectif principal de cet essai est ainsi de planifier les stratégies d'aménagement fondées sur la nature les plus appropriées pour le bassin versant de la Rivière-à-la-Truite afin d'atténuer les risques d'inondation dans un contexte de changement climatique.

Pour ce faire, une caractérisation des éléments naturels du bassin, incluant l'hydrologie, la morphologie, la pédologie, la géologie, l'écologie et la climatologie, sera tout d'abord effectuée. Celle-ci sera suivie d'une mise en contexte de l'occupation actuelle du territoire en considérant son influence sur les dynamiques hydrologiques. Cette section inclut également une revue des cadres politiques et réglementaires pour la gestion de l'aménagement du territoire et des ressources en eau selon les différentes échelles de compétence, suivie de l'identification des principales parties prenantes en fonction de leur degré d'influence potentiel sur le projet.

Dans un deuxième temps, un diagnostic des risques d'inondation dans le bassin versant sera posé. Celui-ci inclut notamment une analyse des trois composantes du risque, soit les caractéristiques de l'aléa, la caractérisation de l'exposition des communautés et l'évaluation de la vulnérabilité des populations. Une revue de l'historique des inondations sera ensuite effectuée, permettant d'identifier et de définir les principaux types d'inondation observés dans la région. Par la suite, les principaux facteurs contribuant au risque d'inondation dans le bassin versant seront évalués de façon exhaustive. Ceux-ci sont divisés en trois catégories selon leur principale répercussion sur l'hydrosystème, soit les modifications hydromorphologiques, l'altération des dynamiques sédimentaires et l'aménagement du territoire. De plus, l'impact anticipé des changements climatiques sur les phénomènes de crue sera étudié en fonction des prédictions régionales. À la lumière des mises en contexte et des déclarations d'intention politique, les objectifs préliminaires pour la gestion intégrée des risques d'inondation dans le bassin seront ensuite définis.

La troisième section de l'essai est consacrée à l'identification des solutions fondées sur la nature pertinentes pour le projet. Afin de circonscrire les limites conceptuelles, une revue des différents ensembles de techniques associés au concept a été réalisée sur la base du degré d'intervention humaine requis pour chacun. Par la suite, les principaux concepts et principes pour l'identification d'une solution fondée sur la nature ont été définis, suivis d'un argumentaire sur les avantages et les limites de ce type de mesure. Subséquemment, une analyse critique des documents conceptuels et techniques au Canada et à l'international a été développée afin de définir l'état des connaissances sur ce concept. Enfin, un inventaire de quinze aménagements potentiels est présenté, choisi selon une liste de critères de présélection. Chaque

aménagement est brièvement présenté, en soulignant leurs effets dominants sur les dynamiques hydrologiques ainsi que les principaux avantages et inconvénients de chacun.

Afin d'effectuer une sélection finale des aménagements les plus appropriés pour le bassin versant à l'étude, la méthode de l'analyse multicritère a été sélectionnée. En évaluant une série d'indicateurs selon quatre dimensions du développement durable, cette méthode permet de considérer différentes options selon leur importance relative d'un point de vue décisionnel. Ainsi, une présentation détaillée de la méthodologie développée pour l'étude est tout d'abord formulée, suivie de la définition des critères choisis pour chaque dimension, soit la performance technique, l'environnement, la société et la performance économique. Les résultats de l'exécution de cet outil sont par la suite détaillés et interprétés, fondant la base de l'argumentaire pour la proposition finale d'un portefeuille d'aménagements pour le bassin versant.

La seconde méthodologie analytique sélectionnée pour l'élaboration d'une stratégie d'aménagement consiste à élaborer des cartes d'aptitude pour chaque technique sélectionnée. Cet outil spatial d'aide à la décision permet de définir des zones prioritaires pour la mise en œuvre des aménagements selon les principales contraintes et les opportunités du territoire. À la suite de la définition de la méthodologie, tous les critères limitants sont précisés et justifiés. Les résultats globaux et spécifiques des cartes d'aptitude conçues sont ensuite présentés, accompagnés d'une courte interprétation.

À l'égard des résultats obtenus par les deux types d'analyses, trois stratégies d'aménagement fondées sur la nature sont proposées pour le bassin versant de la Rivière-à-la-Truite. Celles-ci proposent les combinaisons optimales d'aménagements selon trois objectifs distincts, soit la performance globale, technique ou économique, afin d'atténuer les risques d'inondation. Afin de réduire les risques inhérents au projet, des stratégies d'atténuation sont également proposées, suivies de recommandations afin de mettre en œuvre le projet selon une approche adaptative et systémique.

1. MISE EN CONTEXTE DU BASSIN VERSANT RIVIÈRE-À-LA-TRUITE

Le bassin versant (BV) constitue l'unité géographique privilégiée pour l'étude des dynamiques hydrologiques en matière de gestion intégrée des risques d'inondations (GIRI) (Ouranos, 2018; World Wildlife [WWF], 2017). Celui-ci est délimité par une ligne de crête et contient toutes les eaux s'écoulant vers un même point appelé l'exutoire (Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques [MELCC], 2022). Le territoire à l'étude est celui du BV Rivière-à-la-Truite, partagé sur les territoires de la municipalité de Dégelis au Québec, ainsi que la communauté rurale du Haut-Madawaska, la municipalité d'Edmundston et le district de services local de Saint-Jacques au Nouveau-Brunswick. Il constitue l'un des bassins de drainage du sous-bassin versant de la rivière Madawaska, lui-même composant de l'ensemble hydrographique du BV fleuve Saint-Jean. Son emplacement et réseau hydrographique sont représentés à la figure 1.1.

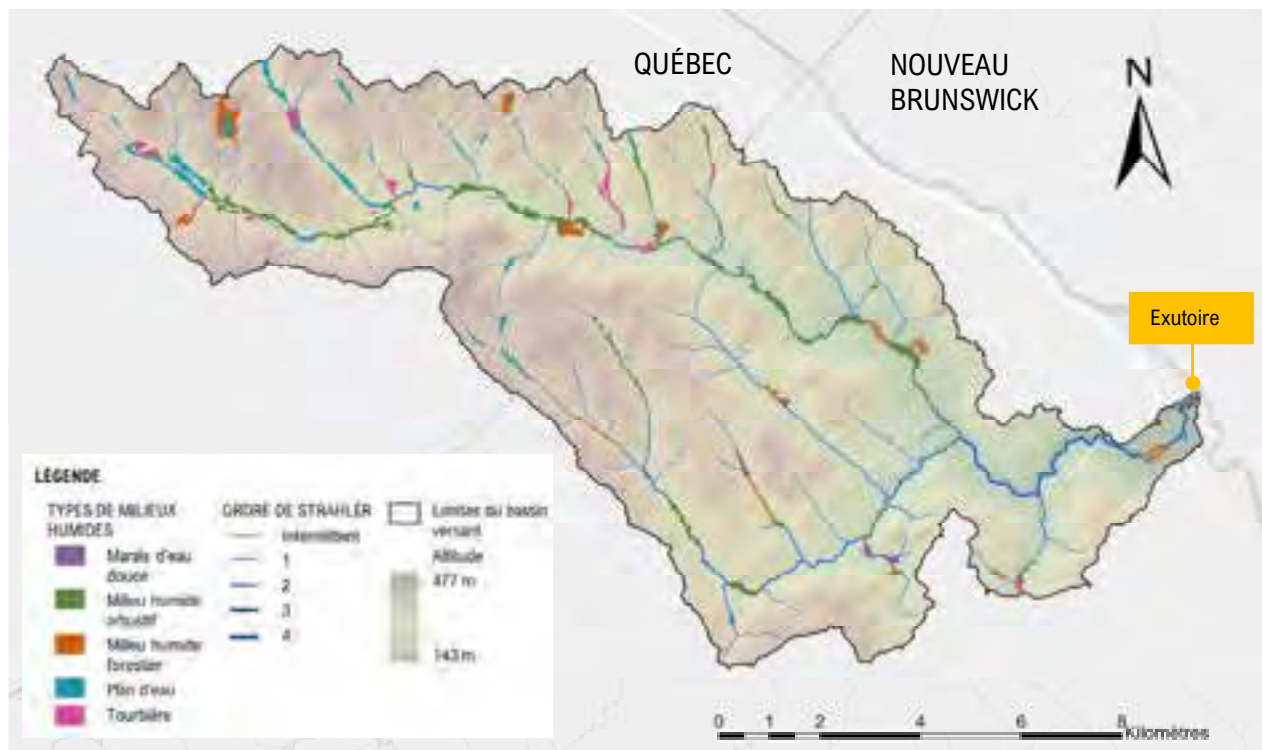


Figure 1.1 Réseau hydrographique du bassin versant Rivière-à-la-Truite

1.1 CARACTÉRISTIQUES NATURELLES

La caractérisation des paramètres physiques, biologiques et climatiques d'un bassin versant établit la base de l'analyse contextuelle des risques d'inondation. L'étude des différentes composantes naturelles permet ainsi d'identifier les leviers et les contraintes, ainsi que les éléments à préserver dans une optique de gestion intégrée des ressources naturelles.

1.1.1 Hydrologie et morphologie

Le BV Rivière-à-la-Truite couvre une superficie de 116,51 km² délimitée par une ligne de partage des eaux sur 115 km de périmètre. Son principal cours d'eau est la rivière à la Truite qui s'écoule selon un axe sud-est sur 34,3 km vers l'exutoire, la rivière Madawaska. Celui-ci est alimenté par plus d'une vingtaine de tributaires, dont la petite rivière à la Truite qui constitue le second cours d'eau en importance. La longueur cumulée de son réseau hydrographique correspond à 116 km linéaires de cours d'eau permanents, et au minimum 55 km de cours d'eau intermittents, bien que plusieurs de ceux-ci soient non identifiés, notamment pour la province du Nouveau-Brunswick. La densité de drainage du bassin, soit le rapport entre la longueur totale des cours d'eau et sa superficie, est plutôt faible à 1,46 km/km². Ce résultat est caractéristique de régions où la couverture végétale est plus dense, le relief est modérément accidenté et les sols sont davantage perméables.

Le réseau de drainage du BV Rivière-à-la-Truite est de type dendritique, formé par de nombreux ruisseaux ramifiés d'ordre 1 selon la classification de Strahler. Ces cours d'eau de faibles dimensions ont un impact non négligeable sur les régimes hydrologiques, puisqu'ils drainent une partie importante du territoire (Réseau Environnement, 2014). Cette hypothèse est corroborée par le coefficient de compacité, calculé selon l'indice de Gravelius, équivalant à 3. Ce résultat indique un bassin de forme très allongée, ayant un impact direct sur l'allure de l'hydrogramme de crue. De ce fait, les BV de ce type favorisent des débits de pointe plus faibles, en raison des temps d'acheminement de l'eau à l'exutoire plus importants (École nationale du génie de l'eau et de l'environnement de Strasbourg [ENGEES], 2018).

Par ailleurs, le territoire présente une topographie plutôt accidentée avec des altitudes maximales et minimales de 477 mètres et 143 mètres. Son relief est caractérisé par des vallées principalement orientées dans un axe nord-ouest / sud-est, correspondant aux lignes d'écoulement des eaux. La pente moyenne du bassin est de 14,7 %, considérée comme modérée selon la classification du Gouvernement du Canada (2013). Des pentes plus abruptes sont observées en amont des cours d'eau et près des lignes de crêtes. La pente moyenne du plus long cours d'eau, soit la rivière à la Truite, est considérée comme faible à 7,6 m/km, réduisant ainsi la vitesse du cours d'eau. De ce fait, l'étude du profil altimétrique du plus long cours d'eau présenté à la figure 1.2 permet d'observer une plus forte pente en amont, suivie par une diminution régulière de la pente jusqu'à l'exutoire.

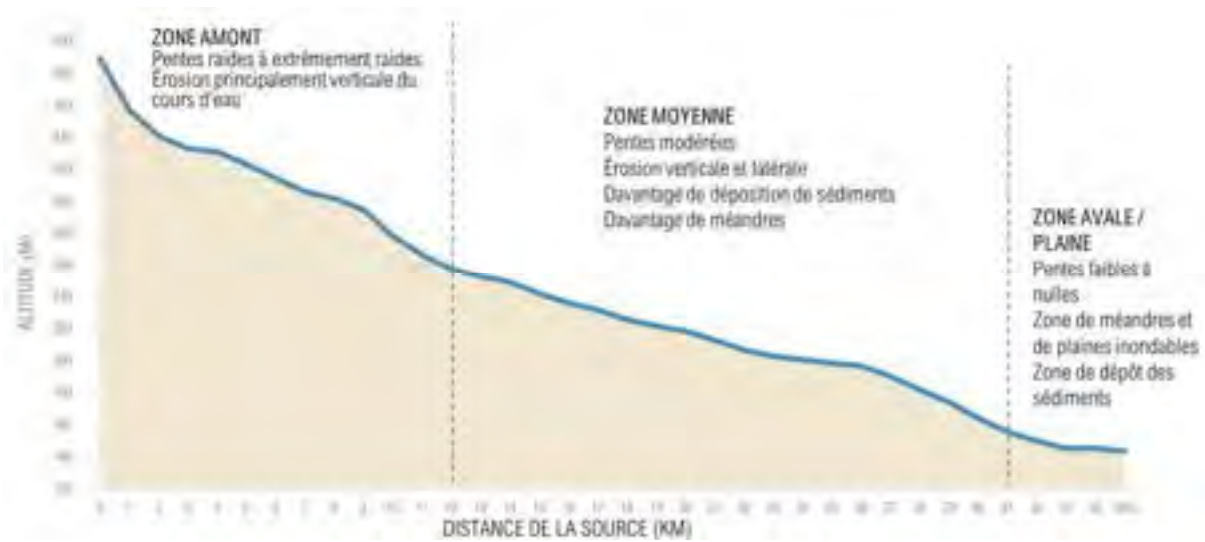


Figure 1.2 Profil altimétrique de la rivière à la Truite

Aux fins de la présente étude, trois zones ont été définies, soit amont, moyenne et avale. Chaque zone est associée à des caractéristiques particulières à l'égard des types d'érosion, de la morphologie du cours d'eau et du dépôt des sédiments. La délimitation des trois zones pour l'intégralité du bassin versant se base sur la distance entre l'exutoire et le point le plus éloigné hydrologiquement de celui-ci. Pour ce faire, la longueur longitudinale du plus long cours d'eau fut divisée en trois segments égaux. Les aires de contribution respectives représentent les trois zones du bassin versant, tel que présenté à la figure 1.3.



Figure 1.3 Zones du bassin versant Rivière-à-la-Truite

Nous retrouvons également de nombreux milieux humides le long des berges des cours d'eau ainsi qu'à l'embouchure du BV vers la rivière Madawaska. Les principaux types observés sont les milieux humides forestiers et arbustifs, inondés en permanence ou périodiquement selon les crues saisonnières. En matière de régulation des niveaux d'eau, ces milieux peuvent absorber une faible augmentation des débits de la rivière et prévenir les inondations localisées (WWF, 2017). Deux étangs permanents se trouvent au sud du territoire, le plus grand étant connu sous le nom de Petit Lac-Saint-Jean. De superficies respectives de 0,01 et 0,02 km², ceux-ci présentent une plus grande capacité de rétention lors d'épisodes de fortes pluies. Nous retrouvons également 3 tourbières totalisant une surface de 0,08 km² dans la portion québécoise du bassin. Ces milieux exercent des fonctions essentielles pour la modération des risques de crues et d'inondations lors d'averses importantes, en plus de maintenir un débit régulier dans les cours d'eau en aval en période de sécheresse. (Urak et al., 2017). Au total, les milieux humides couvrent une superficie de 4,45 km², soit 3,8 % du territoire.

Une échelle limnimétrique enregistre de façon continue les hauteurs d'eau de la rivière à la Truite au pont à la hauteur du boulevard Isidore-Boucher depuis avril 2020. Durant cette période, la hauteur maximale enregistrée a été de 146,39 cm et la hauteur minimale de 141,6 cm, avec une moyenne de 145 cm pour l'année 2021. La courte durée de l'historique des registres ne permet pas l'analyse à long terme des données caractéristiques de la rivière, telles que les périodes de crues et d'étiage. Par ailleurs, le BV Rivière-à-la-Truite n'est pas jaugé, et donc aucune donnée n'a été obtenue concernant les débits. Afin d'obtenir une estimation des conditions d'écoulement dans le bassin, des méthodes de calcul approximatives ont donc dû être employées. Le calcul du temps de concentration, soit le temps que met une particule d'eau pour circuler de la partie du bassin la plus éloignée hydrologiquement à l'exutoire, est basé sur une moyenne des formules de Passini et de Ventura, applicables pour des bassins versants ruraux ou naturels. Ainsi, la durée approximative estimée entre la fin de la pluie nette et la fin du ruissellement direct est évaluée à 5,79 heures. Cette approximation correspond partiellement aux observations d'intervenants locaux, qui estiment le temps de montée, soit la durée entre la fin de la pluie nette et le pic de crue, à environ 3 à 4 heures.

Le tableau 1.1 résume les principales caractéristiques hydrométriques du bassin versant. Celles-ci ont été calculées à partir de modèles numériques de terrain, ainsi que les informations géographiques fournies par les gouvernements du Québec et du Nouveau-Brunswick. En somme, l'analyse hydromorphologique du bassin versant révèle plusieurs caractéristiques modératrices des crues, telles que la forme, la pente moyenne du plus long cours d'eau et la présence de plusieurs milieux humides à l'état naturel.

Tableau 1.1 Caractéristiques hydromorphologiques du bassin versant Rivière-à-la-Truite

SYMBOLE	CARACTÉRISTIQUES	VALEURS
S	Superficie totale	116,51 km ²
P	Périmètre	115,44 km
H	Altitudes caractéristiques	
H_{max}	Maximale	477 m
H_{moy}	Moyenne	321 m
H_{50%}	Médiane	333 m
H_{min}	Minimale	143 m
H_{5%}	H _{5%}	419 m
H_{95%}	H _{95%}	220 m
K_c	Indice de compacité	3
I_g	Indice de pente globale	5,8 m/km
I_{moy}	Pente moyenne du bassin	14,7 %
L	Longueur du plus long cours d'eau	34,3 km
D_d	Densité de drainage	1,46 km/km ²
	Pente moyenne du plus long cours d'eau	7,6 m/km
T_c	Temps de concentration	5,79 heures

1.1.2 Géologie et sols

Les sols et la structure géologique d'un bassin versant déterminent les conditions hydrologiques initiales d'infiltration et de conductivité hydraulique. Le BV Rivière-à-la-Truite fait partie de l'ensemble physiographique de la région des Appalaches et repose sur des roches sédimentaires non calcaires du Silurien-Dévonien (Organisme de bassin versant Saint-Jean [OBV Saint-Jean], 2018). Les principaux sols observés sur le territoire sont loameux, de type Holmesvilles (Hsil) et Quisibis (Qu), présents principalement vers les altitudes supérieures à 280 mètres. Le long des lits des cours d'eau, nous retrouvons les types Victoria (VI) et Grandfalls (Gr), des sols de loam sableux à sable grossier loameux très graveleux. D'autres types de sols sont également présents dans de faibles proportions, soit Grand Falls (GF), Glassville (G), Harquail (H), Sirois (S), Johnville (Jsil) et McCluskey (Mc). En zone de plaine inondable, le sol dominant est de type loam Flemming (Fl). (Agriculture and Agri-Food Canada, 2010; Gouvernement du Canada, 1980)

Selon les données géomatiques recueillies auprès des instances gouvernementales au Québec et au Nouveau-Brunswick, la majorité des sols sur le territoire présentent des classes de drainage de modéré à bon. De plus, la quasi-totalité du territoire démontre une perméabilité rapide, indiquant une bonne capacité d'infiltration de l'eau dans le sol.

1.1.3 Flore et faune

Le territoire du bassin se situe au sein de l'écodistrict Madawaska, selon la classification du Nouveau-Brunswick, et de la région écologique Collines des moyennes Appalaches selon celle du Québec. Les

essences d'arbres caractéristiques de cette région sont principalement les feuillus tolérants, tels que le bouleau jaune (*Betula Alleghaniensis*), l'érable à sucre (*Acer Saccharum*) et le hêtre (*Fagus Sylvatica*), ainsi qu'une plus faible proportion de peuplements résineux dominés par le sapin baumier (*Abies Balsamea*) et l'épinette blanche (*Picea Glauca*) (Ministère des Ressources Naturelles du Nouveau-Brunswick, 2007; Gouvernement du Québec, 2022). Bien qu'aucune caractérisation n'ait été effectuée spécifiquement sur le territoire du BV, deux espèces de plantes vasculaires reconnues comme étant en péril selon la *Loi sur les espèces menacées d'extinction* du Nouveau-Brunswick ont été identifiées dans la région du Nord-Ouest, dont l'espèce endémique de la pédiculaire de furbish (*Pedicularis Furbishiae*) (Comité de l'aménagement rural du Nord-Ouest [CARNO], s. d.). De plus, lors d'une étude terrain en 2018 par l'OBV Saint-Jean, plusieurs espèces de poissons ont été recensées, soit le mulot à corne (*Semotilus atromaculatus*), le naseau noir, l'épinoche à cinq épines (*Culaea inconstans*), le mulot de lac (*Couesius plumbeus*) et le meunier noir (*Catostomus commersonii*). Le bassin versant présente également plusieurs habitats favorables pour l'omble de fontaine (*Salvelinus fontinalis timagamiensis*), désignée comme espèce en voie de disparition en vertu de la *Loi sur les espèces en péril* du Canada.

1.1.4 Climat

Le climat du territoire est de type continental froid, répertorié sous le code Dfb selon la classification de Köppen-Geiger (Institut Français de l'Éducation, 2014). Celui-ci est caractérisé par un écart-type des températures intersaisonnières très important, marqué par des hivers très froids et des étés tempérés. Par ailleurs, les fonds de vallées du BV disposent de microclimats en raison du relief prononcé du territoire, ce qui accentue les périodes de gel, étant plus hâtives à l'automne et plus tardives au printemps (CARNO, s. d.).

Les précipitations sont abondantes, tant sous forme solide que liquide, et sont réparties sur tous les mois de l'année (OBV Saint-Jean, 2016). La figure 1.4 présente le diagramme climatique de la ville d'Edmundston, où se situe la station météorologique la plus près. En l'absence d'un registre de la pluviométrie sur le territoire du BV, nous pouvons cependant considérer que les hauteurs de précipitations moyennes sont supérieures sur celui-ci en raison des processus thermodynamiques de la condensation, augmentant les niveaux pluviométriques en conjonction à la hausse en altitude. Nous supposons également que les températures moyennes sont légèrement plus basses, à raison d'une diminution de 0,6 °C par 100 mètres d'altitude. (Finlayson-Pitts et Pitts, 2000) où se situe la station météorologique la plus près.

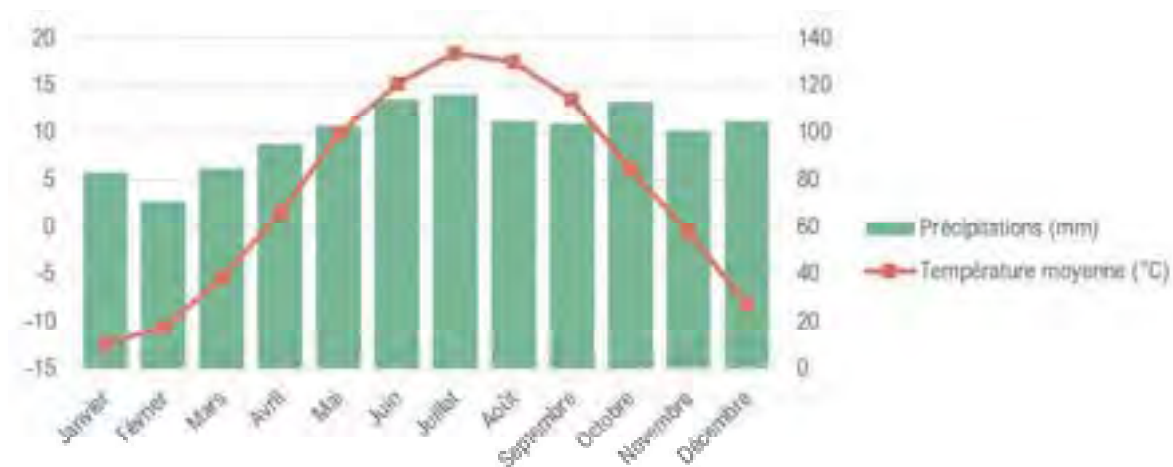


Figure 1.4 Diagramme ombrothermique de la ville d'Edmundston (adapté de climate-data.org)

1.2 OCCUPATION DU TERRITOIRE

Le territoire du bassin est caractérisé par la prépondérance du couvert forestier. En effet, les types de couverture des sols principaux sont les forêts ayant un couvert de 75 à 100%, couvrant 52,5 % de la superficie totale, suivis de forêts ayant un couvert de 25 à 75 % pour 21,2 %. Des plantations à différents stades de maturité couvrent 11,9 % du territoire, composées principalement de jeunes plantations. Enfin, 6,2 % du bassin a fait l'objet de coupes totales, incluant une ligne de transport d'énergie traversant le paysage au centre nord. De cette superficie, un peu plus de la moitié est en régénération.

De plus, 0,9 km² du bassin est dédié aux activités agricoles, représentant 0,8 % du territoire. Situées principalement au Nouveau-Brunswick, celles-ci sont dédiées majoritairement au pâturage et à la culture fourragère de foin et de céréales.

D'autre part, les secteurs bâtis et construits totalisent près de 1,3 km², soit 1,1 % de la superficie totale. La majorité de la zone résidentielle se trouve en aval de la rivière à la Truite près de son exutoire. Le secteur industriel est composé de carrières actives, de lagunes d'eau potable non utilisées, de bâtiments industriels, d'entrepôts et de stationnements. Les infrastructures routières, incluant les routes principales et secondaires, les chemins forestiers et les sentiers pédestres et motorisés, couvrent 1,7 % du territoire pour un total de 2 km². Une portion du territoire est dédiée aux activités récréatives, incluant un terrain de golf abandonné et un parc.

Par ailleurs, la tenure des terres boisées est entièrement publique dans la portion québécoise du BV. Concernant le territoire situé au Nouveau-Brunswick, la majorité des terres sont des lots boisés privés, totalisant une superficie de 57 km², tandis que 12 km² sont des terres de la couronne. (OBV Saint-Jean, 2018 ; Coulibaly, s. d.; Gouvernement du Québec, 2022; Gouvernement du Nouveau-Brunswick, s. d.)

Enfin, en 2016, le recensement de la population de la municipalité d'Edmundston dénombrait 16 580 habitants, selon une densité de 155,2 par km² (Statistiques Canada, 2016). Les données exactes pour le quartier Saint-Jacques ne sont pas disponibles.

1.3 GESTION DE L'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE ET DES RESSOURCES HYDROLOGIQUES

Au Canada, la compétence en matière de gestion de l'environnement est partagée selon les trois ordres gouvernementaux, soit le gouvernement fédéral, le gouvernement provincial et les municipalités. Cette répartition des pouvoirs est structurée selon une hiérarchie politico-juridique de type « top-down » de plus en plus spécifique où chaque entité politique doit s'aligner avec les décisions des paliers plus élevés. À l'échelle provinciale, le gouvernement met en place certaines lois habilitantes et politiques pour les municipalités en matière d'environnement, de développement durable et d'aménagement. Selon l'article 109 de la Constitution canadienne, les gouvernements provinciaux sont également responsables de la gestion des terres publiques. Les principales lois fédérales offrant des outils aux administrations provinciales sont la *Loi canadienne sur la protection de l'environnement* (LCPE), la *Loi sur les espèces en péril* et la *Loi sur les pêches* qui protège l'habitat des poissons. La première concerne plus particulièrement la prévention de la pollution, tandis que la deuxième vise à protéger les espèces indigènes et leurs habitats. La gestion des eaux continentales relève principalement de la compétence provinciale. Le gouvernement fédéral s'est toutefois engagé à la création d'une Agence canadienne de l'eau pour la gestion transversale de cette ressource (Gouvernement du Canada, 2021).

1.3.1 Cadre politique et réglementaire au Québec

Concernant la gestion de l'eau au Québec, celle-ci est confiée aux organismes de bassins versants (OBV) en vertu de l'article 14 de la *Loi sur l'eau* de 2009. Leurs principaux mandats sont de concerter les acteurs de l'eau, sensibiliser la population et promouvoir la gestion intégrée des ressources en eau (GIRE), notamment par le biais de l'élaboration d'un Plan directeur de l'eau (Regroupement des organismes de bassins versants du Québec [ROBVQ], 2019). Le territoire du BV de la Rivière-à-la-Truite s'intègre ainsi à l'unité hydrographique de l'OBV du Fleuve Saint-Jean. Par ailleurs, plusieurs lois, politiques et programmes encadrent certaines composantes de la GIRE dans la province. En plus de la *Loi sur l'eau*, la *Politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables* (PPRLPI) et la *Loi concernant la conservation des milieux humides et hydriques* imposent plusieurs restrictions afin de limiter les impacts sur les milieux aquatiques et humides. Celles-ci viennent notamment compléter le régime d'autorisation environnemental requis selon la *Loi sur la qualité de l'environnement* (LQE). La PPRLPI oblige également les municipalités régionales de comté (MRC) à réaliser un Plan régional des milieux humides et hydriques (PRMHH).

Dans la pratique, l'exécution de ces lois habilitantes revient aux municipalités par le biais de la réglementation. En vertu de la *Loi sur l'aménagement et l'urbanisme* (LAU) et de la *Loi sur les compétences municipales* (LCM), celles-ci ont notamment les pouvoirs requis pour protéger les milieux humides et les ressources hydriques présents sur leurs territoires. Concernant la gestion des forêts publiques, le bassin est situé sur le territoire de l'unité d'aménagement forestier 011-71. En vertu de la *Loi sur l'aménagement durable du territoire forestier* (LADTF), le ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP) doit produire un plan d'aménagement forestier intégré tactique (PAFIT) qui prévoit les stratégies pour l'aménagement durable des activités sylvicoles (MFFP, 2015). En outre, la réglementation québécoise prévoit la conservation d'une lisière boisée de 20 mètres en bordure des milieux humides avec possibilité de récolte partielle et interdisant le passage de la machinerie. Enfin, la *Loi sur les espèces menacées et vulnérables* (LEMV) impose certaines protections pour les espèces fauniques et floristiques.

1.3.2 Cadre politique et réglementaire au Nouveau-Brunswick

Au Nouveau-Brunswick, plusieurs lois encadrent la gestion des ressources hydrologiques du territoire. Tout d'abord, la *Loi sur l'assainissement de l'eau*, le *Règlement sur la modification des cours d'eau et des terres humides* et la *Politique de conservation des terres humides* restreignent les interventions ou les perturbations du sol à proximité des cours d'eau et des zones humides et lacustres. Par ailleurs, bien qu'aucun prélèvement d'eau potable ne soit actuellement effectué sur le territoire, le BV est considéré comme étant un secteur protégé en vertu du *Décret de désignation du secteur protégé de bassins hydrographiques*. Cette affectation règlemente trois zones tampons de protection autour des cours d'eau auxquelles sont associées des limitations sur les activités permises, notamment en matière de foresterie et d'agriculture, afin d'assurer le respect de plusieurs normes quantitatives et qualitatives (Gouvernement du Nouveau-Brunswick, s. d.). Bien que la gestion par bassin versant soit préconisée dans les plans et les stratégies provinciales, notamment dans la *Stratégie de l'eau*, aucun organisme spécifique n'est assigné pour celle-ci (MEGL, 2018). La GIRE est ainsi davantage une compétence partagée entre les commissions des services régionaux et les municipalités sous l'égide du ministère de l'Environnement et des Gouvernements locaux (MEGL).

En effet, en matière d'aménagement du territoire, la planification de l'utilisation des terres dans les bassins versants est règlementée par la *Loi sur l'urbanisme* et la *Loi sur la gouvernance locale* à l'aide de divers outils tels que les plans municipaux, les arrêtés de zonage, les plans ruraux et les déclarations de perspectives d'urbanisme. À noter qu'un projet de réforme de la gouvernance locale est en cours, ce qui entraînera d'importantes modifications à ces lois. Par ailleurs, les forêts publiques de la province sont règlementées par la *Loi sur les terres et forêts publiques*. Cependant, au niveau des lots boisés privés, il

n'existe que peu de mécanismes législatifs règlementant directement l'aménagement forestier. En effet, outre le respect des lois applicables mentionnées dans le paragraphe précédent, seuls les bandes tampons riveraines et les passages à gué présentent des restrictions. Les types de coupes et les modalités de régénération forestière ne font l'objet que de recommandations selon le calcul de la possibilité annuelle de coupe (Pépin, 2005). Enfin, la *Loi sur les espèces menacées d'extinction* limite également les perturbations environnementales afin de protéger certaines espèces fauniques et floristiques.

D'autre part, plusieurs stratégies et plans posent les bases des objectifs provinciaux et municipaux en matière de GIRE. Les principaux recensés pour la région sont la *Stratégie de l'eau* (MEGL, 2018), la *Stratégie de réduction des risques d'inondation du Nouveau-Brunswick* (Gouvernement du Nouveau-Brunswick, 2014) et le *Plan d'adaptation aux changements climatiques* de la ville d'Edmundston (Groupe Aster, 2020).

1.3.3 Parties prenantes

La gestion de l'aménagement du territoire et des ressources hydriques implique plusieurs acteurs aux intérêts et préoccupations variés. Afin de bien considérer l'ensemble de ceux-ci dans un contexte de GIRE, la figure 1.5 présente une synthèse de ces parties prenantes dans le bassin versant selon leurs degrés d'influence sur la problématique, ainsi que les principales relations les reliant.

2. ANALYSE DES RISQUES ET DES ENJEUX

Les inondations surviennent lorsque le débit du cours d'eau excède la capacité hydraulique du lit mineur, entraînant un débordement vers les terres adjacentes d'altitudes inférieures (Miguez et Veról, 2016). Ce phénomène constitue un processus naturel des dynamiques fluviales et exerce diverses fonctions écologiques et biochimiques. En effet, l'inondation des plaines favorise l'apport d'éléments nutritifs et de sédiments dans les cours d'eau et la ripisylve. Cette fonction permet ainsi d'augmenter la productivité biologique des écosystèmes et la fertilité des sols. De plus, les inondations permettent de réduire l'accumulation de sédiments et favorisent une variabilité de niches écologiques, renforçant la biodiversité en aval des bassins versants. (WWF, 2017 ; Bridges et al., 2021)

Cependant, plusieurs problématiques peuvent survenir lorsque les rivières inondent les territoires dédiés à l'occupation et aux activités humaines, causant le bouleversement des systèmes sociaux et des pertes économiques substantielles. L'échelle des perturbations varie de problèmes mineurs de drainage urbain aux débordements majeurs, causant des dommages considérables aux infrastructures et pouvant causer l'interruption de services essentiels, la déconnexion des voies de transports, la dissémination de maladies d'origine hydrique et l'atteinte à la sécurité physique et psychologique des individus. (Ouranos, 2021 ; WWF, 2017)

Dans le cadre de cette étude, la notion d'inondation se fonde sur l'approche conceptuelle du risque, présenté à la figure 2.1. Selon cette théorie, le risque est fonction de l'aléa climatique, de la vulnérabilité et de l'exposition de la société (Organisation des Nations Unies [ONU], 2019 ; Scarwell et Laganier, 2004).



Figure 2.1 Approche conceptuelle du risque d'inondation (adapté de IPCC, 2012 et ONU, 2019)

Le risque d'aléa climatique est caractérisé selon la loi probabiliste de période de retour des crues, soit « le temps statistique entre deux phénomènes d'une intensité donnée. » (Institut national de la recherche agronomique [INRAE], 2019). De la sorte, la modélisation des risques d'inondation démontre des événements à récurrence de 20 et 100 ans dans la portion aval du BV Rivière-à-la-Truite (voir figure 2.2). Les volumes d'eau totaux des surfaces inondées sont estimés à 1.4 et 1,6 million de m³ pour les événements respectifs de période de retour de 20 et 100 ans (Labelle, 2022). La magnitude et la fréquence du risque peuvent être également exacerbées par plusieurs facteurs, tant naturels qu'anthropiques. En amont des bassins versants, les risques pour l'humain sont davantage liés aux processus d'érosion, tandis qu'en aval, ceux-ci sont davantage liés à la submersion et à la destruction des infrastructures (Bridges et al., 2021 ; Miguez et Veról, 2016)



Figure 2.2 Carte des zones inondables (adaptée de Service Nouveau-Brunswick, 2022)

L'exposition quantifie et caractérise le nombre de propriétés, personnes, infrastructures ou habitats pouvant être exposés à l'aléa. Il est estimé que pour les événements de 20 et 100 ans, 0.8 et 0.9 km² de superficie seront inondés dans le bassin versant (Labelle, 2022). En considérant la carte des zones inondables, jusqu'à 433 bâtiments sont à risque d'être inondés pour la période de retour de 100 ans. Ces bâtiments incluent des propriétés privées et commerciales, ainsi que certaines infrastructures municipales. De plus, l'usine de traitement des eaux usées et son bassin de décantation se trouvent en plaine inondable, posant le risque de contamination des eaux en aval. Par ailleurs, plusieurs embouchures d'égouts sanitaires sont à risque d'être submergées sur le territoire, ayant précédemment occasionné des déversements d'eau contaminée dans les

cours d'eau. Plusieurs routes, principales et secondaires, sont également à risque de submersion et d'emportement, dont un tronçon de l'autoroute Transcanadienne. Cette dernière représente la principale voie d'évacuation du district, ainsi que d'accès aux services d'urgence tels que les hôpitaux, les postes de police et les casernes de pompier. Par ailleurs, six ponts se situent en zone inondable, dont trois évalués comme ayant une capacité hydraulique insuffisante à supporter les hautes eaux de la rivière (Groupe Aster, 2020). De plus, un important tronçon de la piste cyclable présente des risques de submersion et d'érosion. Les écosystèmes les plus exposés aux inondations sont les territoires à l'état naturel, notamment près de l'exutoire.

La vulnérabilité réfère à la capacité des communautés exposées à se rétablir après la catastrophe naturelle, soit sa résilience (Sayers et al., 2013). Les caractéristiques socio-économiques de la population de la municipalité d'Edmundston présentent certaines vulnérabilités particulières relativement aux statistiques provinciales. Tout d'abord, le revenu total moyen de la population (36 517\$) est légèrement inférieur à la moyenne provinciale (39 141\$) et la fréquence du faible revenu (20,7%) est plus élevée que la moyenne provinciale (17,1%). Représentant 28 % de la population, les personnes âgées de 65 ans et plus sont considérées comme étant davantage vulnérables aux risques d'inondation (Statistique Canada, 2016). Notamment, deux foyers de personnes âgées sont recensés dans la zone inondable. En contrepartie, un système de surveillance des hauteurs d'eau est positionné à hauteur du pont sur le boulevard Isidore-Boucher, ainsi qu'un système de contrôle et d'acquisition de données en temps réel (SCADA) situé dans un trou d'homme. Ces installations permettent de réduire la vulnérabilité en avertissant les autorités lors de crues. L'absence de jaugeage des cours d'eau restreint toutefois les informations disponibles. Par ailleurs, il a été mentionné par un intervenant des services d'urgence que la fiabilité des prévisions météorologiques dans le secteur est faible, en raison de la position éloignée des radars. Cette situation réduit ainsi la marge de manœuvre des autorités à agir préventivement. D'autre part, la faible anthropisation de la portion à l'exutoire de la rivière et de ses milieux humides constitue une caractéristique de résilience naturelle de l'hydrosystème. En effet, nous y retrouvons un complexe de méandres, de bras morts et de végétation qui permet d'absorber une partie des hautes eaux. Enfin, aucun habitat faunique ou floristique d'espèces vulnérables n'est particulièrement à risque d'inondation. Cependant, ce constat résulte potentiellement du manque de caractérisation pour le territoire à l'étude.

2.1 HISTORIQUE DES INONDATIONS

La région du Nord-Ouest du Nouveau-Brunswick a connu plusieurs occurrences d'inondations de sévérités variables lors des dernières années. L'historique des principales inondations pour le quartier Saint-Jacques

est présenté au tableau 2.1. Considérant les répercussions potentielles des crues du bassin versant Rivière-à-la-Truite en aval de celui-ci, les inondations majeures récentes de cette région, soit la ville d'Edmundston, ont également été répertoriées. Il est à noter qu'il existe certaines défaillances quant au recensement des détails des inondations, notamment pour les événements récents.

Tableau 2.1 Historique des inondations (adapté de : MEGL, 2012)

	DATES	CARACTÉRISATION DES DOMMAGES	MONTANTS	CAUSES
DISTRICT DE SAINT-JACQUES	Août 1976	Effondrement de la route principale (30 m) et de nombreux ponceaux. Submersion de la route Transcanadienne Création d'affouillements profonds	154 930 \$	Ouragan Belle : averses de pluie torrentielle et forts vents
	Juillet et août 1992	Emportement de la rue de la Montagne. Inondation de résidences (100) Dommages pont Saint-Jacques, rue Industrielle et chemin Rivière-à-la-Truite. Transport de boues et de débris	3 796 000 \$	Averses de pluie torrentielle
	Janvier 1996	Submersion de routes	85 700 \$	Temps doux, averses de pluie torrentielle, embâcle de glace
	Août 2004	Submersion des chemins Rivière-à-la-Truite et Mont Farlagne et des rues Réservoir et Demers Inondation de résidences	Non disponible	Tempête extratropicale Bonnie : averses de pluie torrentielle
	Avril et mai 2008	Inondation de résidences Effondrement de berges Submersion des égouts sanitaires	Non disponible	Temps doux, averses de pluie torrentielle, refoulement de la rivière Madawaska
EDMUNDSTON ET RÉGION	Avril et mai 2008	Submersion et emportement de routes, ponts et chemins de fer Inondation de résidences (631)	23 288 000 \$	Temps doux, averses de pluie torrentielle, fonte des neiges, chutes de neige
	Avril et mai 2018	Submersion et emportement de routes, ponts et ponceaux (140) Inondation de résidences (≈ 12 000) Interruption des services postaux, de livraison et d'énergie	≈ 75 000 000 \$	Temps doux, averses de pluie torrentielle, fonte des neiges, vents, embâcle de glace
	Avril et mai 2019	Submersion et emportement de routes, ponts et ponceaux Inondation de résidences	Non disponible	Temps doux, averses de pluie torrentielle, fonte des neiges, embâcle de glace

Le principal type d'inondation observé est celui en eau libre, causé par une augmentation significative des volumes d'eau dans les chenaux (OBV Saint-Jean, 2016). Celui-ci peut être causé soit par une densité

pluviométrique importante lors d'une averse, soit par la fonte rapide du couvert nival lors des périodes de dégel, soit par une combinaison de ces deux aléas (Ouranos, 2018 ; WWF, 2017). Ainsi, les inondations sur le territoire sont principalement associées aux conditions printanières. Lors de cette période, les sols sont habituellement saturés en eau, entravant ainsi l'infiltration et provoquant un ruissellement important et rapide des pluies vers les rivières (OBV Saint-Jean, 2016). Quelques inondations par embâcle de glace ont également été recensées, dont une à l'embouchure de la rivière à la Truite en 1996 (MEGL, 2012). Par ailleurs, les débits cumulés de la rivière et de ses tributaires peuvent contribuer à l'aggravation des conditions propices aux inondations en aval. En effet, lors d'averses ou de fonte des neiges importantes, les débits des différents affluents de la rivière Madawaska et du fleuve Saint-Jean peuvent se synchroniser, transportant de grands volumes d'eau vers les régions urbaines de plus basses altitudes. Ainsi, les inondations de la région sont principalement observées à la confluence des rivières (OBV Saint-Jean, 2016). Par ailleurs, lorsque les niveaux d'eau sont déjà importants à l'embouchure sur la rivière Madawaska, nous observons un refoulement des eaux de la rivière à la Truite, aggravant les risques de débordement. Enfin, considérant que la totalité des zones résidentielles est située dans la portion au Nouveau-Brunswick du BV, tous les aléas d'inondations sont également observés dans cette région. De plus, des inondations par retour d'eau dans les canaux d'égouts pluviaux surviennent de façon récurrente au printemps. Lorsque la hauteur de la rivière dépasse le niveau de l'embouchure du canal, les eaux refoulent dans les tuyaux, inondant les zones urbaines.

Afin de limiter les dommages causés par les débordements de la rivière à la Truite, une station de pompes à diesel est utilisée lors d'averses importantes dans le prolongement de la rue Théo, en amont du pont sur le boulevard Isidore-Boucher. Cependant, cette solution est dispendieuse d'un point de vue monétaire et énergétique, entraînant des frais jusqu'à 45 000\$ par année pour la municipalité. De plus, elle ne représente pas une solution durable au problème d'inondation. En effet, il existe des risques considérables associés à la défaillance du système ou la non-disponibilité des pompes lors d'une situation d'urgence. Par ailleurs, le signal SCADA, enclenchant la mise en place des pompes, fut rehaussé dans les dernières années afin de réduire la période de pompage de 7 à 2 semaines. Bien que cette procédure réduise les coûts pour la municipalité, elle diminue également la marge de manœuvre temporelle afin de réagir lors d'une crue rapide. Il est ainsi pertinent d'identifier les facteurs aggravants en amont afin de caractériser adéquatement la problématique et adopter des mesures préventives.

2.2 MODIFICATIONS DU TERRITOIRE CONTRIBUANT AUX RISQUES D'INONDATION

La compréhension et l'évaluation des dynamiques fluviales et des risques d'inondation relèvent des conditions spécifiques du territoire concerné. Outre les caractéristiques physiques identifiées dans la section

1.1, plusieurs facteurs naturels et anthropiques sont à l'origine des phénomènes de crue dans le BV Rivière-à-la-Truite. L'identification de ceux-ci fut obtenue par l'analyse des caractéristiques physiques et climatiques du bassin, la consultation de divers documents internes et scientifiques, des rencontres avec des acteurs locaux et une visite sur le terrain effectuée le 7 juin 2022. Ainsi, les principaux facteurs se divisent en trois catégories, soit les modifications hydromorphologiques, les altérations des dynamiques sédimentaires et l'aménagement du territoire.

2.2.1 Modifications hydromorphologiques

L'hydromorphologie d'un réseau hydrographique, soit la forme des rivières, est dynamique et adaptative en fonction des conditions physiques et climatiques du bassin versant. Le tracé fluvial résulte ainsi d'une recherche constante d'équilibre entre l'énergie de l'eau, déterminée par la pente et le débit de la rivière, et la charge en matériaux, fonction de leurs quantités et granulométries. Ainsi, principalement en aval des BV, les rivières ont tendance à créer des méandres où s'alternent les rives d'érosion et de sédimentation. Ces transformations sont évolutives dans le temps et l'espace, créant des paysages en mosaïque de seuils et de mouilles, de bras morts et de milieux humides. Ce processus naturel participe également à la création d'habitats variés et de niches écologiques. Des altérations à l'hydromorphologie naturelle des rivières entraînent donc des déséquilibres entre les charges hydrauliques et la mobilisation et le transport de sédiments. (WWF, 2017 ; Fort, Bétard et Fasseta, 2015)

Barrages de castor

Un premier impact modificateur observé sur le territoire est la présence de nombreux barrages de castors. En effet, lors d'une étude sur le terrain effectuée en 2017, 38 barrages ont été recensés (CARNO, 2017a). Ces digues créent des bassins où l'eau est emmagasinée de façon permanente ou temporaire. Généralement, les étangs de castors ont des impacts bénéfiques, puisqu'ils réalisent plusieurs fonctions écosystémiques. De ce fait, la création de zones de rétention dans le système hydrique permet de réduire la vitesse des cours d'eau et d'atténuer les processus d'érosion causés par les débits de pointe (Westbrook et al., 2006). En emmagasinant l'eau et en régularisant les flux d'écoulements, ces bassins peuvent ainsi réduire les répercussions des inondations, notamment lors des périodes de fonte des neiges ou de pluies abondantes. De plus, ils constituent des zones humides propices à l'habitat de plusieurs espèces telles que la sauvagine, les amphibiens, les batraciens, le cerf de Virginie et autres mammifères. Cependant, l'obstruction des rivières peut également entraver la migration des poissons et contribuer au colmatage des frayères. De plus, le ralentissement des eaux amplifie les processus de décomposition, générant une accumulation de sédiments

et de matière organique qui réduit la quantité d'oxygène disponible dans l'eau et augmente la turbidité. (Duchesne et al., 2013; Fortin et al., 2001)

Malgré leurs bénéfices pour la régulation des niveaux d'eau, la rupture d'un barrage, sous l'effet de fortes pluies ou s'il n'est plus entretenu par le castor, peut provoquer une inondation subite en aval de celui-ci. Ce risque est d'autant plus amplifié lorsque les barrages sont construits en série le long d'une rivière, emmagasinant d'importants volumes d'eau qui cèdent en cascade (Duchesne et al., 2013). Plusieurs cas de construction de barrages en séries ont été recensés sur la rivière à la Truite et ses tributaires. Les dommages causés peuvent entraîner l'inondation des routes, des sentiers et des terres adjacentes, en plus d'amplifier les phénomènes de crues. L'activité du castor peut également provoquer l'érosion des remblais des chemins et le colmatage de l'entrée des ponceaux (Fortin et al., 2001). Ce phénomène est accentué par la prédilection des castors à construire leurs barrages à proximité des ponceaux en raison des stimuli auditifs associés à la réduction de la largeur des ruisseaux (voir annexe 1) (Tremblay, 2010).

Par ailleurs, l'augmentation observée du nombre de castors dans la région peut être associée à la prolifération d'essences feuillues pionnières en réponse aux activités forestières. Ce phénomène, connu sous le nom d'enfeuillement, crée un milieu favorable à l'implantation du castor qui préfère les bois tendres (Duchesne et al., 2013). De ce fait, la problématique d'enfeuillement a été observée dans l'unité d'aménagement forestier située dans la portion québécoise du bassin. Autrefois dominée par des espèces résineuses, la forêt est maintenant composée de 43,8% de feuillus, 32,8% mélangés et 23,4% de résineux (MFFP, 2018). Une autre cause potentielle de la prolifération de barrages est la diminution de la prédation du castor. Cette situation est associée à la réduction des populations de son principal prédateur, le loup, ainsi qu'à la baisse du trappage en raison de la dépréciation du prix des fourrures (OBV Saint-Jean, 2016).

Modifications du lit de la rivière

Le réalignement et la stabilisation des cours d'eau sont des pratiques d'ingénierie conventionnelles courantes pour le contrôle des débordements en zones urbaines. Ainsi, l'analyse de photographies aériennes de 1967 et 2018 démontre que la zone aval de la rivière à la Truite a subi plusieurs modifications par interventions anthropiques durant les dernières décennies (voir figure 2.3). Ainsi, la sinuosité du cours d'eau a été réduite par la linéarisation et le comblement de bras secondaires sur plusieurs endroits. De plus, d'importantes superficies autrefois occupées par des milieux humides ont été remblayées afin d'accommoder le développement résidentiel et la construction de l'autoroute Transcanadienne. Ces modifications sont notamment visibles dans le secteur entre la route principale et l'autoroute. Les rives de cette section de la rivière ont également été rehaussées et stabilisées par des murs de retenue de gabions, remplaçant les

berges naturelles. Par ailleurs, la rivière fut réaménagée en amont de l'autoroute pour l'installation de lagunes, causant une perte de la complexité morphologique et un remblaiement des milieux humides et de bras secondaires. Autrefois dédiés à l'approvisionnement en eau potable, ces bassins ne sont aujourd'hui plus en fonction.



Figure 2.3 Évolution de la morphologie de la rivière à la Truite entre 1967 et 2018

De façon générale, l'impact de ces modifications sur la dynamique et les habitats fluviaux sont nombreux. Tout d'abord, l'enrochement artificiel entrave les processus géodynamiques naturels de l'érosion des berges, aggravant ainsi les phénomènes d'incision du lit de la rivière et appauvrissant la qualité écologique des rives (Malavoi et Adam, 2007). De plus, ces mesures de protection des berges déconnectent le cours d'eau de la plaine inondable, qui permet normalement le stockage temporaire des eaux lors de hautes crues. Ainsi, la suppression de ces zones naturelles de débordement peut aggraver les inondations en aval (Bridges et al., 2021). L'enrochement restreint également l'aire de la section transversale du cours d'eau et réduit l'absorption du courant par la rive, favorisant une montée rapide de la hauteur d'eau durant les phénomènes de crue (Reid et Church, 2015).

De plus, les milieux humides exercent plusieurs fonctions de régularisation des niveaux d'eau dans un réseau hydrographique. En période de crue, ils stockent l'eau et agissent comme bassins de rétention naturels. En période estivale, une partie du volume d'eau stocké est libérée vers la rivière et permet d'atténuer la sévérité de l'étiage (Joly et al., 2008). Le remblaiement de ces milieux en zone de plaine inondable affecte ainsi le régime hydrologique du cours d'eau en réduisant sa capacité de stockage. La dégradation des milieux humides cause également une perte nette de nombreux biens et services écologiques tels que la séquestration du carbone, la filtration de la pollution et le soutien des habitats fauniques et floristiques (Ouranos, 2017).

La linéarisation du lit de la rivière affecte également l'équilibre fluvial en modifiant les dynamiques d'écoulement et de débits. En raison de leur morphologie, les méandres permettent de dissiper une partie de l'énergie cinétique de la rivière. Ainsi, la substitution de la sinuosité naturelle des méandres pour un tracé rectiligne entraîne l'incision du lit de la rivière. Cette transformation modifie le profil longitudinal du cours d'eau par l'accentuation de la pente, occasionnant une accélération des vitesses d'écoulement (Brookes, 1988; Malavoi et Adam, 2007). Ce phénomène entraîne l'augmentation des débits de pointe et donc, des phénomènes de crue en aval du réalignement (Zachary et al., 2003). Le reprofilage des méandres diminue également la surface linéaire de la rivière, réduisant sa capacité de stockage. L'augmentation du courant de la rivière est également liée à l'amplification de la force érosive des courants. Ainsi, les rivières altérées tendent à reprendre leurs tracés initiaux, générant de nombreux problèmes structurels en zones urbaines (Bridges et al., 2021). Par ailleurs, l'ablation des rives alternantes d'érosion et de dépôt peut provoquer un dépôt excessif de sédiments, aggravant l'aléa en cas de crue (Centre Européen de Prévention des Risques d'Inondation [CEPRI], 2022). De ce fait, trois bancs de sédimentation problématiques ont été recensés dans ce secteur, soit en amont du pont sur le boulevard Isidore-Boucher, du pont de la rue Demers et du pont de la piste cyclable (voir annexe 1). Bien que les causes exactes de l'origine de cette sédimentation soient

incertaines, nous pouvons supposer qu'elle est amplifiée par une combinaison de facteurs, incluant la linéarisation du lit, l'érosion et la présence de ponts et ponceaux.

Ponts et ponceaux

Sur le territoire du BV Rivière-à-la-Truite, 80 ponts et ponceaux ont été recensés, dont 55 au Québec et 25 au Nouveau-Brunswick (OBV Saint-Jean, 2018). Toutefois, plusieurs de ces infrastructures ont été conçues et installées il y a plusieurs années et ne sont plus adéquates pour accommoder les débits d'eau et les débris transportés lors des crues actuelles. De ce fait, une étude a démontré que près de 75 % des ponceaux de la région du Nord-Ouest au Nouveau-Brunswick sont sous-dimensionnés (Groupe Aster, 2020). En réduisant l'espace disponible pour le libre écoulement des eaux, ces ouvrages non adaptés peuvent causer une retenue d'eau en amont lorsque les débits augmentent, causant des inondations et des problèmes de drainage (Association des gestionnaires régionaux des cours d'eau du Québec [AGRCQ], 2016). Sous la force de l'eau, ces infrastructures peuvent également céder, entraînant une surcharge hydraulique dans les cours d'eau qui exacerbe les phénomènes d'inondations (voir annexe 1) (Ministère de l'Environnement du Nouveau-Brunswick, 2012). Par ailleurs, même s'ils ont la capacité pour supporter les hautes eaux, plusieurs ponts et ponceaux sont trop étroits et rétrécissent la largeur de la rivière. Ce phénomène cause un effet d'entonnoir, accélérant la vitesse d'écoulement et augmentant l'érosion et la sédimentation en aval (AGRCQ, 2016). De ce fait, la pose récente d'un pont plus étroit sur la piste cyclable par le ministère des Transports a entraîné un rétrécissement important de la rivière à ce niveau.

En effet, malgré les connaissances notables quant à la problématique des ponts et ponceaux sous-dimensionnés dans la région, sa résolution est entravée par la complexité des structures politiques. La responsabilité de ces ouvrages est partagée entre plusieurs instances gouvernementales, soit entre la municipalité et le ministère des Transports et des Infrastructures au Nouveau-Brunswick, et entre les aménagistes forestiers et le ministère des Transports au Québec.

2.2.2 Altération des dynamiques sédimentaires

Comme mentionné dans la section précédente, la dynamique du système fluvial résulte d'un équilibre hydrosédimentaire en constante évolution. La quantité de sédiments présente dans un bassin versant dépend de sa topographie, sa géologie, sa météorologie et les types de couvert de la végétation, d'occupation des terres et d'utilisation des sols (Ontario Ministry of Natural Resources, 2001). La présence de sédiments dans les cours d'eau est essentielle pour la diversification des habitats et l'apport d'éléments nutritifs (Hauer et al., 2018). Cependant, l'excès de sédiments, résultant notamment d'activités anthropiques, peut entraîner des répercussions physiques et écologiques néfastes pour l'hydrosystème. Pour la rivière Madawaska, à

l'embouchure du BV Rivière-à-la-Truite, des indices de turbidité néphélométrique de 5 à 6 fois supérieurs à la norme recommandée de turbidité (8 uTN) ont été constatés, principalement liés aux crues printanières (OBV Saint-Jean, 2016). De ce fait, une augmentation notable de la turbidité est recensée par les résidents durant les périodes de fortes pluies par l'observation d'une couleur brunâtre et de l'opacité de la rivière. De plus, l'augmentation de la bathymétrie par accumulation de sédiments dans la rivière à la Truite est un problème récurrent identifié par les intervenants municipaux. Afin de résoudre la problématique, un dragage fut effectué par la ville en 2018, mais les niveaux sédimentaires se sont reconstitués en 2019 (Groupe Aster, 2020). Les opérations de dragage peuvent entraver l'équilibre écologique naturel par la destruction des milieux aquatiques, diminuant la diversité de niches écologiques et perturbant les chaînes trophiques (Gouvernement du Canada, 2016 ; Stępień et al., 2018).

Pourtant, une étude réalisée par le CARNO en 2017(b) démontre que le BV Rivière-à-la-Truite présente un risque très faible d'érosion en raison de ses caractéristiques physiques, modélisant un taux maximal de sédiments de 6 t/ha/an sur 97 % du territoire. Ainsi, l'accumulation excessive de sédiments dans la rivière résulte vraisemblablement de l'occupation et de l'utilisation du territoire. De ce fait, toute variation des volumes, de la composition et de la disponibilité des sédiments peut induire des modifications importantes de la morphologie du paysage (Bridges et al., 2021). En plus d'augmenter les risques d'inondation par l'élévation du niveau bathymétrique des rivières, la sédimentation peut entraîner d'importants risques pour les écosystèmes aquatiques. En effet, un haut taux de matière en suspension dans les cours d'eau contribue entre autres au colmatage des frayères, à l'eutrophisation et peut causer des problèmes d'inflammation des branchies chez certains poissons (AGRCQ, 2016).

Chemins forestiers et passages à gué

L'une des principales modifications du territoire dans l'ensemble du bassin versant est la présence d'un vaste réseau de chemins forestiers. En effet, près de 367 km linéaires de réseau ont été recensés sur le territoire, représentant 1,3 % du territoire. Ces chemins sont principalement voués à l'industrie forestière, mais sont également utilisés pour les activités récréotouristiques telles que la pratique du véhicule tout-terrain (VTT). La construction de ces routes non pavées augmente les surfaces mises à nu, intensifiant les phénomènes d'érosion sur les chemins et les talus. En effet, l'élimination du couvert végétal expose le sol à l'énergie cinétique des gouttes de pluie. Conséquemment, la couche superficielle du sol est davantage sujette au détachement des particules lors des éclaboussures. Les chemins génèrent ainsi d'importantes quantités de sédiments fins qui sont entraînés vers les cours d'eau durant les pluies par le phénomène de ruissellement (Bérubé et al., 2010 ; Butzen et al., 2014). Par ailleurs, la compaction engendrée par l'utilisation des chemins par les véhicules et la machinerie réduit la capacité d'infiltration des sols.

Au même titre, la circulation de machinerie et de VTT peut endommager le lit des cours d'eau et favoriser l'érosion des sols à proximité de ceux-ci. Malgré la réglementation stricte sur les passages à gué pour l'industrie forestière dans les deux provinces, notamment par le *Règlement sur les normes d'intervention dans les forêts du domaine de l'État* (Québec) et par le *Décret de désignation du secteur protégé de bassins hydrographiques* (Nouveau-Brunswick), certaines problématiques semblent persister. Le manque de surveillance est en cause, ainsi que la complexité méthodologique pour l'identification des cours d'eau intermittents (OBV Saint-Jean, 2016). Plusieurs traversées de cours d'eau ont été observées lors d'une visite sur le terrain dans le bassin versant, malgré l'interdiction de cette pratique (voir annexe 1). Le passage répété de ces véhicules peut entraîner une augmentation de la turbidité dans les cours d'eau, en plus de produire des hydrocarbures aromatiques polycycliques qui nuisent à la qualité de l'eau, et à la faune et la flore aquatique (Chin et al., 2004; Canards Illimités, 2007)

Aménagement des fossés

La mise en place d'un réseau de drainage en milieu forestier permet d'évacuer rapidement les eaux de pluie et permet le drainage des sols, notamment afin d'assurer la stabilité structurelle des chemins. Lors d'une visite sur le terrain, plusieurs kilomètres de fossés dénudés ont été observés sur le territoire (voir annexe 1). On constate également une problématique d'obstruction des ponceaux dans les réseaux de drainage due à l'accumulation de sédiments (Commission des services régionaux Nord-Ouest [CSRNO], 2021). Plusieurs affaissements de ponceaux ont également été observés dans le bassin versant, causant l'inondation localisée des chemins et accentuant les phénomènes de sédimentation. Dans la région québécoise du BV, le creusage et l'entretien des fossés en milieu sylvicole doivent respecter les directives du *Règlement sur l'aménagement durable des forêts du domaine de l'état*. Celui-ci prévoit notamment plusieurs dispositions afin d'atténuer les risques d'érosion et de sédimentation. L'application de ces mesures dans le bassin versant n'a cependant pas fait l'objet d'une caractérisation. Certaines études ont démontré qu'une portion significative des chemins forestiers et de leurs fossés au Québec était non conforme au règlement et mal entretenue, notamment lorsqu'ils sont abandonnés (Lalancette et Movila, 2022 ; Zeco inc., 2004).

La construction et l'entretien de ces fossés génèrent des impacts notoires sur les dynamiques des cours d'eau. En ce qui concerne les bilans hydrologiques, le drainage engendre une augmentation des volumes et de la vitesse du ruissellement lors d'événements pluvieux ou de fontes rapides des neiges. Le temps d'écoulement en est donc écourté, augmentant ainsi les débits de pointe qui exercent une influence directe sur les inondations et les phénomènes d'érosion dans les cours d'eau (MELCC, 2014). Par ailleurs, l'entretien des fossés requiert des opérations de déblayage par pelle mécanique afin de retirer l'accumulation de sédiments obstruant le réseau. Cependant, cette méthode consiste à retirer la végétation sur les deux talus

du fossé, favorisant le détachement de particules sédimentaires qui sont par la suite entraînées vers les cours d'eau (OBV Saint-Jean, 2016).

2.2.3 Aménagement du territoire

Les différents usages du territoire exercent une influence considérable sur les paramètres physiques et biochimiques des milieux naturels. L'anthropisation des écosystèmes naturels affecte ainsi les paramètres du cycle de l'eau à l'échelle paysagère, tels que les conditions de ruissellement, d'écoulement et d'infiltration, ainsi que les capacités de rétention de l'eau sur la surface et dans les sols. De ce fait, il existe une corrélation directe entre, d'une part, les types de couverture du sol, et d'autre part, la capacité du territoire à stocker l'eau et réduire les ruissellements durant les pluies, la plus efficace étant une forêt mature et dense et la moins efficace étant une surface imperméabilisée. La carte présentée à la figure 2.4 permet de visualiser les effets des types de couverture des sols selon leurs impacts sur le cycle de l'eau.

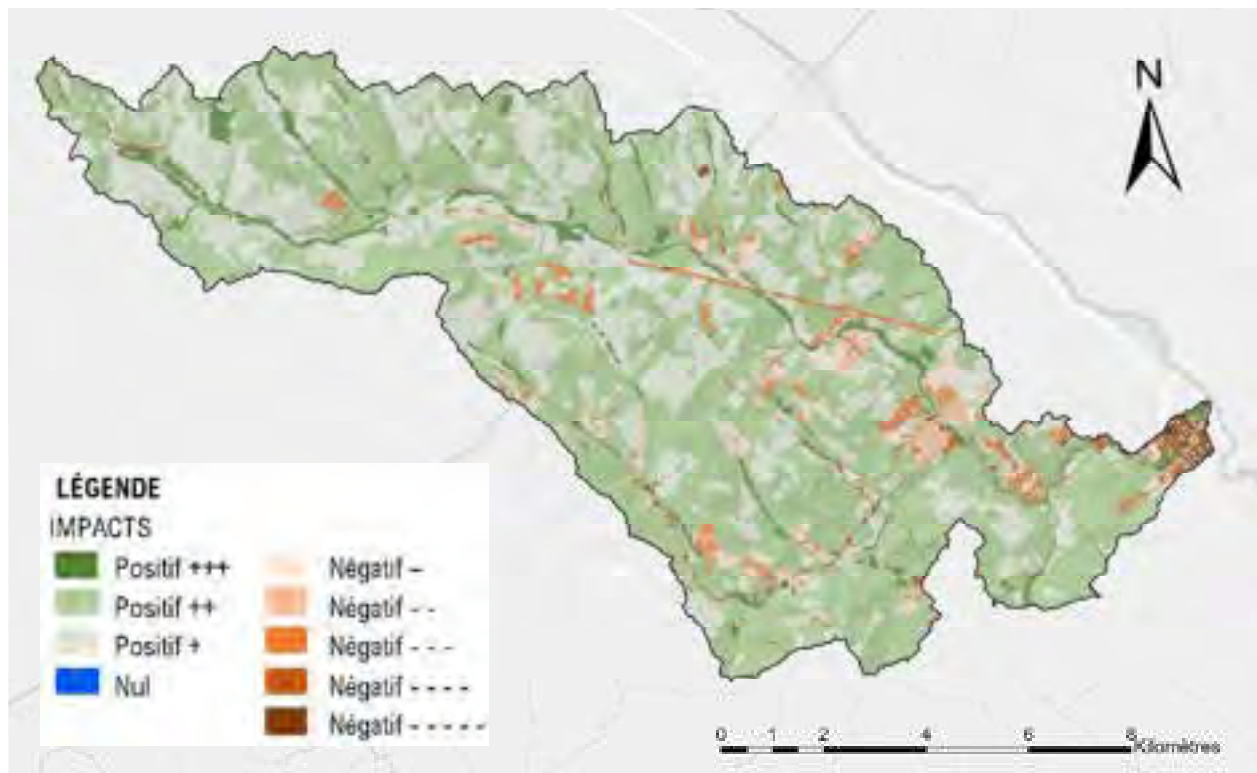


Figure 2.4 Couverture du sol et impacts sur la capacité de régulation des inondations

Coupes forestières

Sur le territoire du bassin versant, 29 % de la superficie totale a été sujette à des interventions sylvicoles récentes, incluant les coupes totales et partielles, et les plantations de stade semis et gaulis. Dans la portion québécoise, les aménagements sont planifiés par le bureau du forestier en chef. Nous y observons

principalement des coupes forestières partielles et des plantations jeunes et immatures, ainsi qu'une faible proportion de coupe totale majoritairement en régénération. Par ailleurs, le bassin est considéré comme une aire d'intensification de la production ligneuse sur la quasi-totalité de son territoire (MFFP, 2015). L'intensification prévue des opérations forestières aura ainsi des impacts plus prononcés sur les cours d'eau, dont la hausse des débits de pointe et la concentration élevée en sédiments causés par le ruissellement des parterres de coupes (National Council for Air and Stream Improvement [NCASI], 2009). Concernant le territoire situé au Nouveau-Brunswick, nous constatons une exploitation forestière légèrement plus intensive, notamment sur les terres dédiées aux lots boisés privés. Nous y observons ainsi davantage de coupes totales, une plus faible proportion de plantations et un couvert végétal plus clairsemé (entre 25 et 75% de canopée). Selon la Fédération des propriétaires de lots boisés du Nouveau-Brunswick (2021), l'intensité des pratiques d'exploitation forestière résulterait notamment des pressions économiques sur les petits producteurs sylvicoles. Cette pression serait causée par la faible marge de profit et la réglementation favorisant les grandes industries commerciales. De surcroît, les ressources financières et de personnels actuelles semblent être présentement insuffisantes afin d'assurer le suivi adéquat des récoltes, des aménagements et de la planification des plantations sur ces lots. Les incitatifs financiers pour la conservation et l'amélioration des pratiques sur les lots boisés sont également pratiquement inexistants. (Floyd et al., 2012).

Les changements dans la structure d'âge, la composition, et l'organisation spatiale résultant des coupes forestières créent ainsi des paysages en mosaïque fragmentés qui altèrent les dynamiques hydrologiques et affectent les services écosystémiques. Ces phénomènes sont également exacerbés par les problématiques de raréfaction des vieilles forêts et la surabondance des peuplements en régénération.

Il est reconnu que les canopées des forêts interceptent et évaporent davantage d'eau, favorisant l'assèchement des sols et la réduction des ruissellements. Alors que la relation linéaire sur la réduction des taux d'évaporation par la coupe forestière est majoritairement acceptée dans le milieu scientifique, les effets sur les taux d'interception sont plus ambigus (Winker et al., 2010). Par ailleurs, le développement des systèmes racinaires influence la capacité d'infiltration par leur effet sur la porosité des sols. Il est ainsi estimé que la porosité des sols est de 15 à 55 % supérieure pour un couvert forestier mature, permettant une augmentation des taux d'infiltration jusqu'à 67 fois supérieurs et une conductivité hydraulique de 2 à 140 fois supérieures en comparaison à un sol nu (Environment Agency, 2018). De plus, lorsque les surfaces sont mises à nues, l'énergie des gouttes de pluie entraîne la création d'une croûte sédimentaire de faible perméabilité à la surface du sol. Par les effets de désagrégation et de dispersion, les particules du sol se compactent et empêchent l'infiltration de l'eau dans les sols, exacerbant le ruissellement des pluies vers les

cours d'eau (Montoroi, 2021). Le ruissellement de surface cause également la formation de rigoles et de ravines par érosion hydrique sur les sols mis à nues, intensifiant la problématique (Union Internationale pour la Conservation de la Nature [UICN], 2019). Similairement aux processus de dévégétalisation et de compaction observés pour les chemins, les coupes forestières et l'utilisation de la machinerie peuvent aggraver la sédimentation des cours d'eau. De plus, ils génèrent une augmentation du taux de ruissellement hortonien, soit le ruissellement produit lorsque l'intensité de la pluie dépasse la capacité d'infiltration du sol. Ce taux est jusqu'à 25 fois plus élevé que sur un sol forestier non perturbé, contribuant ainsi à l'augmentation des débits de pointe (Zemke, 2016). Les chantiers forestiers de récolte mixte de bois durs et mous sont particulièrement vulnérables en raison du grand nombre d'intervenants qui y circule (OBV Saint-Jean, 2016). La probabilité d'observer une augmentation des débits de pointe dans le bassin versant augmente proportionnellement à la superficie de bois récoltée dans celui-ci (Plamondon, 2004). Par ailleurs, on estime que de 5 à 70 % de neige supplémentaire peut s'accumuler dans les secteurs de coupes à blanc comparativement aux forêts matures en raison du manque d'interception par les arbres (Winkler et Moore, 2006). Le retrait du couvert forestier réduit également l'ombrage, accélérant la fonte du couvert nival durant les périodes printanières. Considérant l'importance relative de la fonte des neiges comme facteur aggravant des inondations, ces phénomènes pourraient ainsi grandement exacerber les risques.

Dévégétalisation des bandes riveraines

Lors d'une caractérisation effectuée en 2015, la SARM a démontré que plus de 64 % des bandes riveraines sur les terrains privés du bassin présentaient une faible capacité à remplir leurs fonctions écosystémiques à la suite du retrait de la végétation indigène et de l'enrochement des rives. Une étude de la portion du territoire situé au Nouveau-Brunswick a également recensé près de 5,6 km de bandes riveraines sans aucune végétation (CARNO, 2018). Par ailleurs, certains tronçons de la route longeant les cours d'eau ont été enrochés afin de réduire les dépenses associées à la reconstruction des routes. (OBV Saint-Jean, 2018)

À l'état naturel, la rive est habituellement composée de trois strates de végétation, soit d'herbacées, d'arbustes et d'arbres, permettant de retenir le sol, de ralentir le ruissellement, de filtrer les sédiments et les éléments nutritifs et de limiter le réchauffement excessif de l'eau (OBV Saint-Jean, 2016). À la jonction des milieux aquatiques et terrestres, les bandes riveraines assurent ainsi plusieurs services écosystémiques bénéfiques pour la biodiversité, la qualité de l'eau et la réduction des risques d'inondation (Réseau Environnement, 2014). Ainsi, des modifications dans la composition et la largeur des strates affectent la capacité des rives à exercer leurs fonctions régulatrices. De ce fait, lorsque les sols riverains ne sont plus protégés par les végétaux et leurs systèmes racinaires, la force érosive de la pluie, du courant et du ruissellement n'est plus freinée. Cette situation entraîne la sédimentation du cours d'eau et l'effondrement

des rives, soit de manière localisée, dans le cas d'une bande riveraine dévégétalisée, ou en aval, dans le cas de l'enrochement des rives. (Fédération interdisciplinaire de l'horticulture ornementale du Québec, 2013) Par ailleurs, le couvert végétal agit sur les débits de pointe en ralentissement le ruissellement. En cas d'inondation, les végétaux absorbent une partie des précipitations dans leurs systèmes racinaires, limitant les débordements du cours d'eau. Selon la *Politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables (PPRLPI)*, la ligne directrice minimale pour la largeur de la bande riveraine végétalisée est de 10 mètres sur une pente de moins de 30 % et de 15 mètres sur une pente de plus de 30%.

Zones agricoles

Les superficies en culture du bassin versant représentent une très faible proportion du territoire, soit 0,8 %. De cette façon, les risques associés à l'aggravation des inondations par les pratiques agricoles sont plutôt limités. Toutefois, la majorité de ces zones sont situées à proximité ou sur les rives des cours d'eau. En plus des impacts liés à la dévégétalisation, tels qu'observés en coupes forestières, la perte de la couche supérieure de matière organique du sol affecte sa porosité et sa stabilité structurale, réduisant la capacité de rétention du sol en eau (Bridges et al., 2014). Malgré la faible superficie relative des surfaces agricoles, la mise à nu des sols peut avoir des effets amplificateurs lorsqu'elle est considérée en combinaison avec les modifications du territoire afférent.

Urbanisation

En plus de modifications hydromorphologiques, le processus d'urbanisation entraîne d'importantes altérations du paysage naturel par le retrait de la végétation, la pose d'asphalte et la construction d'un système de drainage artificiel. Dans le BV Rivière-à-la-Truite, la quasi-totalité du développement urbain se trouve dans la zone avale, représentant 2,5 % de la superficie totale.

Le principal impact de l'imperméabilisation des surfaces est l'augmentation des volumes ruisselés, à la fois durant les épisodes d'averses, mais également lors de faibles pluies qui ne produiraient pas de ruissellement en conditions naturelles (WWF, 2017). De ce fait, la capacité de stockage en eau d'un sol dépend notamment de sa porosité et de son aptitude à se laisser traverser par un fluide. Sur des surfaces imperméabilisées, l'infiltration verticale de l'eau dans les sols est obstruée, entraînant ainsi un ruissellement de type hortonien suivant la pente (Montoroi, 2012). Ce phénomène engendre l'augmentation des volumes et des débits de pointe, exacerbant les effets des crues. De ce fait, les débits dans un bassin versant urbain peuvent être de 2 à 5 fois plus élevés que pour un bassin non développé (Réseau Environnement, 2014). De surcroît, le temps de réponse du bassin entre le début des précipitations et le débit maximum observé est réduit dû à

l'intensification du ruissellement. Ce phénomène constitue ainsi l'une des principales causes de la genèse des inondations en milieu urbain.

Malgré la faible proportion de surface bâtie dans le bassin versant, la problématique est accrue en raison de son emplacement en plaine inondable. De ce fait, par méconnaissance du risque ou de la situation, plusieurs bâtiments résidentiels et commerciaux ont été construits sur des terrains riverains naturellement sujets aux débordements des cours d'eau. Ceux-ci sont donc susceptibles à subir des inondations occasionnelles ou périodiques. Toutefois, au niveau municipal, un nouveau règlement vient d'être adopté afin de délimiter et d'encadrer la construction en zone inondable, atténuant le risque à long terme.

Par ailleurs, afin d'évacuer rapidement les eaux pluviales des zones urbaines, un système de drainage parcourt les rues et se déverse directement dans la portion en aval de la rivière à la Truite. En plus de poser un risque de pollution aquatique et d'apport de sédiments, ce réseau accroît également les risques d'inondation en produisant d'importants volumes de ruissellement (Réseau Environnement, 2014). De plus, lorsque le niveau de la rivière augmente au-delà de l'embouchure du canal, nous observons un refoulement des égouts pluviaux en amont du pont sur le boulevard Isidore-Boucher, inondant les terres adjacentes et les résidences situées à proximité.

2.3 IMPACTS ANTICIPÉS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Selon le plus récent rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, les changements climatiques de cause anthropique provoqueront l'intensification du cycle hydrologique à l'échelle du globe (IPCC, 2022). Ces bouleversements climatiques auront nécessairement des impacts sur l'équilibre hydrodynamique de la région, et conséquemment sur les risques d'inondation.

Selon les scénarios d'émission, les prévisions climatiques recensées par la Commission de services régionaux du Nord-Ouest (2019) anticipent des hausses de température moyenne annuelle de 1,7°C à 4,4°C d'ici 2080 pour la région. Ce réchauffement provoque une hausse de la fréquence des épisodes de chaleur extrême. Ce phénomène a pour effet de réduire les réserves hydriques et l'humidité des sols, ainsi que le débit des cours d'eau en période estivale par l'accroissement de l'évapotranspiration, atténuant potentiellement les risques d'inondation durant l'été (Ouranos, 2015). L'augmentation en fréquence et en magnitude des périodes de sécheresse aura cependant un impact sur les écosystèmes, affectant entre autres la structure et la composition des forêts. En effet, ces événements extrêmes influenceront la croissance et la régénération des arbres, impactant la composition des peuplements. Les modélisations prévoient ainsi une remontée vers le nord d'espèces d'arbres feuillus, pouvant avoir un impact sur les taux de transpiration et d'interception du couvert végétal (Terrier et al., 2013). Puisque ces phénomènes sont

réalisés par les feuilles, les espèces telles que le bouleau jaune, l'érable à sucre et le hêtre captent moins d'eau durant la saison hivernale, augmentant ainsi le ruissellement vers les cours d'eau (Bosh et Hewlett, 1982; Nisbet, 2005). De plus, le réchauffement entraînera un déplacement de l'aire de répartition de certains insectes ravageurs d'arbres, ainsi qu'une augmentation des incendies de forêt, réduisant également la capacité de celles-ci à modérer les crues (Ouranos, 2015; WWF, 2020).

Par ailleurs, une hausse des températures hivernales génèrerait davantage de jours de gel et de dégel qui pourraient augmenter de 24 à 57 %. Les précipitations d'hiver tomberont ainsi davantage sous forme liquide, contribuant à augmenter les débits d'écoulement durant cette période (Groupe Aster, 2020). Ces effets créent des conditions favorables à la formation d'embâcles de glace obstruant les cours d'eau, telle qu'observée lors de l'inondation du fleuve Saint-Jean en 2008 (WWF, 2020). Dans la région du Nord-Ouest, il est également prévu que l'accumulation de neige augmente de 15 à 25 % d'ici la fin du siècle (Groupe Aster, 2020). Considérant qu'une grande majorité des inondations récentes résultent partiellement de la fonte rapide des neiges printanières, une augmentation de l'épaisseur de neige pourrait exacerber les crues durant les périodes de dégel. Par ailleurs, nous observons des crues printanières de plus en plus hâtives dans la région. Ce phénomène semble être davantage lié à la grande variabilité des conditions climatiques plutôt qu'à une hausse des températures saisonnières moyennes (WWF, 2020; OBV Saint-Jean, 2016).

De plus, les changements climatiques entraîneront plusieurs modifications du régime pluviométrique. En plus des altérations quant aux conditions des chutes de neige, les modélisations anticipent également une légère hausse des précipitations totales annuelles. Selon les données recueillies par le CSRNO (2019), celles-ci pourraient subir une hausse de 6 à 9 % d'ici 2080. Cependant, l'impact le plus considérable des changements pluviométriques sur les régimes hydrologiques sera probablement l'intensification des épisodes de fortes précipitations. La fréquence et la magnitude des averses torrentielles seront ainsi amplifiées par les changements climatiques, celles-ci constituant déjà l'une des principales causes des inondations dans la région. En effet, le consortium Ouranos (2015) prévoit une augmentation du nombre de jours de précipitations excédant 10 mm ainsi que de l'intensité des épisodes de longues durées, exacerbant les phénomènes d'inondations. De ce fait, les épisodes pluviaux intenses provoquent une saturation rapide des sols. Lorsque l'intensité de la pluie devient supérieure à la capacité d'infiltration, l'eau ruisselle vers les cours d'eau, entraînant la montée progressive des hauteurs d'eau suivie de débordements. Le danger est amplifié en hiver et au printemps, lorsque les sols sont déjà saturés en eau. Les pluies intenses peuvent également causer de l'érosion par ruissellement de surface (Ouranos, 2020).

La combinaison de ces effets provoquera de nombreuses perturbations du cycle de l'eau et des conditions d'écoulement des rivières. Les prévisions indiquent notamment une augmentation importante des débits

annuels moyens des cours d'eau au Nouveau-Brunswick, de l'ordre de 16 à 40 % d'ici la fin du siècle (Gouvernement du Canada, 2019). Plus spécifiquement, les vitesses d'écoulement augmenteraient significativement durant les périodes hivernales et printanières. À l'opposé, une diminution des débits moyens par rapport aux conditions hydrauliques actuelles est prévue pour les périodes estivales (Swansburg et al., 2004). De ce fait, les données hydrométriques disponibles en aval du bassin versant Rivière-à-la-Truite, sur la rivière Madawaska, indiquent une tendance constante à la hausse des débits maximaux depuis 1919 (OBV Saint-Jean, 2016). L'intensification du débit pourrait ainsi entraîner des répercussions non seulement sur les risques d'inondations, mais également sur la sédimentation et le tracé de la rivière. En effet, un excès d'énergie en vitesse accentue la force érosive des rivières, modifiant la morphologie de celles-ci (Milan et Schwendel, 2021). Ces modifications entraîneront notamment la désuétude de plusieurs ouvrages qui ne pourront plus supporter les charges hydrauliques. Les éléments les plus vulnérables seront les ponts, les ponceaux, les aménagements en plaine inondable et les réseaux de drainage de surface (Ministère des Transports du Nouveau-Brunswick, 2010).

La gestion intégrée des risques d'inondation nécessite donc la prise en compte des données climatiques actuelles de la région, en conjonction avec les projections anticipées selon les différents scénarios d'émission. Ce faisant, la modélisation des risques d'inondation pour le district de Saint-Jacques projette un élargissement de la superficie à risque sous l'effet des changements climatiques (Service Nouveau-Brunswick, 2022). Par exemple, d'ici 2100, les volumes d'inondation pour le bassin versant Rivière-à-la-Truite sont prévus d'augmenter de 34 % pour les événements de récurrence 20 ans, pour un total de 1,4 million de m³ d'eau (Labelle, 2022).

En somme, un réseau hydrographique constitue un ensemble fonctionnel complexe et dynamique. Ainsi, les relations entre les facteurs aggravants étudiés plus haut et les risques d'inondations sont non linéaires et ne se limitent pas à la simple addition des impacts. De ce fait, toute modification impactant le cycle naturel de l'eau peut entraîner des répercussions sur plusieurs composantes biotiques et abiotiques. La gestion intégrée des risques d'inondation doit ainsi tenir compte des interactions complexes entre les différents éléments, ainsi que des boucles de rétroactions engendrées par tout changement sur la structure, la fonction ou la composition de l'hydrosystème. Le schéma présenté à la figure 2.5 résume les principales composantes contribuant au risque d'inondation devant être prises en compte pour l'atténuation des risques d'inondation dans le BV Rivière-à-la-Truite. Des modifications de chacun des éléments peuvent ainsi entraîner des répercussions multidirectionnelles entre les différents paliers.

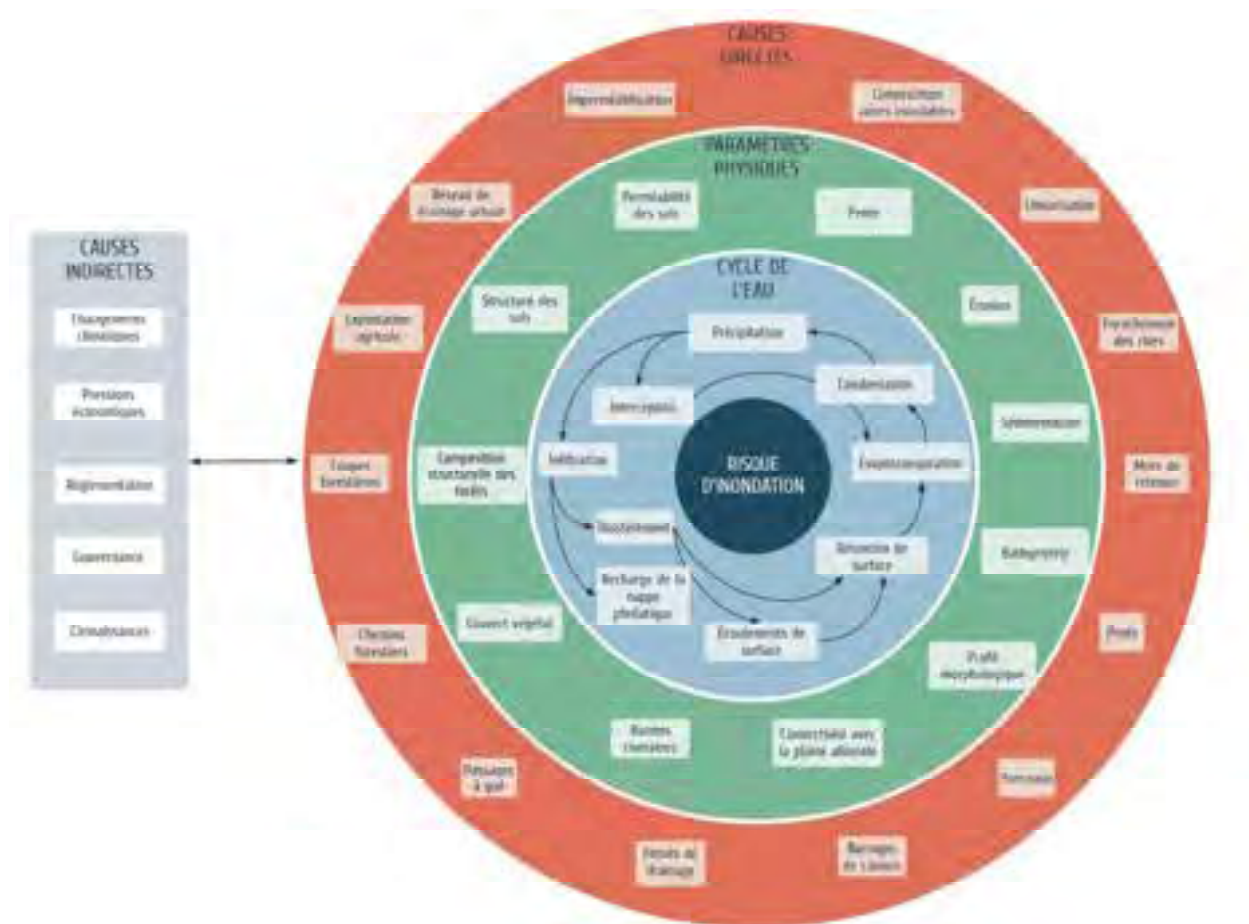


Figure 2.5 Facteurs contribuant aux risques d'inondation dans le bassin versant Rivière-à-la-Truite

2.4 OBJECTIFS PRÉLIMINAIRES DE LA GESTION INTÉGRÉE DES RISQUES D'INONDATION

Face aux risques accrus d'inondations dans la région, les instances politiques, organismes et comités citoyens ont déjà énoncé plusieurs préoccupations et attentes afin d'accroître la résilience des communautés. En effet, une concertation des parties prenantes en 2017 a permis d'évaluer les principales vulnérabilités actuelles de la région. Celles-ci incluent notamment l'augmentation du refoulement des égouts, la difficulté à réagir lors d'événements de fortes pluies et les risques pour la sécurité publique et les infrastructures. Par ailleurs, les représentants ont également identifié les problématiques centrales dans un contexte de changements climatiques. En 2e et 3e position figurent respectivement les inquiétudes face aux inondations des zones résidentielles et du réseau routier (WWF, 2020). Afin de répondre à ces préoccupations, la ville d'Edmundston a développé un plan d'adaptation aux changements climatiques affirmant son intention de réaliser une planification à long terme de la gestion des eaux pluviales. Celui-ci

devra notamment promouvoir la mise en place d'aménagements verts et à faibles impacts afin de réduire le ruissellement et les vitesses d'écoulement des cours d'eau. À long terme, une réduction du coefficient d'imperméabilisation sur le territoire est envisagée. La protection et la réhabilitation des éléments naturels modérateurs des crues, tels que les zones tampons le long des cours d'eau, les milieux humides et les plaines inondables sont également privilégiés. Par le fait même, la connectivité des écosystèmes devra être incluse dans la planification des aménagements afin d'accroître la résilience globale de la région. Le plan prévoit également d'adresser les problèmes de sédimentation ainsi que le sous-dimensionnement des ponts et ponceaux. Enfin, afin de résoudre les problématiques liées aux fossés et aux ponceaux, de bonnes pratiques d'aménagement de la voirie devront être identifiées et mises en place. (Groupe Aster, 2020)

Par ailleurs, la préservation et le renforcement des fonctions écologiques et de la qualité des écosystèmes devront être considérés dans l'évaluation d'aménagements contre les risques d'inondations. De ce fait, la préservation de la quantité et de la qualité des eaux de surface et le respect des capacités de support des écosystèmes aquatiques sont deux objectifs clés de la gestion de l'eau dans les deux provinces (MEGL, 2018; MELCC, 2018). À cet égard, une attention particulière devra être portée pour la conservation de l'habitat de l'omble de fontaine dans le bassin versant, qui a fait l'objet d'une caractérisation en 2018 (OBV Saint-Jean, 2018). De plus, des considérations sociales, économiques et éthiques devront être prises en compte dans le choix des aménagements afin de limiter les compromis et assurer une distribution spatiale équitable de l'eau dans le paysage. Enfin, l'évaluation des aménagements dans le BV Rivière-à-la-Truite devra tenir compte des répercussions potentielles pour les grands ensembles hydrographiques dont il fait partie, soit le BV de la rivière Madawaska et le BV du fleuve Saint-Jean. De ce fait, des modifications dans les volumes et la synchronicité des débits pourraient avoir des impacts notoires en aval du bassin et doivent ainsi être considérées. L'aménagement du territoire doit donc être conçu selon différentes échelles temporelles et spatiales afin d'éviter les mauvaises adaptations. Par conséquent, l'objectif primaire est d'accroître la résistance et la résilience des communautés face aux risques d'inondation dans une perspective de développement durable. À cette fin, l'élaboration de scénarios d'atténuation devra ainsi miser sur le capital naturel des écosystèmes.

3. SOLUTIONS FONDÉES SUR LA NATURE

Face à l'intensification des perturbations climatiques et la perte de plusieurs services écosystémiques, un changement de paradigme est observé depuis quelques années dans les domaines de la gestion des ressources en eau et de l'aménagement du territoire. Le concept de solutions fondées sur la nature (SFN) fut introduit officiellement en 2009 par l'Union internationale de la conservation de la nature (2020; Dekker et al., 2021). Cette nouvelle approche mise sur la contribution des processus naturels afin de résoudre les problèmes sociétaux. Ceux-ci incluent l'atténuation des risques d'inondation et d'érosion, mais également les enjeux de sécurité alimentaire, d'approvisionnement en eau, de changements climatiques et de développement socio-économique (UICN, 2016). Le concept de SFN est un terme générique large qui englobe plusieurs approches écosystémiques visant le renforcement de la résilience des territoires via la conservation, la restauration et l'ingénierie de systèmes naturels (Nesshover et al., 2017). Celles-ci varient notamment selon le degré d'intervention humaine, allant de l'influence minimale à l'infrastructure technocentrique. À ce propos, Eggermont et al. (2015) proposent une typologie selon trois catégories :

- Type 1 : interventions minimales ou inexistantes sur les écosystèmes dans le but de maintenir ou d'améliorer les biens et services écosystémiques.
- Type 2 : mise en œuvre de méthodes de gestion extensives ou intensives pour le développement d'écosystèmes et de paysages durables et multifonctionnels.
- Type 3 : gestion intrusive des écosystèmes ou création de nouveaux écosystèmes artificiels.

Sur la base de cette nomenclature, les différents concepts de SFN répertoriés lors d'une recherche bibliographique ont ainsi été classés en fonction du degré d'ingénierie requis, du nombre de services écosystémiques et de parties prenantes ciblés (voir figure 3.1). À noter que les concepts présentés existent selon un continuum plus ou moins large pouvant inclure les 3 types d'intervention. La classification proposée vise principalement à schématiser les approches selon leurs principaux champs d'action.

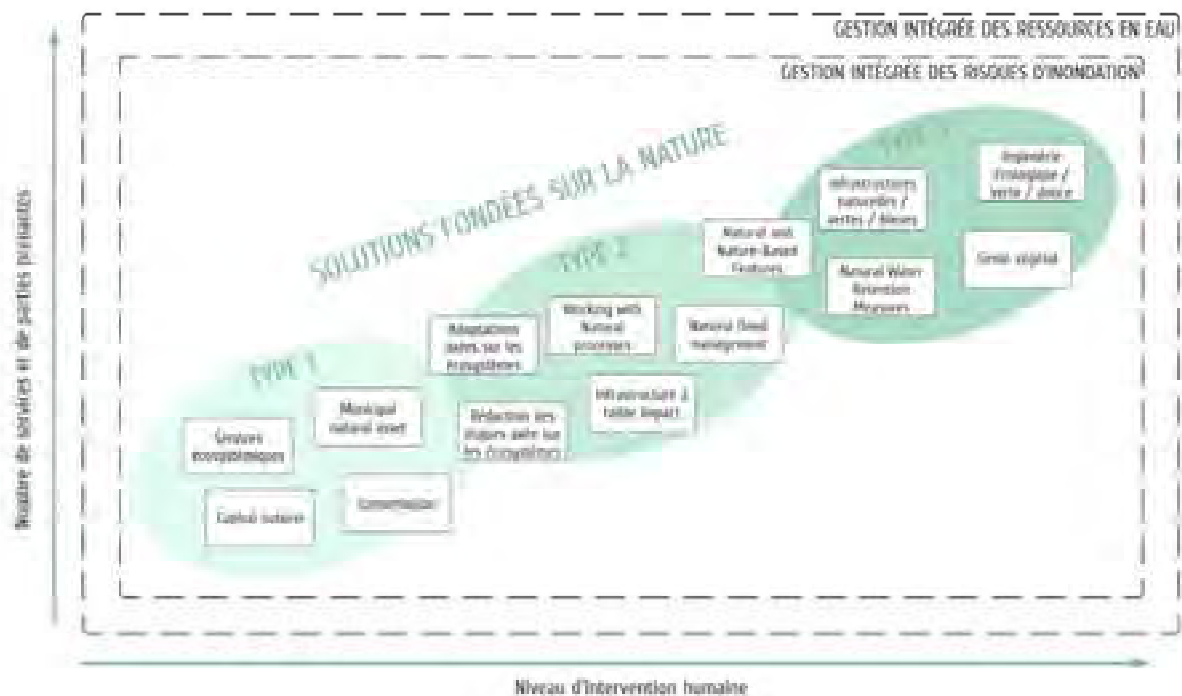


Figure 3.1 Classification des concepts associés aux SFN dans le cadre de la gestion intégrée des risques d'inondation (adapté de Eggermont et al., 2015)

Aux fins de la présente étude, le concept de *Natural and Nature-Based Features* (NNBF) proposé par l'organisation *U.S. Army Engineer Research and Development Center* a été retenu, traduit sous le terme d'« aménagements naturels et fondés sur la nature » (ANFN). Ceux-ci réfèrent à l'utilisation de caractéristiques naturelles du territoire à des fins fonctionnelles, soit dans le cas présent pour la réduction des risques d'inondation, tout en générant des bénéfices pour l'environnement, l'économie et la société (Bridges et al., 2021). Cette définition exclut ainsi les SFN non structurelles, telles que les initiatives de conservation, les processus de gouvernance et les changements de pratiques agricoles, industrielles et sociales. Bien que celles-ci soient primordiales pour la gestion intégrée des ressources en eau, ce choix conceptuel permet de limiter la portée de l'étude aux aménagements strictement structurels. Ceux-ci incluent notamment les techniques de restauration et la création d'infrastructures imitant ou renforçant les conditions naturelles, comme observé dans les plaines inondables, les milieux humides ou les forêts. Par ailleurs, les interventions seront circonscrites à l'échelle de compétence municipale et du bassin versant, excluant les aménagements sur les résidences personnelles, telles que les toits verts ou les jardins de pluie. Cette limitation est privilégiée pour des raisons logistiques, bien que ces stratégies de gestion des eaux pluviales soient avantageuses et complémentaires. Enfin, l'étude intégrera également des considérations conceptuelles et techniques associées à la permaculture en matière d'aménagement du territoire. De ce fait,

les principes de conception systémiques et régénératifs associés à cette philosophie posent les bases pour l'intégration harmonieuse des activités humaines au sein des écosystèmes.

3.1 CRITÈRES ET PRINCIPES CLÉS DES SFN ET DES ANFN

Afin d'être considérés comme une SFN, les aménagements doivent d'abord répondre aux 8 critères standardisés suivants reconnus par la communauté internationale (UICN 2020) :

1. Répondre efficacement à un enjeu sociétal.
2. Tenir compte des dynamiques aux différentes échelles.
3. Procurer des avantages nets à la biodiversité et à l'intégrité des écosystèmes.
4. Être économiquement viables.
5. Reposer sur des processus de gouvernance inclusifs et transparents.
6. Trouver un juste équilibre entre la réalisation des objectifs et la prestation d'avantages multiples.
7. Être gérés de façon adaptative et sur la base de données probantes.
8. Être durables et inscrites dans un contexte de compétence approprié.

De façon générale, les SFN doivent ainsi envisager des actions à long terme selon une approche globale et intégrée qui considère les échelles spatiales et temporelles évolutives des systèmes. Elles sont multifonctionnelles et tiennent compte des interactions entre les processus biophysiques et écologiques du territoire, de la géomorphologie et de l'hydrodynamique, ainsi que de leurs connexions avec le système social. Par ailleurs, plusieurs auteurs identifient des principes clés supplémentaires à respecter pour la définition de SFN. Tout d'abord, celles-ci doivent offrir un bon rapport coût-efficacité, évaluant d'un côté les frais matériels, les impacts et les compromis, et de l'autre les bénéfices directs pour la résolution des défis de société et les co-bénéfices environnementaux et sociaux. Les solutions à privilégier misent ainsi sur l'utilisation équitable et efficace des ressources. De plus, une SFN doit être spécifique à son site d'implantation, soit adaptée aux contextes socio-économiques et institutionnels locaux, ainsi qu'aux caractéristiques biophysiques du bassin versant. (European Commission, 2015; Cohen-Shacham et al., 2016; Raymond et al., 2017)

Dans le contexte spécifique de la gestion intégrée des risques d'inondations, les ANFN sont des interventions systémiques conçues à l'échelle du bassin versant et permettant une adaptation aux effets des changements climatiques. Par différentes techniques et pratiques, ces aménagements doivent viser la réduction, le contrôle ou la redistribution des risques d'inondations sur le territoire (CSA Group Research, 2021). En ce sens, il est primordial de permettre l'inondation d'une partie des terres au sein du bassin versant afin de dissiper l'énergie et préserver les fonctions écosystémiques de ce processus (Sayers et al., 2015). L'objectif

premier est ainsi de restaurer, renforcer ou imiter les dynamiques naturelles de l'hydrosystème afin de réduire les probabilités d'inondation dans les zones non désirables (CSA Group Research, 2021). Pour ce faire, les ANFN doivent se baser sur deux méthodes fondamentales (Scottish Environment Protection Agency [SEPA], 2015; Bridges et al., 2021; Environment Agency, 2017)

1. Retenir l'eau à l'échelle paysagère : en augmentant l'infiltration dans les sols, en réduisant le ruissellement de surface, en gérant l'écoulement des eaux et en renforçant la connectivité hydrologique.
2. Créer un espace de liberté pour l'eau : en renforçant la connectivité et les interactions entre les cours d'eau et la plaine inondable, en préservant ou en restaurant la balance sédimentaire et en ajustant la capacité hydraulique du chenal.

Enfin, les concepts retenus pour l'intégration des principes de la permaculture sont issus des techniques associées à l'école de pensée Keyline Design développée par P. A. Yeomans. Cette approche holistique s'inspire des modèles naturels pour rétablir et renforcer la santé des sols, tout en augmentant les capacités de maintien de l'eau sur le territoire (Millison, 2020). Cette technique d'aménagement repose sur la géométrie Keyline afin de délimiter les emplacements stratégiques pour l'implantation d'ouvrages hydrauliques permettant de maximiser la rétention, l'infiltration et la redistribution de l'eau sur le territoire. Les principes clés applicables dans le cadre de la GIRI sont les suivants (Walton et al, 2019; Duncan et Krawczy, 2018, Yeoman, 1958) :

1. Concevoir l'aménagement du territoire en fonction de l'échelle de permanence selon l'ordre hiérarchique suivant : climat, paysage, hydrologie, routes, végétation, structures, parcelles et sols.
2. Retenir l'eau autant que possible en amont au niveau des *Keypoints* stratégiques, correspondant aux ruptures de pente.
3. Considérer les lignes de contour topographiques dans la gestion du ruissellement de surface et la redistribution de l'eau sur le territoire.

3.2 PERTINENCE ET LIMITES POUR LA GESTION INTÉGRÉE DES RISQUES D'INONDATION

Afin de répondre aux enjeux sociétaux de façon durable et d'accroître la résilience des communautés, plusieurs sociétés s'éloignent progressivement du cadre conventionnel de gestion des risques d'inondation. Ainsi, de nombreuses organisations, telles que le Cadre de Sendai et le Cadre pancanadien sur la croissance propre et les changements climatiques, reconnaissent le rôle primordial des SFN pour l'atténuation des risques naturels (Insurance Bureau of Canada [IBC], 2018). Cependant, notamment en raison du caractère

novateur de cette pratique pour la gestion intégrée des risques d'inondation, certaines limites sont toutefois à considérer.

3.2.1 Avantages des ANFN

La mise en place d'ANFN offre plusieurs avantages pour la réduction des risques d'inondation par rapport aux approches d'ingénierie conventionnelles. Tout d'abord, les installations classiques, telles que les murs de retenue, les barrages ou la canalisation de la rivière, ont une portée limitée, visant uniquement la gestion des conséquences durant ou à la suite de l'aléa. Face à l'intensification des événements pluviométriques, ces ouvrages sont peu viables puisqu'ils requièrent des actions correctives constantes afin d'augmenter les niveaux de protection (Alfieri et al., 2016). À l'inverse, les ANFN sont plutôt des mesures préventives visant la résolution des causes de la problématique, réduisant ainsi la vulnérabilité des communautés et renforçant ses capacités d'adaptation (WWF, 2017). Par ailleurs, l'aménagement de structures vivantes et naturelles, de par leurs caractères évolutifs et dynamiques, s'adapte beaucoup plus facilement aux changements environnementaux (UNDRR, 2021). Ainsi, alors que la majorité des structures conventionnelles de défense contre les inondations sont conçues selon un cycle de vie de 30 à 50 ans, plusieurs ANFN pourraient offrir une protection selon une durée de vie presque illimitée (WWF, 2016).

De plus, en raison de leur inflexibilité et de leurs coûts de construction et d'entretien généralement élevés, les solutions d'ingénierie classiques sont souvent moins rentables à long terme que les ANFN. En effet, puisque ces derniers s'appuient sur les dynamiques de défenses naturelles du bassin versant, ils développent des mécanismes autorégulateurs, réduisant ainsi les coûts opérationnels (WWF, 2016). De ce fait, les milieux naturels sains et diversifiés présentent une forte capacité d'adaptation et de stabilité fonctionnelle, requérant ainsi moins de réparations et d'entretien à long terme (CSA Group Research, 2021). Lorsque planifiés adéquatement, certains ANFN peuvent offrir des opportunités de synergie économique avec d'autres industries présentes sur le territoire, notamment dans les domaines énergétiques ou forestiers. Par exemple, le projet de Pelly's Lake au Manitoba revalorise les quenouilles plantées dans son système de rétention des eaux pluviales à des fins bioénergétiques (Svedarsky et al., 2016).

De surcroît, les techniques conventionnelles fournissent des bénéfices limités, se circonscrivant uniquement à la diminution des dommages structurels. En outre, elles peuvent avoir des impacts négatifs à long terme sur les écosystèmes en entravant leurs dynamiques naturelles (Depietri et McPhearson, 2017). À l'opposé, les ANFN peuvent procurer de multiples bénéfices complémentaires lorsqu'ils sont conçus selon une planification intégrée. Ainsi, en plus de réduire les risques d'inondations, ces aménagements peuvent soutenir la recharge des nappes phréatiques, atténuer les sécheresses, améliorer la qualité de l'eau,

renforcer la biodiversité, améliorer les habitats fauniques et floristiques, favoriser l'intégration paysagère, renforcer le bien-être humain ou offrir des opportunités récréatives (Bridges et al., 2021).

De la sorte, les ouvrages d'ingénierie conventionnelle peuvent s'avérer plus appropriés dans certaines situations, notamment au sein de bassins versants fortement urbanisés. Toutefois, les ANFN offrent des alternatives viables pour accroître la résilience climatique et environnementale, tout en respectant la capacité de support des écosystèmes. Ces deux approches peuvent également être utilisées de façon complémentaire afin de maximiser la protection des communautés contre les inondations et les co-bénéfices pour l'environnement et la société.

3.2.2 Limites méthodologiques et techniques des ANFN

Malgré les nombreux avantages de la mise en œuvre d'ANFN pour la réduction des risques d'inondation, certaines contraintes restreignent leur application et leur acceptabilité sociale. En effet, l'intérêt récent pour ces pratiques dans le domaine de la gestion des risques occasionne un manque de connaissance, particulièrement par rapport au suivi et à l'évaluation à long terme des projets. Ainsi, les données sur la performance de ces interventions sont parfois déficitaires, notamment en comparaison avec les structures d'ingénierie conventionnelles. Malgré une base de données croissante sur l'efficacité des ANFN pour la réduction des inondations récurrentes, plusieurs incertitudes subsistent quant à leur capacité à atténuer les risques lors d'événements extrêmes ou lorsque soumis à de multiples aléas (Environmental Agency, 2017). Par ailleurs, la méfiance de certains acteurs, fondée sur la nouveauté conceptuelle du terme, peut complexifier le dialogue et l'engagement des principales parties prenantes. Le nombre restreint de professionnels qualifiés disponibles pour la conception et la mise en œuvre de ce type d'aménagement peut également entraver la capacité opérationnelle des intervenants (ICF, 2018).

De plus, la fragmentation sectorielle de la gouvernance peut complexifier la gestion de projet, notamment afin de planifier la collaboration multidisciplinaire. De surcroît, la GIRI nécessite une approche à l'échelle du bassin versant, dont les limites territoriales peuvent chevaucher plusieurs frontières administratives. La complexité du processus législatif et réglementaire entre les différents domaines d'intervention représente l'une des plus importantes barrières à la mise en œuvre d'ANFN (ICF, 2018). Une collaboration efficace entre diverses parties prenantes aux objectifs divergents peut également s'avérer difficile, notamment lorsque la mise en place des ANFN requière des compromis d'usage (Bridges et al., 2021).

Par ailleurs, puisque ces structures naturelles dépendent de l'évolution de composantes biotiques et abiotiques, l'atteinte du plein potentiel de réduction des risques peut prendre plusieurs années (CEPRI, 2022). L'incertitude de cet horizon temporel peut ainsi décourager leur intégration dans la planification

régionale et municipale, notamment en raison de la cyclicité à court terme du processus électoral. De plus, les comportements des écosystèmes dépendent des conditions de leurs emplacements, exigeant la connaissance spécifique des paramètres locaux propres au site d'étude. Ceux-ci sont parfois non disponibles en raison d'un manque de capacité ou d'intérêt politique. Par exemple, la grande variabilité spatio-temporelle des composantes hydrologiques sur le territoire et des régimes de glaces crée des enjeux additionnels pour les régions canadiennes (CSA Group Research, 2021). À l'inverse, les infrastructures conventionnelles sont encadrées par des normes et des protocoles bien établis et sont conçues et paramétrées de façon similaire, en dépit de leur emplacement (Bridges et al., 2021).

Enfin, en raison de leurs caractères dynamiques et multifonctionnels, les « retours sur les bénéfices » de ces aménagements peuvent être longs et difficiles à identifier. En effet, l'évaluation des biens et services écosystémiques procurés par ces structures relève de méthodes complexes et souvent qualitatives, dépendant également des perspectives sociopolitiques propres à chaque communauté (Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services [IPBES], 2019). Cet enjeu méthodologique entraîne fréquemment la sous-estimation de la valeur réelle des ANFN par rapport aux aménagements conventionnels, pouvant compromettre le financement des projets.

3.3 REVUE DE LA LITTÉRATURE

Considérant la nouveauté relative du concept de SFN, plusieurs documents ont été rédigés afin de mieux encadrer la conception, la mise en œuvre et le suivi de celles-ci. Ainsi, divers organismes internationaux, tels que les Nations Unies, le Fonds mondial pour la nature ou l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature ont élaboré des guides exhaustifs dans le but de faciliter l'intégration des SFN dans les stratégies nationales et locales de lutte contre les inondations. De plus, certaines initiatives nationales commencent également à émerger depuis quelques années, démontrant l'intérêt croissant des instances politiques et citoyennes à adopter de nouvelles approches systémiques en matière d'aménagement du territoire.

Le tableau 3.1 répertorie une liste non exhaustive des principaux documents conceptuels et techniques pour la mise en place de SFN dans un contexte de gestion intégrée des risques d'inondations, tant au Canada qu'à l'international. Ces ouvrages constituent la base de référence pour l'inventaire des aménagements présélectionnés présentés dans la section subséquente.

Tableau 3.1 Analyse critique de la littérature disponible

	TITRE	AUTEUR	CONTENU	LIMITES
CANADA	Nature-Based Solutions for Coastal and Riverine Flood and Erosion Risk Management	CSA Group Research (Canada)	Principes, concepts et bénéfices fondamentaux associés aux SFN. Grandes lignes d'orientations stratégiques pour la gestion des risques d'inondation et d'érosion. Études de cas au Canada et ailleurs. Références globales et canadiennes de ressources techniques. Opportunités et enjeux pour l'application de SFN en contexte canadien.	Présentation de concepts et lignes directrices généraux et peu spécifiques. Absence de conseils pratiques pour l'application de SFN en climat froid.
	Municipal Natural Assets Initiative (MNAI) – Plusieurs documents (2017, 2019, 2020)	Municipal Natural Assets Initiative (Canada)	Développement d'un cadre opérationnel de huit étapes pour la mise en œuvre de projets de préservation du capital naturel des municipalités. Basé sur une série de projets pilotes canadiens, complétés et en cours. Évaluation des bénéfices et des valeurs économiques fournis par les écosystèmes selon leur capacité à atténuer les risques d'inondations.	Évalue uniquement les initiatives de capital naturel municipal, soit principalement axé sur la conservation.
	Best Practices and Resources on Climate Resilient Natural Infrastructure (2018)	ICF [Préparé pour le Conseil canadien des ministres de l'environnement] (Canada)	Résumé de l'état des pratiques pour la mise en place de SFN afin d'accroître la résilience des communautés face à différents types d'inondation et exemples d'applications au Canada. Conseils pour l'élaboration d'une analyse de rentabilité économique axée sur les bénéfices socio-économiques. Identification des manques de connaissances, des leviers et des freins et des leçons apprises et documentées par des intervenants canadiens.	Manque de détails techniques spécifiques et de considérations régionales.
	Combatting Canada's Flood Risks: Natural Infrastructure Is an Underutilized Option (2018)	Insurance Bureau of Canada (Canada)	Cadre général d'application pour la mise en œuvre de projets d'infrastructure naturelle, incluant les analyses coût-bénéfice. Présentation des bonnes pratiques et exemples d'applications au Canada.	Présente principalement des mesures de conservation et d'évaluation du capital naturel. Axé sur une perspective économique restrictive. Manque de détails techniques spécifiques.
	Guide québécois de la gestion des eaux pluviales (2014)	Réseau Environnement (Préparé pour le MAMROT : ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire) (Québec)	Présentation de méthodologies pour la caractérisation hydrologique telle que la modélisation du ruissellement, des écoulements, des débits et des hydrogrammes. Guide de pratiques de gestion optimales des eaux pluviales selon l'emplacement dans le réseau de drainage. Considérations techniques et logistiques en contexte de climats froids et aspects de sécurité. Tableau des avantages et des inconvénients pour chaque aménagement.	Éventail de techniques limité, basé principalement sur des aménagements hybrides. Application uniquement en zone urbaine. Pas de considération des dynamiques hydrologiques à l'échelle du bassin versant.

Tableau 3.1 Analyse critique de la littérature disponible (suite)

	TITRE	AUTEUR	CONTENU	LIMITES
INTERNATIONAL	Standard mondial de l'UICN pour les solutions fondées sur la nature (2020)	UICN : Union Internationale pour la Conservation de la Nature (International)	Cadre de référence international pour la vérification, la conception et la mise à l'échelle des SFN afin de répondre à plusieurs enjeux sociétaux. Définis 8 critères indispensables et 28 indicateurs afin d'assurer la standardisation du concept de SFN dans les pratiques de gestion. Présentation de plusieurs études de cas internationaux.	Manque de directives et de détails techniques spécifiques
	Flood Green guide (2016)	WWF : World Wildlife Fund (International)	Présentation de SFN structurelles et non structurelles incluant des schémas simplifiés. Évaluation de l'efficacité des méthodes selon l'échelle géographique, le type d'inondation et l'emplacement dans le bassin versant. Comparaison avec les méthodes d'ingénierie conventionnelle et propositions de combinaisons optimales entre les structures « vertes » et « grises ». Fiches pratiques à l'intention des intervenants.	Volume d'information substantielle peut désorienter le lecteur. Intérêt à développer le guide sous forme interactive.
	Nature-Based Solutions for Disaster Risk Reduction (2021)	UNDRR : United Nations Office for Disaster Risk Reduction (International)	Présentation des principes et des concepts pour la gestion intégrée des risques d'inondation et d'érosion. Inventaire d'études de cas internationales et résumé de données scientifiques factuelles démontrant l'efficacité des SFN. Recommandations pour renforcer la gouvernance, intégrer les SFN dans les stratégies contre les risques d'inondation et encourager la collaboration entre les secteurs publics et privés.	Davantage pour la mise en œuvre de stratégies à l'échelle nationale. Manque de directives et de détails techniques spécifiques.
	International Guidelines on Natural and Nature-Based Features for Flood Risk Management (2021)	U.S. Army Engineer Research and Development Center (International)	Recueil exhaustif de techniques organisées selon le type d'environnement. Fiches d'outils de gestion adaptative incluant les étapes détaillées à suivre, l'intégration de la participation citoyenne et des parties prenantes, les méthodes d'évaluation de la performance et de la résilience des techniques, l'analyse du cycle de vie et l'évaluation des coûts et des bénéfices.	Information plus substantielle pour les environnements côtiers, deltaïques et océaniques. Volume d'information substantielle peut désorienter le lecteur. Intérêt à développer le guide sous forme interactive. Information parfois redondante.
	Dispositifs de protection contre les inondations fondés sur la nature (2017)	Banque Mondiale (International)	Orientations pour la mise en œuvre de SFN en milieu côtier, riverain et urbain, incluant la présentation des étapes du cycle de vie d'un projet. Guide pratique pour la planification et l'identification de leviers et de freins dans le contexte de la gestion intégrée des risques d'inondation.	Manque de directives et de détails techniques spécifiques.

Tableau 3.1 Analyse critique de la littérature disponible (suite)

	TITRE	AUTEUR	CONTENU	LIMITES
INTERNATIONAL	Site internet (ecosshape.org)	Ecosshape (Europe)	Plateforme interactive regroupant une panoplie d'outils pour la mise en œuvre de SFN, incluant un inventaire de revues scientifiques, d'études de cas, d'éléments de gestion intégrée, de participation citoyenne et d'éducation. Basé sur l'expérience acquise à travers une panoplie de projets pilotes.	D'avantage pour les environnements fluviaux, deltaïques et côtiers. Pas de documents techniques pour le design des aménagements.
	Site internet : Natural Water Retention Measures (nwrn.eu)	Commission Européenne (Europe)	Plateforme interactive regroupant des fiches techniques détaillées de 53 mesures d'ingénierie verte (agriculture, forêt, hydromorphologie, urbain) et plus de 100 études de cas. Tableaux d'analyse multicritère des bénéfices biophysiques et écosystémiques pour chaque mesure.	Centré principalement sur le contexte européen, notamment pour les directives sur le financement et la réglementation. Redondances dans l'inventaire des mesures.
	NBS Technical Handbook (2020)	UNaLAB (Europe)	Catalogue exhaustif procurant des informations détaillées pour l'application de SFN afin de répondre à plusieurs enjeux sociétaux en milieu urbain, incluant les paramètres de conception, les performances anticipées et démontrées ainsi que les limitations des techniques.	Éventail de techniques limité, basé principalement sur des aménagements hybrides. Application uniquement en zone urbaine.
	Guide SafN - ARTISAN Les Solutions d'adaptation fondées sur la Nature pour prévenir les risques d'inondation (2022)	CEPRI : Centre Européen de Prévention des Risques d'inondation (Europe)	Base d'exemples de SFN pour la gestion du risque d'inondation Guide d'appui méthodologique aux collectivités pour mettre en place des SfN sur leur territoire.	Guide non exhaustif et limité des SFN. Considérations particulièrement eurocentriques.
	Working with Natural Processes – Evidence Directory (2018)	Environment Agency (Royaume-Uni)	Évidences scientifiques (modélisées et empiriques) pour plusieurs types de SFN structurels basés sur des études de cas. Revue de la littérature définissant l'état actuel des connaissances et l'efficacité potentielle des différentes mesures. Recensement des coûts de mise en œuvre. Analyse multicritère des biens et services écosystémiques pour chacune des techniques.	Considérations particulièrement axées sur le contexte au Royaume-Uni.

Tableau 3.1 Analyse critique de la littérature disponible (suite)

	TITRE	AUTEUR	CONTENU	LIMITES
INTERNATIONAL	Natural Flood Management Handbook (2015)	SEPA : Scottish Environmental Protection Agency (Royaume-Uni)	Considérations techniques et monétaires d'une variété de SFN pour les environnements riverains et côtiers. Résumé des principaux co-bénéfices des méthodes et description d'outils pour la conception et l'analyse de différents scénarios afin de tester la performance des solutions. Guide détaillé pour la planification du suivi des mesures à court et long terme.	Considérations particulièrement axées sur le contexte au Royaume-Uni.
	Flood planner: a manual for the natural management of river floods (2016)	WWF (Royaume-Uni)	Revue de plusieurs techniques de NFM à l'échelle du bassin versant. Étude de cas de projets pilotes, incluant les résultats démontrant l'efficacité des techniques.	Considérations particulièrement axées sur le contexte au Royaume-Uni. Ne contient pas d'information sur les impacts négatifs potentiels et observés des projets pilotes.
	Natural Flood Management Design Specification Catalogue (2021)	Highways England (Royaume-Uni)	Fiches techniques pour plusieurs types d'aménagement incluant : les objectifs recherchés, les paramètres de conception, l'entretien, les coûts, l'équipement et le matériel requis et les mesures complémentaires	Considérations particulièrement axées sur le contexte au Royaume-Uni. Davantage pour la gestion en milieu agricole. Manque d'information sur les impacts potentiels et les risques résiduels.

De façon générale, la documentation disponible vise principalement à circonscrire les limites conceptuelles et les cadres de pratique des SFN. Ainsi, ces ouvrages procurent une panoplie d'outils élémentaires pour l'élaboration de stratégies et la planification de projets. Toutefois, la plupart de ces guides manquent de directions spécifiques pour l'application concrète d'ANFN, notamment en matière de conception technique et de mise en œuvre. Cette limitation tient du fait que les SFN doivent être conçus selon les caractéristiques distinctes du site à l'étude et sont difficilement transposables d'une région à l'autre. Cette lacune est amplifiée par le manque de documentation régionale à l'échelle canadienne et provinciale. De ce fait, il n'existe que très peu de littérature technique et conceptuelle traitant des spécificités pour la mise en œuvre de tels aménagements dans les conditions climatiques particulières canadiennes. Bien que plusieurs initiatives émergent actuellement pour la région de l'Atlantique, notamment par l'*Atlantic Climate Adaptation Solutions Association* ou le *Transcoastal Adaptations Center for Nature-Based Solutions*, celles-ci visent principalement le renforcement de la résilience pour les régions côtières.

Par ailleurs, la majorité de la documentation technique disponible concerne uniquement l'application en milieu fortement anthropisé. De ce fait, plusieurs ouvrages, tels que ceux produits par le Réseau Environnement (2014), UNaLAB (2020) ou le CEPRI (2022), abordent seulement les SFN en contexte urbain. Bien que d'une grande utilité pour les aménagistes urbains, la faiblesse de ceux-ci réside dans le fait qu'ils ne considèrent pas les dynamiques hydrologiques à l'échelle du bassin versant. Néanmoins, de nombreuses ressources considèrent la mise en œuvre de SFN à l'échelle paysagère, notamment celles associées au concept de *Natural Flood Management* au Royaume-Uni (Highways England, 2021; SEPA, 2015; Environmental Agency, 2018; WWF, 2016). Celles-ci offrent de nombreux outils pratiques et détaillés pour la conception et l'installation d'aménagements naturels afin de réduire les risques d'inondation. Toutefois, compte tenu de la forte vocation agricole de cette région, les techniques et outils de planification proposés sont principalement axés vers ce type d'occupation du sol et d'utilisation des terres. De ce fait, il n'existe que très peu d'information pour l'implantation de SFN dans les bassins versants majoritairement couverts de forêts et à forte exploitation forestière.

De plus, la majorité des guides offrent principalement des exemples d'application de projets de grande envergure requérant de grandes superficies et des budgets de plusieurs millions de dollars. L'absence d'une base de données hétérogène et d'études de cas de projets à petites échelles et régionaux crée ainsi un déficit référentiel pour les intervenants de petits bassins versants. Enfin, peu de documentation est rédigée en français, limitant ainsi l'accessibilité pour certains gestionnaires.

3.4 INVENTAIRE DES AMÉNAGEMENTS CONSIDÉRÉS

À la suite de la consultation de nombreux guides de références et d'études de cas, une présélection d'ANFN a été effectuée en fonction de leur compatibilité avec le projet à l'étude. Afin de filtrer les ANFN pertinentes pour le projet, les critères présentés au tableau 3.2 ont été évalués pour tous les types d'aménagement consultés.

Tableau 3.2 Critères de présélection

Critère	Description
Type de mesure	L'aménagement correspond aux critères et aux principes définis dans la section 3.1 pour un ANFN.
Type d'inondation	L'aménagement vise principalement à réduire les risques d'inondation en eau libre et par refoulement du réseau de drainage urbain.
Réduction du risque	L'aménagement vise à réduire un ou plusieurs facteurs contribuant au risque d'inondation définis dans la section 2.2.
Échelle d'application	L'aménagement est applicable à l'échelle paysagère du bassin versant et/ou de la municipalité.
Aménagement du territoire	L'aménagement est pertinent pour les types de couvert de la végétation, d'occupation du territoire et d'utilisation des terres définis dans la section 1.2.

Concernant le critère sur l'aménagement du territoire, la présélection considère principalement les aménagements compatibles avec un milieu à forte vocation forestière en amont et urbaine en aval. En raison de la faible superficie relative des terres agricoles dans le BV, les techniques liées spécifiquement à ce type d'utilisation du territoire ne seront pas évaluées. Cependant, l'étude n'exclut pas la possibilité d'intégrer certains aménagements structurels sur ces terres, dans une perspective de conciliation des usages de l'eau.

Par la suite, les ANFN retenus ont été catégorisés selon des types de mesure généraux, regroupés en fonction de leurs effets spécifiques pour la gestion intégrée des risques d'inondation. Afin d'établir une relation causale, ces mesures ont ensuite été classées selon les principales catégories de risque identifiées à la section 2.2, soit la gestion hydromorphologique, la gestion des dynamiques sédimentaires et la gestion de l'aménagement du territoire.

Des tableaux pour chaque aménagement seront présentés dans les sections suivantes. Afin de faciliter la mise en commun des divers documents, les différents termes connexes anglais et français ont été recensés pour chaque aménagement. De plus, des tableaux comparatifs permettent de visualiser les principaux avantages et désavantages de chaque option. Lorsque disponible, le choix des études de cas répertoriés est orienté vers des projets situés dans des climats analogues et des bassins versants de caractéristiques physiques similaires, en adéquation avec le concept d'échelle de permanence de Yeoman. L'ensemble des

informations recueillies se base sur la documentation cataloguée au tableau 3.1, supplémenté par des références spécifiques identifiées pour chaque aménagement.

3.4.1 Gestion hydromorphologique

Les types de mesure associés à la gestion hydromorphologique se divisent en quatre catégories, soit la restauration de la rivière, la restauration de la plaine inondable et de ses milieux humides, la création de zones de stockage et la gestion des débris ligneux. Ces aménagements visent à améliorer ou à restaurer les capacités du système hydrographique à stocker, ralentir ou disperser les hautes eaux vers des zones d'exposition minimale pour les personnes et les infrastructures (CSA Group Research, 2021). Elles sont notamment associées au concept « d'espace de liberté du cours d'eau » qui s'appuie sur la restauration hydromorphologique afin d'augmenter la surface longitudinale du cours d'eau et renforcer sa connectivité latérale avec la plaine inondable. Les aménagements proposés permettent ainsi d'augmenter la capacité de stockage en eau du réseau hydrographique et réduire les débits de pointe.

Restauration de la rivière (voir tableau 3.3)

Bien que le concept de « restauration » soit généralement associé au retour vers un état initial, la restauration exacte d'un cours d'eau selon sa morphologie historique préindustrielle est souvent impossible, notamment en raison de contraintes socio-économiques et de l'occupation du territoire. Par ailleurs, le tracé historique de la rivière n'est potentiellement plus compatible avec l'état d'équilibre hydrodynamique actuel et futur de celle-ci (Bridges et al., 2021). Ainsi, le terme est plutôt employé en référence au rétablissement des processus physiques naturels permettant de contrôler les dynamiques hydrauliques et le transport des sédiments. L'emplacement de ces aménagements se situe principalement dans la zone aval où s'observe naturellement la plus grande complexité morphologique au sein du bassin versant.

Tout d'abord, le reméandrage d'une rivière consiste à modifier la morphologie des cours d'eau ayant été linéarisés selon une forme plus naturelle incluant une succession de méandres. Les interventions permettent ainsi d'augmenter le coefficient de sinuosité et la surface linéaire du cours d'eau. Lorsque planifié adéquatement, cet aménagement favorise également le rétablissement du profil d'équilibre entre les rives de sédimentation et d'érosion. La planification géographique des méandres doit à la fois se baser sur le tracé historique de la rivière et tenir compte de l'évolution hydromorphologique anticipée de celle-ci. Par ailleurs, les longueurs d'onde et l'amplitude des sinuosités planifiées doivent être hétérogènes afin d'éviter une morphologie trop régulière et peu naturelle (Adam et al., 2007).

Une alternative au reméandrage est la restauration ou la création d'une ou plusieurs annexes hydrauliques connectées hydrologiquement au cours d'eau principal. Ces aménagements incluent différentes structures

hydromorphologiques telles que les bras secondaires, les bras morts et les lacs d'oxbow. La diversion des écoulements dans ces annexes permet ainsi de répartir la charge hydraulique de la rivière de façon permanente ou temporaire lors des périodes de hautes crues. Le choix des annexes peut soit s'appuyer sur la remise en fonction d'anciens éléments hydrauliques, soit créer un nouveau système d'aménagement en considérant les impacts hydromorphologiques en aval.

Tableau 3.3 Aménagements pour la restauration de la rivière

		REMÉANDRAGE	RESTAURATION D'ANNEXES HYDRAULIQUES
		 (tiré de The River Restauration Centre, 2014)	 (tiré de AFB, 2010)
TERMES ASSOCIÉS	Français	Restauration des méandres, Espace de mobilité/liberté	Embranchement, Reconnexion d'annexes hydrauliques
	Anglais	Remeandering	Multi-thread channel, Side channel
BÉNÉFICES DIRECTS POUR LA GIRI		Contrôle du transport des sédiments par dépôt. Ralentissement des débits moyens et de pointe. Dissipation de l'énergie hydrodynamique sur les berges.	
CO-BÉNÉFICES		Diversification des niches écologiques (création de frayères). Embellissement du paysage.	
RISQUES		Perte de terres vouées à d'autres usages. Création de rives d'érosion et de dépôts sédimentaires problématiques. Formation de tronçons propices aux embâcles de glace et aux débris ligneux.	
		Risques écologiques de destruction des frayères et entrave à la migration de poissons lors de la reconstruction du cours d'eau.	Modifications hydromorphologiques non désirables en aval.
COÛTS ET ENTRETIEN		Requiers une modélisation hydraulique et la contribution de professionnels spécialisés pour la conception.	
		Entretien et inspection annuels minimaux.	Déblaiement des sédiments selon l'accumulation.
ÉTUDES DE CAS		Room for the river (Hollande) Rivière Rottal Burn (Royaume-Uni) Ville de Courtenay (Colombie-Britannique)	Rivière Rhine (Hollande) Mill Creek (Oregon, É-U) Shinglebolt Slough (Washington, É-U)
RÉFÉRENCES		Biotec, 2007 Iowa Department of Natural Resources, 2018 Soar et Thorne, 2001 Yochum, 2018	

Restauration de la plaine inondable et de ses milieux humides (voir tableau 3.4)

Ce type de mesure vise à renforcer la connectivité hydrologique entre la rivière et la plaine d'inondation afin d'acheminer et de stocker les surplus d'eau lors des périodes de crue, réduisant ainsi les risques d'inondation en aval. Ces eaux sont par la suite relâchées progressivement dans les rivières et par processus d'évapotranspiration. De plus, par la présence de végétation naturelle, les deux aménagements sélectionnés permettent d'augmenter la rugosité hydraulique de l'hydrosystème, réduisant ainsi les vitesses d'écoulement. Cette fonction est amplifiée selon le degré de maturité et la densité de la végétation (WWF, 2016).

Tout d'abord, les zones d'expansion des crues correspondent aux terres naturellement inondables adjacentes aux cours d'eau. Historiquement, certains de ces secteurs ont été déconnectés du réseau hydrographique et ont vu plusieurs de leurs fonctions se dégrader, soit par le développement urbain, soit par l'édification de barrières riveraines. L'aménagement de ces zones vise ainsi à restaurer ou à optimiser les plaines d'inondation afin d'instaurer des mécanismes de ralentissement dynamiques des crues. Cet ANFN inclut le démantèlement des contraintes latérales, telles que les murs de retenue ou les gabions, qui déconnectent la rivière du lit majeur. Certains projets impliquent également le reprofilage de la plaine en cellules stratégiques, formées par des dépressions naturelles ou construites, afin d'acheminer et maximiser la rétention de l'eau sur ce territoire (SEPA, 2015). L'aménagement peut aussi inclure des techniques de reprofilage topographique telles que l'excavation de la plaine afin d'augmenter la capacité de stockage de celle-ci (Commission Européenne, 2006). La création de routes d'écoulement préférentiel, par exemple avec l'utilisation de bancs de diversion qui redirigent les eaux de débordement de la rivière des zones à risque vers des zones à faible impact, peut également être intégrée. (Sayers et al., 2013).

Autre élément naturel favorisant la rétention des eaux et le ralentissement des écoulements, les milieux humides agissent comme « effet tampon » dans le bassin versant. La réintroduction de ces zones dans l'espace de mobilité des cours d'eau permet ainsi de réduire les inondations localisées dans les secteurs à risque situés en aval. Leur efficacité sur la réduction des risques d'inondation dépend du type de milieu humide, variant d'une capacité limitée et localisée pour les marécages forestiers et riverains, à une grande capacité de rétention pour les étangs et les tourbières (WWF, 2017). La restauration peut se baser sur la remise en fonction de milieux dégradés, soit ceux dont les caractéristiques hydrologiques, pédologiques et végétales ont été altérées de façon à réduire leurs capacités à absorber et retenir les eaux. Selon le contexte écologique et les considérations hydrologiques et réglementaires, de nouveaux milieux humides peuvent également être créés en amont des zones à risque.

Tableau 3.4 Aménagements pour la restauration de la plaine inondable et de ses milieux humides

		AMÉNAGEMENT DES ZONES D'EXPANSION DE CRUE	RESTAURATION DES MILIEUX HUMIDES
		 (tiré de Gordon et al., 2020)	 (tiré de City of Durnham, n.d.)
TERMES ASSOCIÉS	Français	Reconnexion de la plaine alluviale/inondable Espace d'inondabilité	Milieux humides construits.
	Anglais	Floodplain/Washland reconnection	Wetland restoration
BÉNÉFICES DIRECTS POUR LA GIRI		Stockage temporaire des eaux de crue. Réduction du débit moyen et de pointe. Augmentation de l'indice d'humidité des sols. Contrôle du transport des sédiments fins par dépôt.	
		Réduction de la hauteur d'eau de la rivière.	Désynchronisation des pointes de débit.
CO-BÉNÉFICES		Recharge de la nappe phréatique. Filtration des polluants associés aux matières en suspension et modération de l'eutrophisation des cours d'eau. Création de nouveaux habitats fauniques et floristiques. Production primaire de nourriture pour les communautés biologiques.	
		Favorise l'apport d'éléments nutritifs et de sédiments dans les sols alluviaux. Favorise la connectivité entre les milieux aquatiques et terrestres.	Soutien au débit d'étiage. Séquestration du dioxyde de carbone. Filtration de polluants tels que le phosphore et le nitrate.
RISQUES		Perte de terres vouées à d'autres usages.	
		Échouement des poissons après une période de hautes eaux	Émissions de méthane.
COÛTS ET ENTRETIEN		Coûts initiaux modérés, sauf en cas d'acquisition foncière des terres. Suivi occasionnel afin de valider l'efficacité technique et écosystémique.	Coûts initiaux variables selon le type et l'amplitude de l'aménagement. Suivi et inspection occasionnels par un technicien en restauration.
		Coûts d'entretien estimé à 0,5 à 1,5 % des coûts initiaux.	
ÉTUDES DE CAS		Rivières Chaudière et Compton (Québec) Rivière Coaticook (Québec) McKay Creek (Colombie-Britannique) Smith Creek (Saskatchewan)	
RÉFÉRENCES		American Rivers, 2016 Commission Européenne, 2006 CRUE Funding Initiative on Flood Risk Management Research, 2008	City of Saskatoon, 2014 Emmons and Olivier Resources, 2020 Interagency Workgroup on Wetland Restoration, 2003 MELCC, 2021 Moudrak et al., 2017 Thorslund et al., 2017

Création de zones de stockage (voir tableau 3.5)

Exerçant des fonctions similaires de rétention des eaux que les plaines inondables et les milieux humides, les zones de stockage visent à imiter les processus naturels plutôt qu'à les restaurer. Par leur morphologie, les bassins aménagés peuvent ainsi accueillir les hautes eaux de façon temporaire ou permanente afin de réduire les débordements en aval. Le degré de performance pour l'atténuation des risques d'inondation dépend de leur volume et de leur connectivité hydrologique (Environment Agency, 2018). Afin de maximiser l'efficacité, un système complexe en cascade peut être implémenté (Highways England, 2021). De ce fait, un réseau de petits ouvrages de rétention peut offrir une meilleure protection contre les risques d'inondation qu'un seul réservoir de grande taille (Environment Agency, 2018). De manière à maximiser l'acheminement et la rétention des eaux, les ouvrages peuvent également inclure des bancs de diversion et des digues de rétention autour des zones de stockage. Afin de minimiser les perturbations paysagères et les besoins en excavation, les caractéristiques topographiques naturelles du territoire sont à considérer.

L'aménagement de bassins secs permet de retenir les eaux de crue temporairement dans des dépressions naturelles ou des espaces ouverts développés. Ceux-ci sont habituellement conçus pour se vider entre 24 et 72 heures après l'averse. Durant cette période, une partie des eaux pluviales est ainsi infiltrée et évaporée, puis les eaux résiduelles sont réacheminées vers le cours d'eau ou le système d'égout. Ces aires sont habituellement conçues en tant que zone multiusage, pouvant servir par exemple d'aire de jeux, de terrain de sport ou de stationnement durant les périodes sèches. Toutefois, l'efficacité de cet aménagement est supérieure lorsque sa surface est couverte de végétation (Environmental Protection Agency [EPA], 2009).

Le bassin de rétention, pour sa part, est constamment chargé d'eau, mais possède une capacité volumique additionnelle afin d'absorber les eaux durant les périodes d'averses ou de fonte de neige. Ceux-ci permettent ainsi de désynchroniser les pointes de crue en relâchant les eaux en différé vers les milieux récepteurs. Ces ouvrages peuvent être connectés hydrauliquement de façon permanente au cours d'eau à l'aide de structures de diversion, ou être partiellement déconnectés de celui-ci. Ces derniers permettent d'intercepter le ruissellement sur le territoire, tandis que ceux adjacents à la rivière agissent directement sur les pics d'écoulement. Par ailleurs, il est à noter que les bassins connectés sont plus efficaces pour l'atténuation des crues lorsqu'ils sont situés en amont et distribués dans les tributaires du chenal principal (Ayalew et al., 2011; Goff et Gentry., 2006).

Tableau 3.5 Aménagements pour la création de zones de stockage

		BASSIN SEC	BASSIN DE RÉTENTION
			
		(tiré de ESA, 2022)	(tiré de Hewett et al., 2020)
TERMES ASSOCIÉS	Français	Bassin temporaire, Bassin d'infiltration	Bassin avec retenue, Marais artificiel, Étang de rétention
	Anglais	Detention / Dry / Bioretention pond, Stormwater Park, Infiltration basin	Retention pond, Flood/Flow storage reservoirs, Wet pond, Online / Offline pond
BÉNÉFICES DIRECTS POUR LA GIRI		Contrôle du transport des sédiments fins par dépôt. Relâchement de l'eau par évaporation. Interception du ruissellement.	
		Stockage temporaire des eaux de crue.	Stockage permanent des eaux. Désynchronisation des débits de pointe.
CO-BÉNÉFICES		Recharge de la nappe phréatique. Réduction de la pollution aquatique solide.	
		Possibilité d'usage multifonctionnel.	Filtration de la pollution organique et dissoute. Augmentation de la quantité d'eau disponible pour d'autres usages anthropiques. Opportunité récréative de baignade. Création de nouveaux habitats fauniques et floristiques
RISQUES		Remise en suspension des sédiments lors de forte pluviométrie. Risque d'inondation localisée par débordement.	Impacts négatifs potentiels sur la température de l'eau en aval. Réduction de l'oxygène dissous disponible et risque d'eutrophisation.
COÛTS ET ENTRETIEN		Requiers une modélisation hydraulique et la contribution de professionnels spécialisés pour la conception.	
		Coûts initiaux modérés, sauf en cas d'acquisition foncière des terres. Entretien régulier, particulièrement si la superficie est dédiée à de multiples usages.	Coûts initiaux plus élevés que les bassins secs variant selon le volume et la surface. Entretien annuel minimal de la végétation riveraine et aquatique. Excavation des sédiments afin de maintenir la capacité hydraulique de l'aménagement.
ÉTUDES DE CAS		Ville de Québec (Québec) Ithaca (New York, É-U)	Lorne Street Stormwater Mitigation Plan (Nouveau-Brunswick) Pelly's Lake (Manitoba) South Tobacco Creek Watershed (Manitoba) White Tower Park (Colombie-Britannique)
RÉFÉRENCES		Ontario Ministry of Environment, 2003 National Risk Management Research Laboratory, 2004 EPA, 2009 Ville de Québec, 2012	

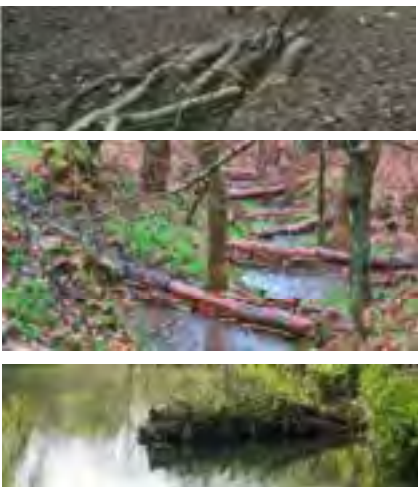
Gestion des débris ligneux (voir tableau 3.6)

La présence de débris ligneux est fréquemment observée le long des rivières du fait de la chute naturelle des branches et des troncs morts des arbres riverains, ou résultant des activités du castor et de l'industrie forestière. En se logeant dans certaines sections des cours d'eau, ces structures permettent de diversifier les écoulements et d'augmenter la rugosité hydraulique, réduisant localement la vitesse de la rivière et allongeant le temps de réponse de la crue. De plus, elles créent des zones de stockage temporaires en amont, atténuant les inondations en aval et augmentant la connectivité avec la plaine adjacente. Toutefois, les débris ligneux peuvent également causer des inondations localisées lorsque situés dans des zones non désirables ou près des ponceaux. Les aménagements proposés pour ce type de mesure réfèrent ainsi davantage à un mode de gestion stratégique des débris ligneux.

En premier lieu, la pose de débris ligneux permet de reproduire les processus physiques naturels bénéfiques en disposant des branches ou des troncs d'arbre dans les cours d'eau de façon stratégique. Tout d'abord, dans les grands cours d'eau, des déflecteurs peuvent être installés en alternance aux abords des cours d'eau afin d'ajouter de l'hétérogénéité dans le chenal. Ceux-ci réorientent et en diversifient le courant de façon similaire aux fonctions des méandres. De plus, les débris ligneux peuvent être posés de façon transversale au cours d'eau dans les cours d'eau d'ordres moyens afin de créer un barrage lors des hautes eaux. Connues sous le nom de « leaky dams », ces barrières perméables doivent être installées selon une hauteur stratégique qui laisse passer librement l'eau sous la structure lors de débits réguliers et bloque partiellement les écoulements lors de la montée des eaux afin de rediriger ceux-ci vers les terres adjacentes. Enfin, pour les petits cours d'eau pentus, la pose de fagots de bois parallèle au sens de l'écoulement de l'eau permet également de ralentir les débits à l'aval. Afin de réduire les risques écologiques et structurels, la conception de cet aménagement doit ainsi s'assurer que les plaines riveraines peuvent être inondées sans risque.

Par ailleurs, il existe plusieurs stratégies pour la gestion intégrée des problématiques liées aux barrages de castor (Fortin et al, 2001; Duchesne et al., 2013; Lavoie, 2018). De celles-ci, la méthode du pré-barrage fut sélectionnée en raison de sa compatibilité avec les critères définis pour un ANFN. Cet ouvrage préventif consiste à installer un remblai et de l'enrochement ou des troncs d'arbres en amont d'un ponceau afin d'inciter le castor à établir sa digue sur celui-ci. Le pré-barrage permet ainsi de protéger les infrastructures, en évitant notamment le colmatage des ponceaux. Lorsque planifiés adéquatement, les pré-barrages peuvent favoriser la construction de digues dans des zones stratégiques afin d'augmenter la superficie de milieux humides et ainsi renforcer leurs fonctions de régulation des niveaux d'eau.

Tableau 3.6 Aménagements pour la gestion des débris ligneux

		AMÉNAGEMENT DE DÉBRIS LIGNEUX	PRÉ-BARRAGES
		 (tiré de Slow The Flow Calderdale, 2022)	 (tire de Garneau et al., 2012)
TERMES ASSOCIÉS	Français	Épis, Déflecteurs, Fagots de bois	-
	Anglais	Flow deflectors, Leaky dam, Engineered log jam, Vanes	Pre-dam, Diversion dam
BÉNÉFICES DIRECTS POUR LA GIRI		Dissipation de l'énergie des écoulements. Contrôle du transport des sédiments fins par rétention et par création d'aires de dépôt.	Évite les inondations localisées en amont des ponceaux. Renforce les fonctions régulatrices des milieux humides. Création de zones de rétention ralentissant les écoulements.
CO-BÉNÉFICES		Création de micro-habitats aquatiques et rétention d'éléments nutritifs pour les microorganismes. Lieu de frayère pour les poissons.	Préserve l'habitat du castor et ses fonctions écosystémiques. Création de nouveaux habitats fauniques et floristiques et source de nourriture.
RISQUES		Risque d'inondation localisée en amont. Création d'embâcles et enjeu de sécurité lié au détachement du débris. Sédimentation en amont de l'aménagement peut réduire l'efficacité.	Risque de construction du barrage par le castor près du ponceau malgré l'installation. Blocage du passage des poissons. Eutrophisation des milieux aquatiques.
COÛTS ET ENTRETIEN		Entretien minimal et suivi annuel de l'efficacité de la structure.	
		Coûts initiaux minimaux, particulièrement si les matériaux sont revalorisés. Remplacement de la structure au 5 à 10 ans.	Coûts initiaux modérés, moindres si les structures sont construites au moment de la construction des routes. Entretien régulier.
ÉTUDES DE CAS		Rivière Osgood (Québec) Lower North Fork Floodplain (Washington, É-U)	OBV Manicouagan (Québec) OBV rivières Rouge, Petite Nation et Saumon (Québec)
RÉFÉRENCES		Wheaton et al., 2019	
		Environment Agency, 2011 Thomas et Nisbet, 2012 Le Lay, 2004 SEPA, 2001 Wohl et al., 2016	Fortin et al., 2001 Duchesne et al., 2013

3.4.2 Gestion des dynamiques sédimentaires

Dans la zone moyenne et en amont du bassin versant, il existe plusieurs opportunités d'intervention afin de modifier les dynamiques de ruissellement et de transport des sédiments avant leur acheminement dans le réseau hydrographique (voir tableau 3.7). Afin de répondre aux enjeux identifiés préalablement, les trois aménagements sélectionnés visent ainsi à atténuer les conséquences des chemins forestiers et de leurs infrastructures de drainage. Un système incluant les trois aménagements peut être développé afin d'assurer une protection adaptée contre la surcharge hydraulique, les risques d'érosion et la sédimentation subséquente des cours d'eau (Environment Agency, 2018). De plus, les caractéristiques topographiques, telles que la pente et les lignes de contour, doivent également être considérées afin d'optimiser le captage du ruissellement et des sédiments (Highways England, 2021).

Fossés végétalisés

La présence de végétation dans les fossés stabilise les sols et augmente le taux et la quantité d'infiltration de l'eau dans ceux-ci. Ces fonctions permettent ainsi de diminuer et ralentir la charge hydraulique dans le réseau hydrographique, ayant un effet modérateur sur les pics de crue (University of Minnesota, 2014). Cette mesure se décline en deux options, soit la revégétalisation des fossés dénudés existants des réseaux de drainage routier, et la création de fossés déconnectés sur les terres mises à nue. Concernant cette dernière, la mise en place de fossés perpendiculaires aux lignes d'écoulement des eaux permet d'intercepter le ruissellement et d'encourager la rétention de sédiments avant leur arrivée dans le système de drainage routier et forestier. La performance de cet aménagement peut également être maximisée par la création d'un talus en aval du fossé planté d'une haie d'arbres ou d'arbustes (Environment Agency, 2018). Les zones de coupes à blanc pentues pourraient particulièrement bénéficier de cette technique d'aménagement.

Bermes filtrantes

Les bermes filtrantes forment des barrières semi-perméables dans les fossés afin de favoriser la décantation des sédiments, ainsi que la rétention et l'infiltration de l'eau. En formant un obstacle à l'écoulement, le ralentissement de l'eau atténue l'augmentation rapide des débits dans les cours d'eau récepteurs et diminue l'érosion des fossés. Afin de respecter les principes d'un ANFN, ces structures doivent être construites de matériaux naturels tels que le bois, la terre ou la roche. Enfin, les bermes doivent avoir une forme de banane afin de créer un déversoir central pour l'écoulement de l'eau et réduire l'érosion périphérique (Abrinord, 2009).

Bassins de sédimentation

Les bassins de sédimentation sont des dépressions aménagées qui captent l'eau de ruissellement et permettent la décantation des matières en suspension. Intégrés au système de drainage par une entrée et une sortie, ces aménagements permettent de rediriger les eaux circulant dans les fossés vers des zones de rétention, atténuant la charge hydraulique vers les milieux récepteurs. De plus, ils favorisent la collecte des eaux de drainage des terres adjacentes surélevées. Par ailleurs, la construction de digues de rétention en terre autour des bassins permet de varier la topographie à l'échelle du site et d'intercepter davantage le ruissellement (Environment Agency, 2018). En raison de leur petite taille, il est recommandé d'installer plusieurs de ces aménagements dans des endroits stratégiques à travers le territoire du bassin versant afin de maximiser leurs effets sur le contrôle de l'érosion, de la sédimentation et du ruissellement (Commission Européenne, 2015).

Tableau 3.7 Aménagements pour la gestion des dynamiques sédimentaires

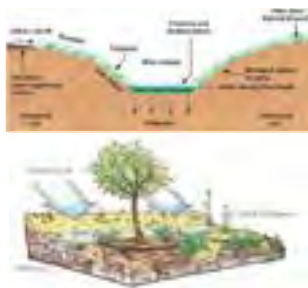
		FOSSÉS VÉGÉTALISÉS	BERMES FILTRANTES	BASSINS DE SÉDIMENTATION
				
		(tire de Hekka et al., 2020)	(tiré de Abrinord, 2009)	(tiré de FFQ, 2003)
TERMES ASSOCIÉS	Français	Noues/Fossés engazonnés	Seuils, Barrières de retenue des sédiments	Trappes à sédiments, Bassins de décantation
	Anglais	Bioretention swales, Filter strips	In-ditch barriers/traps, Check dams	Sediment capture ponds, Sediment traps
BÉNÉFICES DIRECTS POUR LA GIRI		Augmentation de l'infiltration et de l'indice d'humidité des sols. Allongement du temps de parcours de l'eau sur le territoire.		
		Contrôle du transport des sédiments fins par dépôt.	Contrôle du transport des sédiments fins par rétention et par création d'aires de dépôt.	
CO-BÉNÉFICES		Recharge de la nappe phréatique. Filtration des polluants associés aux matières en suspension et modération de l'eutrophisation des cours d'eau.		
RISQUES		Transfert de polluants vers la nappe phréatique.		
		Risques d'inondation localisée si la végétation est mal entretenue.	Création de cascades lors d'épisodes de fortes pluies aggravant l'érosion.	Remise en suspension des sédiments lors de forte pluviométrie. Émissions potentielles de CO ₂ , méthane et N ₂ O.

Tableau 3.7 Aménagements pour la gestion des dynamiques sédimentaires (suite)

	FOSSÉS VÉGÉTALISÉS	BERMES FILTRANTES	BASSINS DE SÉDIMENTATION
COÛTS ET ENTRETIEN	Coûts initiaux faibles pour la planification, l'excavation et la pose des aménagements.		
	Entretien annuel de débroussaillage.	Déblaiement régulier des sédiments. Inspections et réparations structurelles régulières	
ÉTUDES DE CAS	Cadre règlementaire REGIS du Brome-Mississquoi (Québec)		
RÉFÉRENCES	Abrinord, 2009 Comission Européenne, 2015 Hannu et Kløve, 2010 University of Minnesota, 2014 Virginia Department of Forestry, 2011		

3.4.3 Gestion de l'aménagement du territoire

Les types de mesure associés à la gestion de l'aménagement du territoire visent à restaurer les fonctions hydrologiques du paysage et atténuer les conséquences liées à l'occupation humaine.

Reboisement (voir tableau 3.8)

Comme vu à la section 2.2.3, les arbres et autres strates arbustives forestières accomplissent plusieurs fonctions modératrices des risques d'inondation. De ce fait, un couvert forestier mature et hétérogène exerce une protection et un renforcement de la structure des sols, augmente l'infiltration et l'interception des précipitations et réduit le ruissellement de surface et l'érosion. Par ailleurs, les forêts permettent de réduire la teneur en eau des sols via leur système racinaire par processus de transpiration. De plus, elles permettent d'augmenter le taux d'absorption de l'eau dans la couche supérieure des sols en améliorant la structure de ceux-ci (WWF, 2016). Elles modèrent également la vitesse de fonte de neige par leur couvert ombragé, réduisant la charge hydraulique durant les périodes de dégel (Commission Européenne, 2015).

Dans les zones moyennes et en amont du bassin, la restauration du couvert forestier est particulièrement efficace, notamment en raison de l'abondance des précipitations et des pentes plus raides (WWF, 2016). De ce fait, plusieurs études mesurant l'impact du reboisement dans ces zones démontrent une réduction globale du pic de crue en réponse aux aménagements, particulièrement pour les canopées couvrant 70% et plus (Environmental Agency, 2018; EEA, 2015). Ainsi, la priorité pour le reboisement doit s'effectuer dans les zones clairsemées, notamment dans les aires de coupes totales, afin de restaurer un couvert forestier continu. De plus, les zones de vallée et de fortes pentes devraient être plantées plus densément en raison de leurs contributions significatives au processus d'inondation dans le bassin versant (WWF, 2016). Dans l'impossibilité d'un reboisement complet, la plantation de rangées d'arbres suivant les lignes de contour topographiques perpendiculaires à la pente d'environ 10 mètres de large offre plusieurs bénéfices pour le contrôle de la sédimentation et du ruissellement (Environmental Agency, 2018).

Concernant la zone aval, le reboisement effectue des fonctions similaires sur les composantes du cycle de l'eau. Cependant, en raison des contraintes de l'urbanisation, la planification de cet aménagement doit reposer sur différentes considérations. Dans cette région, les fonctions principales des arbres sont l'assèchement des sols et le blocage des débordements des cours d'eau. De plus, en augmentant la rugosité hydraulique du territoire, la végétation permet de réduire et détourner les écoulements en formant des canaux et des microbassins de rétention déconnectés du cours d'eau principal (Bridges et al., 2021). Compte tenu de l'impossibilité de restaurer un couvert forestier continu dans les zones urbaines, les zones prioritaires pour le reboisement doivent ainsi tenir compte de la pente, de la proximité des cours d'eau et de l'emplacement à l'égard du réseau de drainage urbain. De ce fait, plusieurs petits blocs de reboisement stratégiquement positionnés peuvent être aussi efficaces qu'un seul grand bloc continu (SEPA, 2015).

Tableau 3.8 Aménagements pour le reboisement

		REBOISEMENT AMONT/MOYEN	REBOISEMENT PLAINE ALLUVIALE
TERMES ASSOCIÉS	Français	 (tiré de Highways England, 2021) Plantation d'arbres, Restauration des paysages forestiers	 (tiré de Limnotech, 2022) Plantation d'arbres, Forêt alluviale
	Anglais	Upland reforestation, Upper Watershed Reforestation, Gullies woodlands, Cross-slope woodlands	Lowland/Floodplain Woodlands
BÉNÉFICES DIRECTS POUR LA GIRI		Augmentation du coefficient de rugosité des sols ralentissant le ruissellement. Évacuation de l'eau sur le territoire par transpiration. Interception des précipitations sous forme liquide et solide. Réduits la fonte rapide des neiges par l'ombrage.	
		Amélioration de la structure du sol favorisant l'infiltration et réduisant la formation de rigoles.	Absorption et détournement des débordements des rivières.
CO-BÉNÉFICES		Stimulation du cycle hydrologique par le relâchement de composés organiques volatils générant la formation de nuages. Création de nouveaux habitats fauniques et floristiques. Renforce la connectivité écologique du territoire. Séquestration du dioxyde de carbone. Filtration des polluants associés aux matières en suspension et modération de l'eutrophisation des cours d'eau.	

Tableau 3.8 Aménagements pour le reboisement (suite)

	REBOISEMENT AMONT/MOYEN	REBOISEMENT PLAINE ALLUVIALE
CO-BÉNÉFICES	Possibilité de synergie économique avec l'industrie forestière.	Réduction des îlots de chaleur urbains. Purification de l'air pour les citoyens.
RISQUES	Introduction d'espèces envahissantes. Réduction des revenus pour l'industrie forestière	
	Réduction de la quantité d'eau de surface disponible. Création d'embâcles ligneux hasardeux.	Dommages aux infrastructures urbaines souterraines par le réseau racinaire. Refolement des eaux en amont.
	Coûts initiaux faibles à modérés, dépendant du type d'espèces, de la densité de la plantation et du niveau de protection requis. Requiers peu d'entretien, sauf pour la replantation selon le taux de mortalité des arbres. Suivi et inspection occasionnels par un technicien en restauration.	
COÛTS ET ENTRETIEN	Coût d'opportunité possible en raison des compromis d'usage avec l'industrie forestière.	Coûts d'entretien additionnels pour l'élagage des branches.
ÉTUDES DE CAS	Ganaraska River Headwaters Reforestation (Ontario)	Neil's Flat (Nouveau-Brunswick)
RÉFÉRENCES	Greater Fundy Ecosystem Research Group, 2005	
	Nature Conservancy Canada, 2018 Simpson, 2015	McGrath et al., 2019 Paquette, 2016 TreeCanada, n.d.

Bandes riveraines (voir tableau 3.9)

Lorsque la composition et la structure naturelle des bandes riveraines sont modifiées ou dégradées, celles-ci perdent leur capacité à protéger les cours d'eau. Ainsi, la revégétalisation de ces zones tampons permet de renforcer la résistance naturelle des rives à absorber les hautes eaux et la forte vélocité des courants. Les plantes riveraines indigènes sont adaptées aux conditions de crue, notamment par le développement d'un système racinaire très ramifié, colonisé par des microorganismes qui stabilisent les sols (Bridges et al., 2021). En plus de former une barrière aux débordements des cours d'eau, les bandes tampons végétalisées réduisent également le transport des sédiments et l'érosion des rives. Ainsi, elles peuvent réduire les coûts liés à la reconstruction des berges pour la municipalité. Ces aménagements augmentent également la rugosité des sols, ralentissant le ruissellement et interceptant les sédiments provenant des terres adjacentes. De ce fait, des études démontrent que les bandes tampons peuvent réduire les taux de sédimentation dans les cours d'eau jusqu'à 80 % (UN Environment, 2018).

Lorsque les rives nécessitent un renforcement structurel accru, soit en raison de la proximité d'infrastructures ou de la haute vélocité du courant, plusieurs ANFN permettent de remplacer les techniques conventionnelles d'enrochement, de cimentation et d'installation de gabions. Par exemple, la technique de bio-ingénierie de fascine vivante consiste à enchevêtrer et assembler des branches vivantes et non vivantes de façon à former une structure ligneuse stabilisant les rives. Ces ouvrages créent des remparts qui, à

l'opposé des aménagements conventionnels, permettent d'absorber l'énergie cinétique de la rivière, de déposer les sédiments et d'assurer la connectivité entre le milieu aquatique et terrestre. Les branches d'espèces arbustives utilisées, principalement de la famille du saule, sont choisies en fonction de leur capacité à générer rapidement un réseau de racines, produisant avec le temps une couverture végétale très dense en surface.

Tableau 3.9 Aménagements pour les bandes riveraines

		BANDES TAMPONS	FASCINES VIVANTES
			
		(tiré de CBLSA, n.d.)	(tiré de AquaTerra Solutions, n.d.)
TERMES ASSOCIÉS	Français	Bandes riveraines, zones tampons	Fagots, Matelas de branches, Rangs de plançons
	Anglais	Riparian buffer/strip	Living fascine, Willow planting, Wattle
BÉNÉFICES DIRECTS POUR LA GIRI		Réduction des risques d'emportement des rives. Absorption de l'énergie cinétique de la rivière et des montées d'eau. Augmentation du coefficient de rugosité des sols ralentissant le ruissellement.	
CO-BÉNÉFICES		Création de nouveaux habitats fauniques et floristiques. Renforce la connectivité écologique du territoire.	
		Filtration de la pollution organique et dissoute et des matières en suspension. Régulation de la température de l'eau par l'ombrage.	Dépôt de sédiments fins.
RISQUES		Introduction d'espèces envahissantes	
		Création d'embâcles ligneux hasardeux.	Risque de défaillance entraînant l'érosion de la rive.
COÛTS ET ENTRETIEN		Coûts initiaux modérés, requérant un minimum d'expertise et de matériaux.	
		Inspection et programmes de désherbage annuels.	Inspections et entretiens réguliers en début de projet. Entretien minimal suite à l'instauration des végétaux.
ÉTUDES DE CAS		Chignecto Agro Conservation Club (Nouveau-Brunswick) Kennebecasis Watershed Restoration Committee (Nouveau-Brunswick)	OBV Côte-du-Sud (Québec) Rivière des Hurons (Québec)
RÉFÉRENCES		Fédération interdisciplinaire de l'horticulture ornementale du Québec, 2013 Island Nature Trust, n.d. Kennebecasis Watershed Restoration Committee, 2020	Evette et al., 2019 Gouvernement du Québec, 2005 USDA Forest Service, 2002

4. ANALYSE MULTICRITÈRE

Afin de prioriser plus spécifiquement les aménagements appropriés pour l'atténuation des risques d'inondation dans le bassin versant Rivière-à-la-Truite, la méthode d'analyse multicritère (AMC) a été sélectionnée. L'AMC est un outil d'aide à la décision où les différentes alternatives sont notées selon une liste de critères prédéfinis, choisis selon les objectifs du projet (Bridges et al., 2021). Ce type d'analyse est fréquemment utilisé pour la gestion des risques hydrométéorologiques en raison de sa flexibilité, sa transparence et sa capacité à intégrer de multiples objectifs (Langemeyer et al., 2016; Ruangpan et al., 2020).

L'AMC est particulièrement pertinente pour l'évaluation des ANFN en raison des multiples co-bénéfices indirects que ceux-ci génèrent. De ce fait, cette méthode se distingue de l'analyse coût-bénéfice (ACB) fréquemment employée pour ce type de projet en s'appuyant sur une évaluation semi-qualitative plutôt que sur la conversion des effets environnementaux et sociaux sous forme de capital financier. Considérant que la plupart des co-bénéfices sont des services non marchands, il peut être difficile, dispendieux et controversé de monnayer ceux-ci selon l'approche de l'ACB. Ainsi, l'évaluation par AMC se base plutôt sur une multitude de sources, incluant des mesures quantitatives et qualitatives issues de jugements d'experts, de recherches scientifiques et d'études de cas. Cette méthode permet ainsi de formuler une prise de décision viable et holistique. Par ailleurs, en intégrant une démarche participative afin de hiérarchiser les critères, l'AMC permet d'augmenter l'engagement des parties prenantes et de sélectionner des mesures adaptées au contexte local.

4.1 DÉMARCHE MÉTHODOLOGIQUE

L'analyse multicritère élaborée dans le cadre de cette étude s'inspire principalement de la méthodologie développée par Ruangpan et al. (2020) pour la planification de solutions fondées sur la nature à l'échelle paysagère. La première étape fut ainsi d'établir une liste de critères pour chaque dimension du cadre d'analyse de développement durable, soit la performance technique, l'environnement, la société et la performance économique. La performance technique réfère aux bénéfices directs pour la GIRI de chaque aménagement, soit sa capacité à atténuer les forces physiques contribuant au risque d'inondation. Le contrôle des sédiments et de l'érosion sont également inclus comme composante de cette dimension en raison des impacts directs de ce phénomène sur les inondations et sur la performance structurelle des ANFN. Les dimensions de l'environnement et de la société évaluent les co-bénéfices potentiels de chaque aménagement pour ces secteurs. Pour leur part, les critères de performance économique analysent d'une part les coûts associés à chaque étape de la gestion de projet, et d'autre part, la performance de

l'aménagement dans le temps. Par la suite, une sélection d'indicateurs a été assignée pour chaque critère, basée sur une revue de la littérature scientifique.

Afin d'évaluer les impacts positifs et négatifs de chaque aménagement sur les critères définis, une note a été attribuée pour tous les indicateurs. L'évaluation finale des indicateurs peut être consultée à l'annexe 2 du présent document. Celle-ci est basée sur la conversion des données qualitatives et quantitatives des différents ouvrages scientifiques, guides de références et études de cas consultés pour la section 3. L'évaluation des indicateurs se base également sur plusieurs études ayant produit des mesures qualitatives et quantitatives des bénéfices directs, des co-bénéfices et des coûts de plusieurs aménagements à l'étude (Boyer-Villemaire et al., 2021; Bridges et al., 2021; Burgess-Gamble et al., 2018; Commission Européenne, 2015; Ruangpan et al., 2020; SEPA, 2015; WWF, 2017). Un système de notation standardisé a été développé pour l'évaluation des indicateurs selon la classification présentée à la figure 4.1.

0	Aucun effet sur l'indicateur	- 1	Effet négatif très faible sur l'indicateur
1	Effet positif très faible sur l'indicateur	- 2	Effet négatif faible sur l'indicateur
2	Effet positif faible sur l'indicateur	- 3	Effet négatif modéré sur l'indicateur
3	Effet positif modéré sur l'indicateur	- 4	Effet négatif fort sur l'indicateur
4	Effet positif fort sur l'indicateur	- 5	Effet négatif très fort sur l'indicateur
5	Effet positif très fort sur l'indicateur		

Figure 4.1 Système de notation pour l'évaluation des critères et indicateurs

Afin de hiérarchiser les critères de l'analyse selon les intérêts et préoccupations locaux, un questionnaire a été transmis à toutes les parties prenantes ayant été identifiées comme ayant un degré d'influence modéré à direct. Celui-ci peut être consulté à l'annexe 3. Dans celui-ci, les participants doivent assigner une valeur numérique de 0 à 3 reflétant le degré d'importance de chaque critère des dimensions de l'environnement, de la société et de la performance économique pour leur organisation. La pondération des critères se base sur la typologie développée par l'Université du Québec à Chicoutimi pour l'élaboration d'une grille d'analyse de développement durable, présentée au tableau 4.1.

Tableau 4.1 Grille de pondération des critères (adaptée de Villeneuve et al., 2016)

Dans le cadre de la gestion de l'aménagement du territoire et des ressources en eau dans le bassin versant Rivière-à-la-Truite, ce critère est un :		
0	Objectif non valable	L'atteinte de cet objectif n'est pas applicable dans le contexte du bassin versant Rivière-à-la-Truite.
1	Objectif souhaitable	L'atteinte de cet objectif n'est pas jugée particulièrement importante, ou il est non prioritaire pour le projet.
2	Objectif important	L'atteinte de cet objectif est importante, mais ne figure pas parmi les priorités immédiates pour le projet.
3	Objectif indispensable	L'atteinte de cet objectif est importante et figure parmi les priorités immédiates. Il est jugé indispensable pour le succès du projet.

Enfin, la pondération des critères pour la réduction des risques d'inondation et le contrôle des sédiments et de l'érosion n'a pas fait l'objet d'un sondage. La pondération a plutôt été attribuée en fonction de l'importance de chaque indicateur pour l'atténuation des risques, tels que définis dans la section 2.

À la suite de l'évaluation de chaque indicateur, le score de chaque critère ($S_{\text{critère}}$) est établi selon la même classification, entre -5 et 5, en calculant la moyenne de ses indicateurs (Z_i) et en arrondissant au premier décimal afin d'obtenir un nombre entier. Les notes de 0 sont exclues du calcul de la moyenne pour les dimensions de performance, d'environnement et de société en raison de l'absence d'effet de cette notation.

$$S_{\text{critère}} = \bar{x}(Z_i) \text{ si } Z_i \neq 0$$

À la suite de la collecte des résultats du questionnaire par les parties prenantes, une moyenne des pondérations est calculée pour tous les critères. Les pondérations de chaque critère sont ensuite normalisées selon une échelle de 0 à 1 en fonction de l'équation présentée ci-dessous. Cette méthode permet de créer un modèle de distribution logique pour l'ensemble des résultats pondérés.

$$W_{\text{critère normalisé}} = \frac{\omega_i}{\sum \omega_i}$$

Où ω_i représente la moyenne des résultats attribuée par l'ensemble des parties prenantes pour le critère. Par la suite, le résultat pondéré de chaque critère est calculé en multipliant son score avec la pondération normalisée qui lui est associée. À cette étape, les résultats négatifs sont convertis en valeur positive en ajoutant 5 points afin d'effectuer l'agrégation des résultats selon une échelle de bénéfices.

$$S_{\text{pondéré}} = W_{\text{critère normalisé}} S_{\text{critère}}$$

Subséquentement, les scores pondérés sont normalisés afin d'obtenir une distribution logique des résultats entre 0 et 1 en les divisant par le maximum de points attribuables pour l'évaluation, soit 5. Ce résultat représente la donnée principale pour la sélection d'aménagements appropriés pour le bassin versant.

$$S_{final} = \frac{S_{pondéré}}{5}$$

4.2 DESCRIPTION DES CRITÈRES

Le choix des critères est basé sur les objectifs préliminaires de gestion intégrée des risques d'inondation, ainsi que les critères et principes clés définis pour les SFN et les ANFN. Ces critères, définis dans le tableau 4.2, représentent des objectifs à atteindre pour la gestion de l'aménagement du territoire et des ressources en eau dans le BV Rivière-à-la-Truite.

Tableau 4.2 Description des critères pour chaque dimension

BÉNÉFICES DIRECTS POUR LA GIRI – PERFORMANCE TECHNIQUE	
CRITÈRE	DESCRIPTION
Réduction du ruissellement	Évalue la performance de l'aménagement à ralentir et retenir l'eau sur les surfaces terrestres, notamment par l'augmentation du coefficient de rugosité et la déviation des écoulements.
Réduction du débit de pointe	Évalue la performance de l'aménagement à contribuer au laminage des crues en réduisant le débit maximum observé, notamment par la répartition de la crue dans le temps en stockant ou en retenant les écoulements de surface.
Augmentation de l'infiltration	Évalue la performance de l'aménagement à contribuer au processus de transfert de l'eau des précipitations de la surface vers les couches superficielles du sol. Considère les effets bénéfiques sur la porosité et la perméabilité du sol.
Augmentation de la capacité de rétention hydrique	Évalue la performance de l'aménagement à stocker l'eau précipitée sur la surface du sol durant une période excédant la durée de la crue.
Augmentation de l'évapotranspiration	Évalue la performance de l'aménagement à augmenter la quantité totale d'eau transférée vers l'atmosphère, soit par l'évaporation de surface ou par la transpiration des végétaux.
Contrôle des sédiments et de l'érosion	Évalue la performance de l'aménagement pour l'atténuation des forces physiques qui contribuent au risque d'érosion hydrique de surface des terres et des rives, ainsi que des processus de sédimentation des cours d'eau. Celles-ci incluent notamment le dépôt problématique de sédiments par l'élévation du fond de la rivière ou la création de bancs de sédimentation.

Tableau 4.2 Description des critères pour chaque dimension (suite)

CO-BÉNÉFICES – ENVIRONNEMENT	
CRITÈRE	DESCRIPTION
Réduction des risques de sécheresse	Évalue la performance de l'aménagement pour l'atténuation de la fréquence, la durée et l'intensité des périodes de sécheresse. Considère les effets potentiels sur l'augmentation du taux d'humidité des sols et l'augmentation des niveaux d'eau durant les périodes d'été.
Amélioration de la qualité de l'eau de surface	Évalue la performance de l'aménagement pour l'amélioration de la qualité physico-chimique des eaux de surface qui peuvent affecter les écosystèmes et la santé humaine. Considère son potentiel pour le traitement de certaines sources de pollution telles que le nitrate, le phosphore, les matières en suspension et les métaux lourds. Considère les effets bénéfiques sur les paramètres physiques de l'eau tels que la température, le pH et la turbidité.
Amélioration des nappes phréatiques	Évalue la performance de l'aménagement pour l'amélioration des eaux souterraines dans la région. Considère les effets potentiels sur la recharge de la nappe phréatique et la réduction de la pollution et de la contamination de ces eaux.
Augmentation de la capacité de stockage du carbone	Évalue la performance de l'aménagement pour la réduction de la quantité de dioxyde de carbone atmosphérique en tant que stratégie d'atténuation des changements climatiques. Considère sa capacité à agir en tant que puits de carbone pour la séquestration et le stockage du CO ₂ , réduisant ainsi les teneurs de ce gaz à effet de serre.
Renforcement de la connectivité écologique	Considère le potentiel de l'aménagement à renforcer le « degré de connexion entre les divers milieux naturels présents au sein d'un même paysage, sur le plan de leurs composantes, de leur répartition spatiale et de leurs fonctions écologiques » (MELCC, s. d.). Évalue sa performance à faciliter le mouvement des espèces au sein et entre les habitats terrestres, aquatiques et riverains dans l'optique d'améliorer la résilience de la biodiversité.
Création d'habitats fauniques et floristiques	Considère le potentiel de l'aménagement à renforcer la biodiversité dans la région en matière d'abondance et de diversité des espèces. Évalue sa performance pour la création de nouveaux habitats terrestres, aquatiques et riverains, l'augmentation de la surface d'habitats existants ou l'amélioration de leurs qualités sur le plan de leurs fonctions et de leurs composantes.
CO-BÉNÉFICES – SOCIÉTÉ	
CRITÈRE	DESCRIPTION
Augmentation des opportunités récréotouristiques	Évalue le potentiel de l'aménagement à créer de nouvelles opportunités récréatives dans la région en termes de superficie et de diversité des activités au bénéfice des citoyens et potentiellement afin d'augmenter le nombre de touristes sur le territoire.
Augmentation des opportunités éducatives	Considère le potentiel de l'aménagement à contribuer au développement des connaissances sur des sujets connexes tels que la réduction du risque d'inondation et les dynamiques des écosystèmes dans la région. Identifie les opportunités d'apprentissage pour la communauté scientifique, ainsi que pour la sensibilisation des citoyens.
Augmentation de la quantité d'eau disponible	Évalue la performance de l'aménagement pour l'augmentation des réserves d'eau disponible pour les différents usages anthropiques dans la région. Considère les effets bénéfiques sur la disponibilité des eaux de surface pour l'approvisionnement en eau potable, l'irrigation des cultures et les besoins industriels et énergétiques.
Réduction des îlots de chaleur urbains	Considère le potentiel de l'aménagement à modérer les températures maximales en milieu urbain, notamment dans un contexte de changements climatiques. Évalue sa performance pour la réduction de l'écart des températures observé entre la ville et la campagne.

Tableau 4.2 Description des critères pour chaque dimension (suite)

Amélioration de la santé humaine et du bien-être	Évalue la performance de l'aménagement pour l'amélioration de la santé physique, mentale et psychosociale des citoyens. Considère les bénéfices directs et indirects potentiels, par exemple via l'augmentation des opportunités d'activités physiques, l'amélioration de la qualité de l'air ou la réduction de la pollution auditive.
Augmentation de la valeur foncière des terres et propriétés	Évalue la contribution de l'aménagement pour l'augmentation de la valeur foncière des terres et propriétés de la région, notamment par l'amélioration de l'esthétique paysagère et la création d'espaces verts en milieu urbain.
PERFORMANCE ÉCONOMIQUE	
CRITÈRE	DESCRIPTION
Minimisation des coûts initiaux	Évalue les coûts liés à la conception de l'aménagement, incluant le degré d'expertise requis, les besoins en collecte de données et les frais liés à l'obtention de permis.
Minimisation des coûts de construction	Évalue les coûts liés à la mise en œuvre de l'aménagement, incluant les besoins en machinerie et en personnel qualifié. Considère également les besoins en espace, associés aux coûts d'acquisition foncière de terres.
Minimisation des coûts d'exploitation	Évalue les coûts liés à l'entretien et au suivi de l'aménagement ainsi que les frais administratifs annuels.
Minimisation des coûts d'opportunité	Évalue les coûts liés à la perte d'usage de certaines ressources naturelles ou de terres par la mise en œuvre de l'aménagement, notamment pour l'industrie forestière, l'agriculture, le développement immobilier ou les entreprises industrielles.
Maximisation de la durabilité	Évalue l'espérance de vie potentielle de l'aménagement, mesurée selon une échelle temporelle de courte (5 à 10 ans) à très longue (50 ans et plus).
Maximisation de la rapidité du retour sur investissement	Évalue la vitesse à laquelle l'aménagement peut atteindre son plein potentiel de réduction des risques, mesurée selon une échelle temporelle allant de l'immédiat à longue (10 ans et plus).

4.3 INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

Les différents résultats obtenus permettent ainsi d'affiner la sélection d'ANFN selon d'une part, les préférences des parties prenantes locales, et d'autre part, leur performance sur le plan des bénéfices directs, des co-bénéfices et des coûts.

4.3.1 Matrice d'analyse multicritère

Le tableau 4.3 présente un sommaire des résultats préliminaires, soit avant l'intégration des pondérations, de l'évaluation des critères pour tous les aménagements présélectionnés. L'analyse détaillée de tous les indicateurs évalués pour chaque critère peut être consultée à l'annexe 2.

Tableau 4.3 Matrice d'analyse multicritère

			PERFORMANCE TECHNIQUE						ENVIRONNEMENT						SOCIÉTÉ						PERFORMANCE ECONOMIQUE					
			Réduction du ruissellement	Réduction du débit de pointe	Augmentation de l'infiltration	Augmentation de la capacité de rétention hydraulique	Augmentation de l'évapotranspiration	Contrôle de l'érosion et des sédiments	Réduction des risques de sécheresse	Amélioration de la qualité de l'eau	Amélioration des nappes phréatiques	Augmentation de la capacité de stockage du carbone	Renforcement de la connectivité écologique	Création d'habitats fauniques et floristiques	Augmentation des opportunités récréotouristiques	Augmentation des opportunités éducatives	Augmentation de la quantité d'eau disponible	Réduction des îlots de chaleur urbains	Amélioration de la santé humaine et du bien-être	Augmentation de la valeur foncière des terres et propriétés	Minimisation des coûts initiaux	Minimisation des coûts de construction	Minimisation des coûts d'exploitation	Minimisation des coûts d'opportunité	Maximisation de la durabilité	Maximisation de la rapidité du retour sur investissement
GESTION HYDROMORPHOLOGIQUE	Restauration de la rivière	Reméandrage	1	4	2	3	2	4	3	2	2	1	4	4	2	5	1	2	2	4	-5	-4	-1	-2	5	4
		Restauration d'annexes hydrauliques	2	5	2	5	2	3	2	1	2	1	4	5	3	4	1	2	2	4	-5	-4	-2	-2	5	4
	Restauration de la plaine inondable et de ses milieux humides	Aménagement des zones d'expansion de crue	3	5	4	4	3	4	4	3	3	3	5	4	1	3	-1	2	2	3	-3	-4	-2	-1	5	5
		Restauration / Création de milieux humides	3	4	3	4	2	3	5	4	4	5	4	4	2	5	2	2	2	3	-4	-3	-2	-1	5	4
	Création de zones de stockage	Bassin sec	2	3	3	3	2	2	2	1	1	1	2	1	2	1	0	2	2	2	-3	-2	-2	-2	4	5
		Bassin de rétention	2	4	4	5	3	3	4	2	3	1	3	3	4	4	3	2	4	4	-4	-4	-3	-2	5	5
	Gestion des débris ligneux	Aménagement de débris ligneux	2	3	2	3	1	4	2	2	2	1	1	2	0	4	-1	0	0	-2	-1	-2	-2	-1	1	5
		Prébarrages	0	3	2	3	1	2	1	2	2	3	1	3	1	2	-1	0	0	-2	-2	-2	-3	-1	1	4
GESTION DES DYNAMIQUES SÉDIMENTAIRES	Drainage en milieu forestier	Fossés végétalisés	2	2	3	1	1	3	1	2	1	1	2	1	0	0	0	0	0	2	-1	-1	-2	0	3	4
		Bermes filtrantes	3	2	2	2	1	4	1	3	2	0	0	1	0	1	0	0	0	0	-2	-1	-3	0	1	4
		Bassin de sédimentation	2	2	2	2	1	4	1	4	2	-1	2	1	0	1	0	0	0	0	-2	-2	-3	-1	1	4
GESTION DE L'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE	Reboisement	Reboisement en zone amont et moyenne	4	2	4	1	4	4	3	3	4	5	4	5	2	3	1	3	3	2	-2	-3	-1	-3	5	1
		Reboisement en zone aval	4	3	3	2	3	4	2	2	3	3	5	4	3	4	0	5	4	5	-2	-2	-2	-3	5	1
	Bandes riveraines	Bandes tampons	4	2	2	2	1	5	2	4	2	1	5	4	0	3	2	1	1	2	-2	-2	-1	-1	5	4
		Fascines	3	2	1	1	1	4	1	2	1	0	2	2	0	4	0	0	0	0	-2	-2	-2	-1	5	4

4.3.2 Pondération des critères

Le partage du questionnaire aux principales parties prenantes a permis de récolter les préférences de 8 intervenants. De ceux-ci, 4 sont associés au milieu institutionnel, soit 3 de la municipalité d'Edmundston et 1 du MFFP, 2 proviennent d'organismes de la société civile, soit 1 de la Société d'aménagement de la rivière Madawaska (SARM) et 1 de la Commission de services régionaux Nord-Ouest et 2 sont des experts du milieu académique et scientifique. La moyenne des résultats individuels des parties prenantes indique la pondération finale sur une échelle de 0 à 3 attribuée à chaque critère, tel qu'illustré à la figure 4.2.

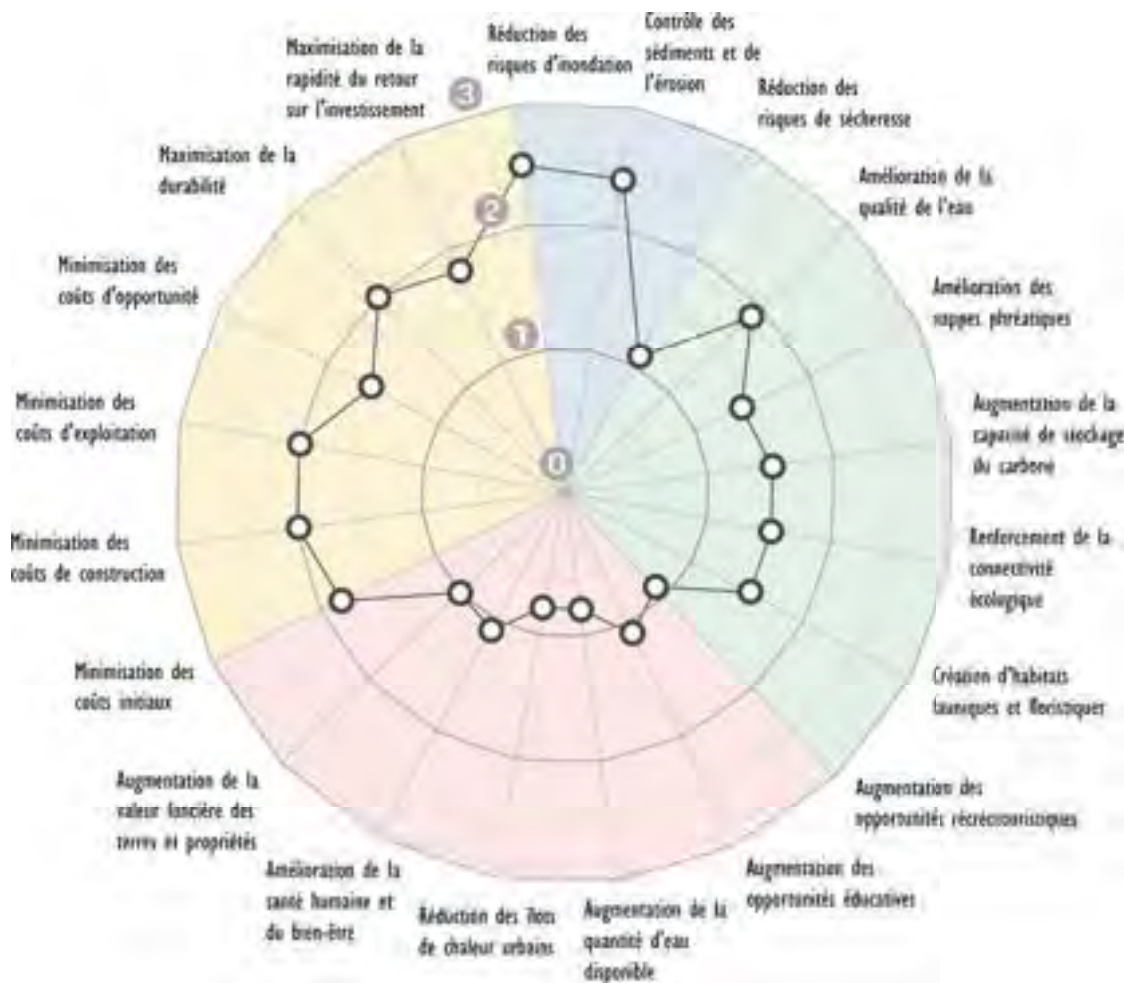


Figure 4.2 Résultats de la pondération moyenne des critères par les parties prenantes

Selon ces résultats, les principaux bénéfices recherchés par les acteurs locaux en matière de gestion de l'aménagement du territoire et des ressources en eau sont la réduction des risques d'inondation et le contrôle de l'érosion et de la sédimentation. Concernant les co-bénéfices environnementaux, la priorité est accordée à l'amélioration de la qualité de l'eau, tandis que la réduction des risques de sécheresse figure au

dernier rang. Cette classification concorde notamment avec les positions relatives de ces problématiques pour la région recensées lors d'une concertation des parties prenantes (WWF, 2020). De façon générale, une pondération plus faible a été attribuée à l'ensemble des co-bénéfices à la société, l'augmentation des opportunités éducatives et l'amélioration de la santé et du bien-être figurant toutefois au premier plan. Une faible pondération a été attribuée au co-bénéfice social de réduction des îlots de chaleur urbains. De ce fait, plusieurs intervenants ont mentionné que cette problématique n'était pas encore observée dans la région, notamment en raison du faible taux de densité urbaine. De la même façon, l'augmentation de la quantité d'eau disponible pour les usages anthropiques a reçu une notation inférieure, puisque le réseau hydrographique du bassin versant n'est actuellement pas utilisé pour l'approvisionnement en eau potable. En matière de performance économique, les préoccupations centrales des intervenants sont la minimisation des coûts de construction et d'exploitation, ainsi que la maximisation de la durabilité de l'aménagement.

4.3.3 Constats globaux et spécifiques de l'analyse

Le classement final des aménagements selon les quatre dimensions résulte de la conjonction des données entre l'évaluation des critères et la pondération des parties prenantes selon la méthodologie proposée. Ainsi, les résultats normalisés sur une échelle de 0 à 1 présentés à la figure 4.3 représentent le score final de chaque aménagement en fonction du contexte local.

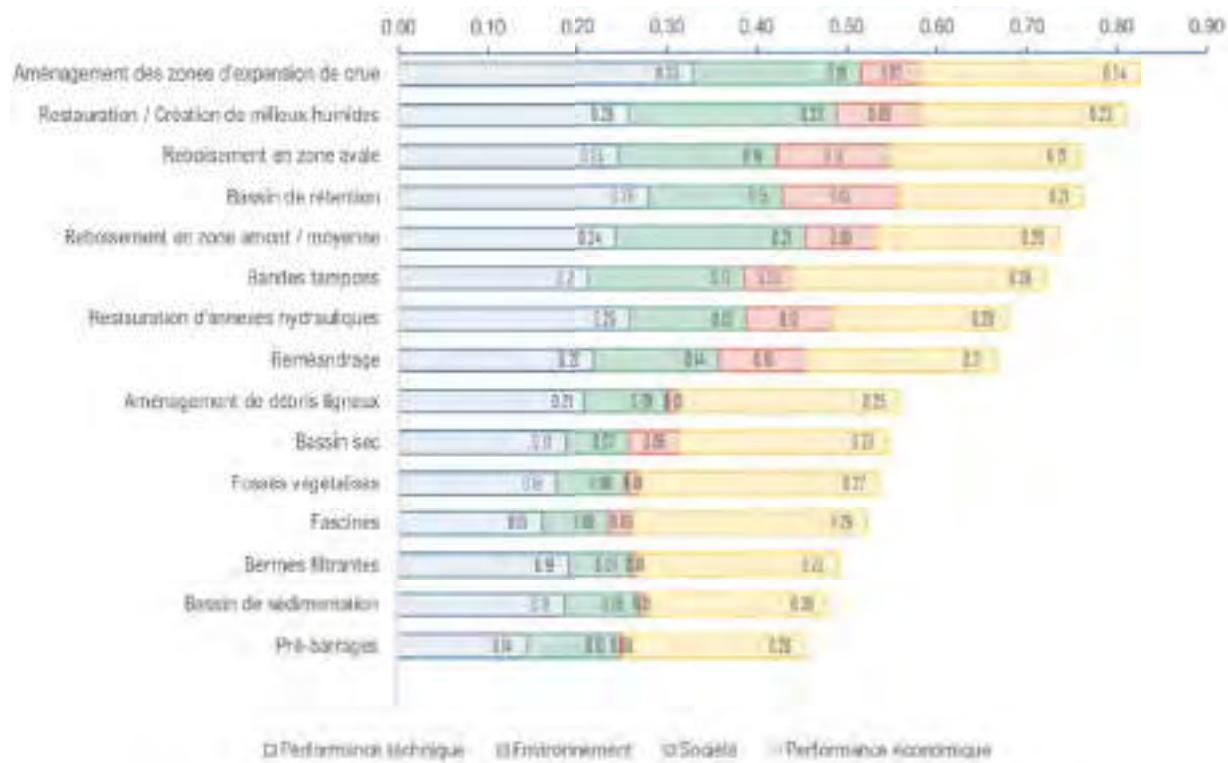


Figure 4.3 Score et classement des ANFN selon l'analyse multicritère

Gestion hydromorphologique

Selon le classement obtenu, l'aménagement des zones d'expansion de crue constitue la solution présentant le maximum de bénéfices totaux par la somme des résultats des quatre dimensions. De surcroît, cet aménagement présente le meilleur potentiel en ce qui concerne la performance technique. En permettant l'expansion latérale de la rivière lors des périodes de hautes eaux, les techniques associées à cet ANFN exercent une forte influence sur la réduction du débit de pointe en répartissant le volume de la crue dans le temps (Burgess-Gamble et al., 2018). Lorsque planifiées adéquatement, les zones d'expansion offrent également une capacité de rétention hydraulique considérable et favorisent le dépôt des sédiments dans les dépressions naturelles ou par le reprofilage de la plaine (UNaLab, 2020). Par ailleurs, cet ANFN procure d'importants co-bénéfices pour l'environnement, principalement par le rétablissement de la connectivité entre les unités écologiques aquatiques, riveraines et terrestres. Il permet également la création d'une mosaïque de microhabitats résultant de la variété de sédiments, de températures et de courants qui s'y trouvent (Fink et al., 2017). Enfin, l'aménagement de zones d'expansion de crue offre des résultats intéressants en matière de performance économique, compte tenu de sa longévité potentiellement infinie, de son efficacité immédiate et de ses coûts modérés pour toutes les étapes de la mise en œuvre.

En deuxième position du classement, les aménagements associés à la restauration et la création de milieux humides en plaine inondable présentent la meilleure performance globale pour la dimension environnementale. En agissant comme filtre contre la pollution organique et les matières en suspension, le principal bénéfice de cet ANFN est l'épuration des eaux de surface, l'une des fonctions jugées prioritaires par les parties prenantes. Les milieux humides offrent également des bénéfices avantageux pour la réduction des gaz à effets de serre par leur capacité à stocker le carbone dans leurs sols (CEPRI, 2022). Par ailleurs, ces zones contribuent à la régulation hydraulique du bassin lors de crues en retenant temporairement les eaux et en désynchronisant l'arrivée des débits de pointe (WWF, 2017). En plus d'offrir plusieurs opportunités pour le développement des connaissances scientifiques dans la région, l'intégration de ces milieux à l'aménagement du territoire peut constituer un excellent outil à la sensibilisation des citoyens. Enfin, ces aménagements bénéficient d'une espérance de vie à très long terme et nécessitent des coûts minimaux d'entretien et de suivi.

En ce qui concerne les mesures de création de zones de stockage, soit les bassins secs et de rétention, les résultats démontrent que ce dernier offre davantage de bénéfices pour la plupart des dimensions. Malgré une performance économique légèrement inférieure en raison des coûts élevés de conception et de mise en œuvre, les bassins de rétention offrent un rendement nettement supérieur pour la réduction des risques d'inondation et le contrôle des sédiments. De ce fait, en raison de leurs spécificités structurelles, ces

aménagements peuvent stocker d'importants volumes d'eau et les relâcher en différé, réduisant ainsi les pics de crue (Réseau Environnement, 2014). De plus, la rétention permanente d'eau dans les ouvrages, au contraire des bassins secs, contribue à la prestation de plusieurs bénéfices environnementaux et sociaux. En effet, particulièrement lorsque les bassins de rétention sont conçus selon des formes naturelles, ils offrent un potentiel de création d'habitats fauniques et floristiques supérieur (Burgess-Gamble et al., 2018). De plus, ceux-ci peuvent être inclus au sein d'un complexe d'aménagements récréatifs, offrant des opportunités pour la baignade et l'activité physique.

Parallèlement, les deux aménagements considérés pour la restauration de la rivière, soit le reméandrage et la restauration d'annexes hydrauliques, présentent des résultats similaires en termes de co-bénéfices et de performance économique. De ce fait, ces ANFN procurent des services environnementaux modérés, obtenus principalement par leur contribution à améliorer la diversité des habitats en variant les caractéristiques morphologiques de la rivière et de ses terres adjacentes (CSA Group Research, 2021). Le principal bénéfice pour la société recensé pour les deux aménagements est l'opportunité d'acquisition de connaissances scientifiques pour la région, considérant les déficits d'études et de références locales pour ces techniques. Toutefois, les coûts considérables associés à la planification et la construction des aménagements, notamment en raison des modélisations hydrauliques requises et des besoins en expertise et machineries spécialisées, contribuent à la réduction de la performance économique. Par ailleurs, la principale différenciation entre les deux ANFN correspond à leur performance respective pour la réduction des risques d'inondation, la construction d'annexes hydrauliques présentant des bénéfices considérablement supérieurs. Ce résultat est principalement justifié par la contribution de ces aménagements à l'augmentation de la superficie d'espace de stockage de l'eau sur le territoire.

Concernant la gestion des débris ligneux, les aménagements de débris ligneux et les pré-barrages ont obtenu des résultats globaux relativement faibles. Ce constat s'explique en partie par la faible dimension de ces ouvrages, réduisant ainsi leur capacité individuelle à réduire les risques d'inondation. La pose de débris ligneux présente toutefois un potentiel considérable pour la réduction du débit de pointe en augmentant la rugosité hydraulique des cours d'eau, dissipant ainsi l'énergie des écoulements, ainsi que pour le contrôle des sédiments fins (Commission Européenne, 2015). De ce fait, en piégeant et en créant des aires de dépôt pour la sédimentation, les différentes techniques de gestion des débris ligneux filtrent les polluants associés aux matières en suspension dans le système hydrographique (WWF, 2016). Toutefois, à l'exception des opportunités pour l'acquisition de nouvelles connaissances scientifiques, ces aménagements offrent peu de co-bénéfices pour la société. Ils affichent même certains scores négatifs attribués à la réduction potentielle des quantités d'eau disponibles en aval et l'impact sur la valeur foncière des terres adjacentes inondées.

Cependant, ces ANFN exigent très peu de coûts totaux, en plus de procurer des effets immédiats pour la GIRI dans le cas de la pose de déflecteurs, de « leaky dams » ou de fagots de bois.

Gestion des dynamiques sédimentaires

Les trois ANFN sélectionnés pour le contrôle des dynamiques sédimentaires, soit les fossés végétalisés, les bermes filtrantes et les bassins de sédimentation, présentent des performances globales plutôt faibles, justifiées notamment par leurs petites tailles. Par ailleurs, puisque leurs fonctions principales sont le drainage efficace du territoire et le contrôle de la sédimentation, ces aménagements produisent des effets limités pour la modération des processus physiques contribuant au risque d'inondation, notamment lorsqu'ils sont évalués à l'échelle individuelle. Ainsi, le co-bénéfice environnemental principal de ces aménagements est l'amélioration de la qualité de l'eau en réduisant le transfert vers les milieux récepteurs des flux de matières en suspension et de polluants résultant de l'usage des chemins par les véhicules motorisés (Environment Agency, 2012). Bien qu'ils ne procurent pratiquement aucun co-bénéfice pour la société, ces méthodes de drainage durable requièrent peu d'investissements initiaux et n'engendrent pratiquement aucune perte d'usage. Toutefois, la mise en œuvre de bermes et de bassins de sédimentation exige un entretien de déblaiement des sédiments régulier et s'avère limitée en matière de durabilité temporelle.

Gestion de l'aménagement du territoire

Les initiatives de reboisement, tant pour les zones moyennes et en amont qu'en zone aval, ont obtenu des scores élevés pour la majorité des dimensions. Ainsi, la restauration du couvert forestier en amont et en zone moyenne favorise la réduction de la charge hydraulique vers les rivières lors d'événements hydrométéorologiques en retenant et en ralentissant le ruissellement, en modérant les taux de fonte des neiges et en retournant l'eau vers l'atmosphère par évapotranspiration (Commission Européenne, 2015). Par ailleurs, cette technique présente un potentiel élevé pour le contrôle de l'érosion des sols, réduisant grandement la charge sédimentaire transportée vers les cours d'eau (Burgess-Gamble et al., 2018). De plus, le reboisement contribue au renforcement de plusieurs fonctions environnementales, notamment en régénérant certaines caractéristiques du sol favorables à la recharge des nappes phréatiques, ainsi que par la création et l'amélioration de niches écologiques pour la biodiversité (WWF, 2016). Par ailleurs, un couvert forestier continu peut générer une séquestration du carbone nettement supérieure aux autres types de couverts pour l'atténuation des changements climatiques (Ouranos, 2015). Le rétablissement d'espaces naturels offre également plusieurs bénéfices pour la santé physique et psychologique des citoyens, bien que ces bénéfices soient moindres que pour le reboisement en aval en raison de l'éloignement de ces zones des agglomérations urbaines. Concernant la performance économique, les coûts pour toutes les étapes de la

gestion de projet sont évalués comme étant modérés, et l'aménagement présente une viabilité à long terme maximale. Toutefois, les compromis d'usage pour l'industrie forestière dont le rendement pourrait être réduit par cet aménagement, ainsi que les longs délais pour l'atteinte du plein potentiel des bénéfices atténuent les résultats pour cette dimension.

En parallèle, les résultats obtenus pour le reboisement en aval démontrent des performances similaires pour la réduction du ruissellement et le contrôle de l'érosion et des sols, en plus d'afficher un score supérieur pour la réduction du débit de pointe. En raison de leur emplacement stratégique en zone de plaine inondable, les arbres ralentissent et retiennent les eaux de crue en augmentant la rugosité du territoire et en favorisant une microtopographie retenant l'eau à proximité de ceux-ci (Bridges et al., 2021). Bien que le reboisement en aval procure moins de co-bénéfices environnementaux en raison des contraintes de superficie associées à l'urbanisation dans cette zone, il offre toutefois davantage de services pour la société, tels que l'amélioration de la santé et du bien-être et l'augmentation de la valeur foncière des propriétés. Par ailleurs, la performance économique de l'aménagement démontre des contraintes et leviers similaires à ceux du reboisement plus en amont.

Enfin, en ce qui concerne les aménagements en bande riveraine, la naturalisation des bandes tampons présente des résultats supérieurs pour toutes les dimensions par rapport à l'établissement de fascines. De ce fait, la restauration de différentes strates de végétation procure une protection supérieure pour l'interception des sédiments et du ruissellement avant leur arrivée dans les cours d'eau. Par ailleurs, cette diversité végétale contribue à la création de corridors écologiques fonctionnels entre les unités d'habitats fauniques et floristiques, ainsi qu'au renforcement des composantes des niches écologiques (UN Environment, 2018). Par contre, les deux types d'ANFN offrent des bénéfices minimaux pour la société, hormis les opportunités pour la sensibilisation des propriétaires riverains. Toutefois, en raison de leur pérennité, de leur efficacité rapide et des faibles coûts requis à toutes les étapes du projet, les aménagements en bandes riveraines bénéficient d'un score de performance économique supérieur à la majorité des ANFN sélectionnés.

4.3.4 Sélection d'ANFN pour le bassin versant Rivière-à-la-Truite

Au regard des résultats de l'analyse multicritère obtenus à la figure 4.3, trois portfolios d'aménagements ont été définis, présentés au tableau 4.4. Ceux-ci constituent la combinaison optimale de cinq aménagements pour l'atténuation des risques d'inondation dans le bassin versant selon trois objectifs distincts, soit la performance globale, technique et économique. Cette sélection diversifiée permet ainsi d'offrir une certaine

flexibilité aux décideurs locaux en fonction des ressources matérielles, financières et humaines disponibles, ainsi que des contraintes potentielles quant au processus réglementaire et législatif.

Tableau 4.4 Sélection d'ANFN selon trois scénarios

ORDRE DE PRIORITÉ	PERFORMANCE GLOBALE	PERFORMANCE TECHNIQUE	PERFORMANCE ÉCONOMIQUE
1	Aménagement des zones d'expansion de crues	Aménagement des zones d'expansion de crues	Bandes tampons
2	Restauration / Création de milieux humides	Bassin de rétention	Fossés végétalisés
3	Reboisement en zone avale	Restauration / Création d'annexes hydrauliques	Fascines
4	Bassin de rétention	Restauration / Création de milieux humides	Aménagement de débris ligneux
5	Reboisement en zone amont / moyenne	Reboisement en zone avale	Aménagement des zones d'expansion de crues

Le portfolio de performance globale représente la sélection optimale d'aménagements pour la maximisation simultanée des bénéfices directs, des co-bénéfices et de la performance économique selon les spécificités du contexte local. Basé sur le score total des quatre dimensions de l'analyse, il constitue le scénario à privilégier pour l'atteinte d'objectifs de développement durable.

La sélection d'aménagements pour l'objectif de performance technique s'appuie uniquement sur les scores obtenus pour cette dimension. Ce portfolio offre également certains co-bénéfices environnementaux et sociaux. Toutefois, il priorise davantage la réduction des risques d'inondation et le contrôle des sédiments et de l'érosion comme objectif principal d'une stratégie d'aménagement du territoire.

Le dernier portfolio considéré évalue les scores obtenus pour la performance économique des aménagements, soit les coûts totaux requis pour leur mise en œuvre contrebalancés par la durabilité et la rapidité du retour sur l'investissement. Il représente ainsi la stratégie minimale à adopter pour la réduction des risques d'inondation dans un contexte budgétaire restrictif.

5. CARTE D'APTITUDE

Afin de définir des zones prioritaires pour l'établissement des aménagements sélectionnés, la méthode de la carte d'aptitude a été employée. Cet outil spatial d'aide à la décision permet d'identifier les emplacements opportuns pour la mise en œuvre d'ANFN sur le territoire selon des conditions prédéfinies dans un système d'information géographique (SIG) tel que ArcGIS. La principale utilité de la carte d'aptitude est de circonscrire la zone d'étude selon certaines contraintes et opportunités pour la GIRI (SEPA, 2015). Ces emplacements pourront par la suite faire l'objet d'une évaluation plus détaillée pour la mise en œuvre concrète des aménagements.

5.1 DÉMARCHE MÉTHODOLOGIQUE

Tel que vu précédemment, le bassin versant peut être divisé en trois zones distinctes selon les caractéristiques topographiques et morphologiques du territoire. L'emplacement des ANFN doit ainsi tenir compte de celles-ci en raison des dynamiques hydrologiques et sédimentaires particulières associées à chaque zone (voir tableau 5.1). Cette considération permet de réaliser une première classification pour la distribution des aménagements sur le territoire. (Bridges et al., 2021; WWF, 2017)

Tableau 5.1 Répartition des ANFN selon la zone du bassin versant

ZONE	AMÉNAGEMENT
Zone amont	Reboisement en zone amont / moyenne, Fossés végétalisés, Débris ligneux, Bandes tampons
Zone moyenne	Reboisement en zone amont / moyenne, Fossés végétalisés, Débris ligneux, Bandes tampons, Fascines, Bassins de rétention / sec
Zone aval	Reboisement en zone aval, Bandes tampons, Fascines, Débris ligneux, Milieux humides, Annexes hydrauliques, Aménagement des zones de crue

La première phase pour l'élaboration d'une carte d'aptitude est de définir les critères d'analyse spatiale généraux et spécifiques pour chaque aménagement. L'identification de ceux-ci se base sur les paramètres définis dans plusieurs guides techniques et la consultation d'articles scientifiques.

Dans un premier temps, les principales contraintes du territoire doivent être identifiées. Celles-ci réfèrent aux emplacements où la mise en œuvre d'ANFN structurels est impossible ou peu probable en raison de l'occupation du sol et de l'utilisation des terres, de contraintes physiques ou de la présence d'actifs vulnérables. Ainsi, diverses classes d'occupation du sol et de l'utilisation des terres ainsi que des distances minimales des cours d'eau et des infrastructures routières ont été retirées selon les exigences des

aménagements. De plus, des contraintes liées aux caractéristiques physiques du territoire, telles que la pente et la classe de drainage, ont été définies comme critères contraignants pour l'emplacement de certains aménagements.

Dans un deuxième temps, la définition des critères d'analyse spatiale consiste à identifier les opportunités du territoire, soit les zones présentant le plus grand potentiel pour la réduction des risques d'inondation. Selon les principales fonctions de la GIRI visées par chaque aménagement, des seuils critiques ont ainsi été établis afin d'assurer l'efficacité optimale des ANFN sur le territoire. Selon l'Agence américaine d'observation océanique et atmosphérique (National Oceanic and Atmospheric Administration [NOAA], 2021), trois principes directeurs guident le choix des critères spatiaux, soit la taille, la connectivité et la proximité. Ainsi, des superficies minimales ont été établies pour la plupart des aménagements. Le principe de connectivité hydrologique, soit le degré de relation entre les différentes composantes du cycle hydrologique, est également pris en compte à l'aide de données d'indice d'humidité topographique (TWI). L'intégration de cette couche fournit de l'information sur le potentiel d'accumulation d'eau sur le territoire et les zones d'écoulement préférentielles. Enfin, le principe de proximité considère la distance maximale de certains éléments du territoire, tels que le réseau hydrographique et les chemins, comme critère délimitant.

Par la suite, pour chaque critère d'analyse, trois classes furent définies, afin de pondérer plus spécifiquement chaque critère sur une échelle de 1 à 3. Selon cette classification, une valeur de 1 indique une classe de priorité faible, de 2 de priorité modérée, et de 3 de priorité élevée. Subséquemment, tous les critères pour un même aménagement furent également pondérés selon leur importance respective afin d'obtenir une somme totale de 100 %.

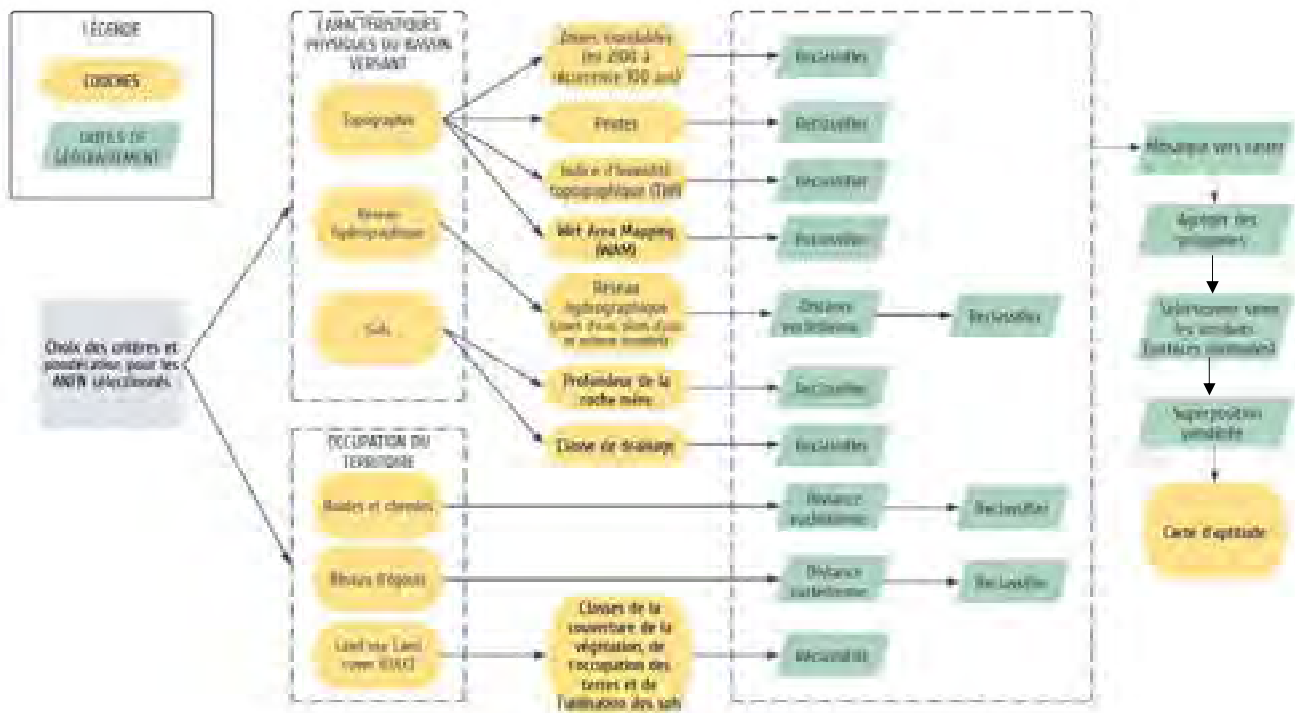
Suivant le choix des pondérations, la sélection des couches cartographiques appropriées pour la représentation des données fut réalisée. Les principales sources géographiques utilisées proviennent des données produites par le Gouvernement du Québec et du Nouveau-Brunswick. Celles-ci incluent les couches Lidar, les modèles numériques de terrain (MNT), les sols, les réseaux hydrographiques, l'indice d'humidité topographique et les zones inondables. Par ailleurs, la carte du couvert de la végétation, de l'occupation des sols et de l'utilisation des terres fut produite à l'interne dans le cadre d'une initiative pluriannuelle sur la caractérisation des actifs naturels dans la région.

Par la suite, les critères d'analyse spatiale ont été intégrés au système d'information géographique ArcGIS pour chaque aménagement afin de produire des cartes démontrant les zones où chaque condition est respectée. Pour ce faire, les différents critères ont été reclassifiés selon des valeurs de *NoData* pour les zones exclues, et de 1 à 3 en fonction de l'aptitude des classes. L'outil de distance euclidienne a également

été utilisé pour les critères de distance par rapport à certains emplacements identifiés. À la suite de la reclassification, les couches des différents critères furent fusionnées à l'aide de l'outil mosaïque vers raster afin de conserver uniquement les zones remplissant tous les critères identifiés pour chaque aménagement. Pour les aménagements nécessitant des superficies minimales, celles-ci furent sélectionnées afin de retenir uniquement les superficies appropriées. Afin de produire les cartes d'aptitude finales, l'outil de superposition pondérée fut appliqué afin d'agréger tous les aménagements pour un même scénario. Les cartes produites identifient des zones d'opportunités pour les ANFN selon une échelle de priorité de 1 à 3. Un diagramme des processus résumant les principales étapes méthodologiques de la carte d'aptitude est présenté à la figure 5.1.

Suivant cette méthodologie, des cartes d'aptitude ont été réalisées pour les aménagements sélectionnés selon les trois scénarios prioritaires présentés au tableau 4.4. Quelques exceptions ont été établies pour les aménagements nécessitant une caractérisation sur le terrain pour le choix des sites. Celles-ci seront détaillées dans les sections suivantes.

Figure 5.1 Diagramme des processus pour la réalisation de la carte d'aptitude



5.2 JUSTIFICATION DES CRITÈRES

Les critères sélectionnés pour le choix des zones prioritaires des aménagements visent à éliminer les emplacements où la mise en œuvre d'ANFN est impossible ou indésirable et à privilégier les zones offrant le plus grand potentiel pour la GIRI. Un tableau complet des critères peut être consulté à l'annexe 4.

5.2.1 Critères généraux

Certains critères constituent des lignes directrices de base pour la gestion de l'aménagement du territoire et des ressources en eau et s'appliquent à plusieurs ou à la totalité des aménagements. Ainsi, pour tous les types d'ANFN, les milieux bâtis et construits, les infrastructures de transport et les zones d'extraction minière (carrières, gravières et sablières) ont été exclus de la zonation prioritaire. Par ailleurs, les peuplements de forêts matures et les milieux humides non dégradés ont également été retirés afin de conserver l'intégrité écologique de ces habitats, ainsi que leur contribution à la modération des crues. En outre, tous les territoires de pentes raides, très raides et extrêmement raides (16 % et plus) ont été exclus de la carte pour les aménagements visant à stocker l'eau sur le territoire. Cette considération tient compte des complications techniques associées à la construction sur des surfaces inclinées et du faible potentiel de rétention de ces zones.

À l'exception des aménagements de création d'annexes hydrauliques et d'aménagement de débris ligneux, une distance minimale de 30 mètres du réseau hydrographique a été définie, incluant les milieux humides, les plans d'eau et les cours d'eau. Cette considération permet d'une part d'assurer le respect des normes réglementaires dans les deux provinces, et d'autre part, de conserver les fonctions écosystémiques des bandes tampons pour l'atténuation des risques de crue, la filtration des éléments nutritifs et des polluants et les bénéfices pour la biodiversité (Environnement Canada, 2013).

Par ailleurs, afin de faciliter l'accès aux aménagements pour les activités liées à la construction, l'entretien et le suivi, une distance maximale de 300 mètres des chemins a été établie pour la plupart des ANFN. Ce critère de priorisation vise ainsi à réduire les coûts opérationnels à court et à long terme. Également, une distance minimale de 6 mètres des infrastructures routières doit être respectée pour plusieurs aménagements afin d'assurer la stabilité structurelle de celles-ci (Virginia Department of Forestry. 2011).

Afin de juger de l'adéquation des sols en termes d'infiltration et de coefficient de ruissellement, les données fournies par la couche de classes de drainage ont été sélectionnées. Celles-ci ont été préconisées par rapport à d'autres couches pertinentes, telles que la texture des sols et la perméabilité, en raison de la meilleure résolution disponible pour la région. De plus, ces données offrent plusieurs informations significatives sur

la capacité du sol à retenir ou à drainer l'eau en intégrant des facteurs comme la granulométrie et la structure du sol, les caractéristiques de la nappe phréatique et la présence d'une couche peu perméable (Bossé et al., 2022). Afin de maximiser les opportunités de rétention de certains aménagements, soit la création de milieux humides et de bassins de rétention, des classes minimales d'indice d'humidité topographique ont été définies. Ces données sont utiles pour l'identification des basses terres plates et des dépressions du paysage qui offrent une plus grande capacité naturelle de rétention de l'eau et de connectivité hydrologique, permettant l'interception optimale du ruissellement sur le territoire (Commission Européenne, 2015).

5.2.2 Critères spécifiques

Afin de considérer les spécificités techniques de chaque aménagement, des conditions supplémentaires ont également été attribuées afin de respecter les contraintes et d'optimiser l'efficacité.

Création / Restauration d'annexes hydrauliques

La création et la restauration d'annexes hydrauliques visent à offrir un plus grand espace de liberté aux cours d'eau. Puisque la restauration nécessite une caractérisation sur le terrain afin d'évaluer l'état des annexes hydrauliques, la carte d'aptitude produite considère uniquement la création d'aménagements. Afin de maximiser l'efficacité de ces aménagements, les sites de grandes superficies et relativement plats situés près des cours d'eau sont privilégiés, puisqu'ils offrent le plus grand potentiel pour l'atténuation des risques d'inondation (Habersack et al., 2015). Ainsi, une distance maximale de 250 mètres du réseau hydrographique a été définie, ainsi qu'une superficie minimale de 0,5 ha. Puisque les annexes hydrauliques se retrouvent majoritairement à proximité des cours d'eau d'ordre de Strahler supérieurs, seules les zones d'ordre 3 et 4 ont été retenues. De plus, la pente maximale attribuée pour ces aménagements a été définie à 9 %.

Restauration de la plaine inondable et des milieux humides

Afin de délimiter l'étendue spatiale pour l'aménagement de la zone d'expansion des crues, la cartographie des zones inondables a été utilisée comme critère de référence. Les données produites pour les prévisions des inondations en 2100 à récurrence de 100 ans ont été sélectionnées afin de tenir compte des cotes de crue futures dans un contexte de changements climatiques. En raison des caractéristiques morphologiques de ces zones, celles-ci sont considérées comme prioritaires pour la réduction des risques d'inondation localisés. La carte d'aptitude tient également compte des profondeurs modélisées des inondations pour la priorisation des sites. Afin d'intégrer la marge d'erreur potentielle de la modélisation de ces zones, une bande tampon supplémentaire de 50 mètres autour de celles-ci est également incluse pour la délimitation. Puisque les petites régions isolées ne peuvent fournir un volume de rétention suffisant pour l'atténuation efficace

des inondations en plaine inondable, les surfaces de moins de 0,5 hectare ont également été exclues des zones prioritaires (Mubeen et al., 2021).

De plus, certains critères supplémentaires ont été attribués pour la sélection de zones prioritaires pour la création de milieux humides en plaine inondable. Les projets de restauration de ces zones nécessitent une caractérisation sur le terrain et sont donc exclus de la carte d'aptitude. La présence de sols hydriques, soit un sol saturé de façon permanente ou saisonnière par l'eau, est essentielle pour le maintien des conditions anaérobies en milieu humide (Tiner, 2012). L'utilisation de la couche cartographique « Wet Area Mapping » a été utilisée afin d'identifier les zones de sols de saturation variables appropriées pour assurer la viabilité des milieux humides à long terme. Par ailleurs, une superficie minimale de 0,1 ha a également été définie comme surface minimale pour l'établissement d'un milieu humide (Réseau Environnement, 2014).

Création de bassins de rétention

La création de bassins de rétention requiert des travaux d'excavation de la couche supérieure du sol. Afin de réduire les coûts associés à ces opérations, un critère de distance minimum de 1 mètre de la roche-mère a été défini. Cette profondeur correspond au standard afin d'assurer l'efficacité des aménagements en termes de rétention des eaux de surface et de traitement biologique de l'eau (MEM, 2002). De plus, considérant que la superficie minimale efficace requise pour les bassins de rétention est de 2 % de l'aire de drainage et que cette dernière doit être au minimum de 5 ha, une superficie minimale de 0,1 ha a été définie comme condition pour ces aménagements (Réseau Environnement, 2014). À des fins logistiques, une distance minimale de 2 mètres des réseaux d'égout souterrains doit également être respectée pour le choix des sites.

Aménagement de débris ligneux

Concernant l'aménagement de débris ligneux dans les cours d'eau, l'analyse tient compte des caractéristiques des terres adjacentes dans un rayon de 250 mètres pour le choix de l'emplacement des aménagements. De ce fait, ces terres doivent être en mesure d'absorber des conditions d'inondation récurrentes et faciliter l'évacuation de celles-ci. Ainsi, les types d'occupation des sols sélectionnés incluent exclusivement les milieux forestiers, qui présentent une forte capacité d'absorption, ainsi que les milieux humides, qui exercent des fonctions naturelles de régulation des niveaux d'eau. Les sols de drainage très mauvais à imparfait ont également été exclus de la priorisation en raison de leur faible potentiel d'infiltration.

Fossés végétalisés

Tout d'abord, la végétalisation des fossés de drainage des chemins forestiers est nécessaire pour tous les fossés dénudés du bassin versant. Dans cette optique, la détermination de zones prioritaires nécessite plutôt

des travaux de caractérisation supplémentaires sur le terrain, afin d'identifier les fossés dégradés et établir un plan de gestion. Ainsi, la carte d'aptitude pour l'aménagement de fossés végétalisés ne vise que la construction de structures pour l'interception du ruissellement sur le territoire. Puisque le ralentissement du ruissellement de surface par la construction de fossés perpendiculaires aux lignes de ruissellement est plus efficace en zones pentues, une pente minimale de 9% a été établie comme zone prioritaire. Une pente maximale de 31 % est également établie en raison des contraintes pour la mise en œuvre et les risques glissements de terrain (Highways England, 2021).

Reboisement

Afin de maximiser l'efficacité pour la GIRI du reboisement dans les zones moyennes et en amont, la priorité doit être accordée aux sols générant des écoulements rapides via le ruissellement de surface ou la création de rigoles, puisqu'ils contribuent davantage aux risques d'inondation (Broadmeadow et al., 2013). Ces catégories incluent les sols mal drainés et sensibles à la compaction. Ainsi, les sols de drainage rapide ne sont pas considérés comme étant prioritaires en raison du faible risque de ruissellement sur ceux-ci (Barnes, 2017). De plus, les types d'occupation du sol sont limités aux sols dénudés ainsi qu'aux couverts forestiers clairsemés. Une pente maximale de 31 % est également établie comme contrainte afin d'éliminer les terrains où la pente est jugée impraticable ou problématique pour les activités de reboisement (MFFP, 2017). Enfin, les superficies de moins de 5 hectares ont également été exclues des zones prioritaires afin d'assurer l'efficacité de l'aménagement (Mubeen et al., 2021).

Concernant le reboisement en zone avale, une distance minimale de 2 mètres des réseaux d'égout souterrains a été établie. Cette considération permet ainsi d'éviter les dommages potentiels causés par l'intrusion des racines dans les canalisations (EPA, 2013). Enfin, une superficie de 0,5 ha a été définie comme superficie minimale pour l'implantation de petits blocs de reboisement en plaine inondable (SEPA, 2015).

Bandes riveraines

En raison des exigences uniques spécifiques à chaque site, aucune carte d'aptitude n'a été produite pour la priorisation de zones pour la revégétalisation des bandes riveraines et la construction de fascines. De ce fait, une caractérisation des bandes riveraines dénudées fut réalisée en 2016 par la CSRNO pour la portion du territoire au Nouveau-Brunswick (voir annexe 5). Par conséquent, celle-ci pourra servir de base pour la sélection des zones prioritaires pour la revégétalisation, supplémentée par des études sur le terrain plus récentes et pour la portion du territoire québécois.

5.3 VALIDATION ET LIMITES DE LA MÉTHODE

L'application de la méthodologie énoncée a permis de produire une carte d'aptitude pour chaque aménagement indiquant les superficies optimales pour leur mise en œuvre à l'échelle du bassin versant. Chaque site est classé selon une échelle de 1 à 3, soit de priorité faible, moyenne et élevée. Ces cartes peuvent être consultées à l'annexe 6 du présent document. Afin de valider les résultats de la méthode, les polygones obtenus pour chaque carte d'aptitude furent superposés aux images aériennes et d'ombrage Lidar du territoire. Cette démarche permet de confirmer la compatibilité des sites identifiés comme étant prioritaires pour l'établissement des aménagements avec les conditions actuelles de la zone d'étude. Majoritairement, les emplacements obtenus correspondent aux critères d'aptitude recherchés, comme présenté à la figure 5.2. En général, les sites n'intersectent pas avec des zones inopportunes pour l'établissement d'aménagements, tels que les secteurs bâtis, les routes, les carrières actives ou les zones très pentues. De plus, les secteurs prioritaires correspondent aux opportunités recherchées, telles que les superficies plates ou la distance des réseaux hydrographiques.

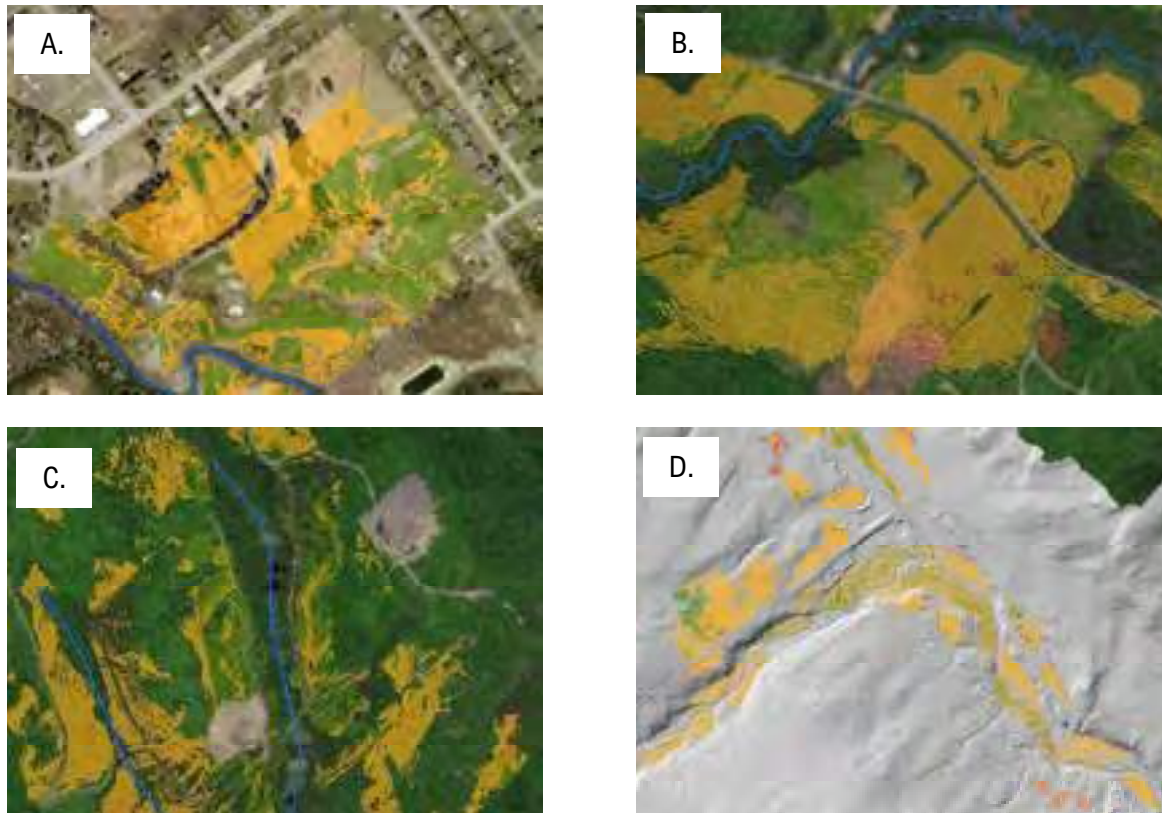


Figure 5.2 Comparaison de cartes d'aptitude avec les images aériennes (A. Les sites d'aptitude évitent les milieux bâtis; B. L'aménagement de reboisement priorise un couvert végétal dénudé; C. Les sites d'aptitude évitent les carrières actives; D. Les sites d'aptitude évitent les pentes abruptes)

Toutefois, certaines erreurs d'identification ont été observées durant le processus de validation, tel que présenté à la figure 5.3. Ces écarts se justifient notamment par les erreurs de classification pour produire la couche de couvert de la végétation, d'occupation des sols et d'utilisation des terres. En effet, certaines erreurs de classification peuvent se produire entre les classes démontrant des profils spectraux similaires. Par exemple, la signature spectrale de certaines coupes totales en régénération et des terres en pâturage et fourrage sont très semblables, causant des inexactitudes dans les résultats obtenus. Par ailleurs, puisque l'aménagement du territoire est en constante évolution, il peut s'avérer ardu de maintenir des données actualisées et exactes de celui-ci. Afin de corriger ces erreurs, les zones étant identifiées comme étant inadéquates furent retirées manuellement des cartes d'aptitude.



Figure 5.3 Exemples d'erreurs d'identification entre les cartes d'aptitude et l'occupation du sol (A. Certains sites d'aptitude sont situés en zone résidentielle, B. Les cartes d'aptitude omettent un site potentiel pour la restauration de lagunes inutilisées)

En somme, la validation prouve que la méthodologie permet de produire des résultats valables pour l'identification de zones aptes à l'aménagement des ANFN sur le territoire. Toutefois, la qualité des résultats dépend fortement de l'exactitude des couches géospatiales utilisées. Ainsi, les résultats obtenus doivent faire l'objet de caractérisations supplémentaires. Dans un premier temps, la comparaison avec les images aériennes et dérivées de la couche Lidar permet de retirer certaines superficies qui ne concordent pas avec les conditions recherchées. Par la suite, une validation sur le terrain sera nécessaire afin de confirmer l'adéquation du site avec les spécificités techniques de chaque aménagement.

6. RECOMMANDATIONS

La combinaison des résultats des deux outils d'aide à la décision fournit les informations nécessaires pour la planification stratégique de scénarios d'aménagement fondées sur la nature pour l'atténuation des risques d'inondation. En effet, l'analyse multicritère permet de sélectionner et de prioriser les ANFN les plus appropriés pour le bassin versant Rivière-à-la-Truite en fonction des priorités locales. Les cartes d'aptitude produites favorisent par la suite la planification spatiale optimale des aménagements sur le territoire du bassin versant. Ainsi, trois scénarios d'aménagement sont proposés selon les objectifs distincts de performance globale, technique et économique. Afin d'assurer la continuité fonctionnelle du projet, plusieurs recommandations sont également émises afin de minimiser les risques et mettre en œuvre des modes de gestion adaptés. Enfin, les leviers d'action et les limites de l'étude ont également été identifiés afin d'offrir un portrait global du contexte de celle-ci.

6.1 PROPOSITION DE SCÉNARIOS D'AMÉNAGEMENT

Le choix définitif des scénarios, créé à partir des cartes d'aptitude individuelles, se base tout d'abord sur les résultats obtenus par l'analyse multicritère. Ainsi, l'ordre de priorité établi au tableau 4.4 détermine le classement final des sites pour chaque aménagement. De plus, les sélections considèrent l'échelle de priorité déterminée par les cartes d'aptitude. De manière à effectuer un choix plus sélectif pour l'élaboration des scénarios finaux, les zones de priorité 1 furent exclues de l'éventail des sites. Afin de pallier au morcellement des zones de superficie continue en différentes priorités, ces dernières furent agrégées selon la priorité majoritaire observée sur l'aire du site. Un exemple de ce procédé est démontré à la figure 6.1.



Figure 6.1 Agrégation des sites selon la priorité majoritaire

La sélection des scénarios considère également la répartition hétérogène des aménagements sur le territoire. De ce fait, il est reconnu que dans la plupart des circonstances, l'effet cumulé de multiples ANFN de petites tailles répartis de façon stratégique sur l'ensemble du bassin versant engendre des bénéfices supérieurs pour la GIRI (Sayers et al., 2015; Bridges et al., 2021; CSA Group Research, 2021). Cette approche

hétérogène permet ainsi de générer un système complexe plus efficace et résilient pour la réduction des risques d'inondation à l'échelle paysagère.

Par ailleurs, la répartition spatiale des aménagements pour chaque scénario considère également la complémentarité optimale des fonctions des aménagements possibles à l'échelle du site. En effet, l'efficacité de l'aménagement peut être substantiellement renforcée par la combinaison appropriée de différents ANFN ayant des fonctions complémentaires. Le tableau 6.1 présente les combinaisons des ANFN sélectionnés selon leur degré de compatibilité afin d'assurer la fonctionnalité optimale et la maximisation des bénéfices.

Tableau 6.1 Combinaisons optimales des ANFN sélectionnés

LÉGENDE

θ : Fonctions non compatibles

⊕ : Fonctions compatibles

⊕⊕ : Fonctions optimales

ZEC : Aménagement de la zone d'expansion de crue

MH : Restauration / Création de milieux humides

RAH : Restauration des annexes hydrauliques

BR : Bassins de rétention

DL : Gestion des débris ligneux

FV : Fossés végétalisés

RebA/M : Reboisement en zone amont / moyenne

RebAv : Reboisement en zone aval

BT : Bandes tampons

FC : Fascines

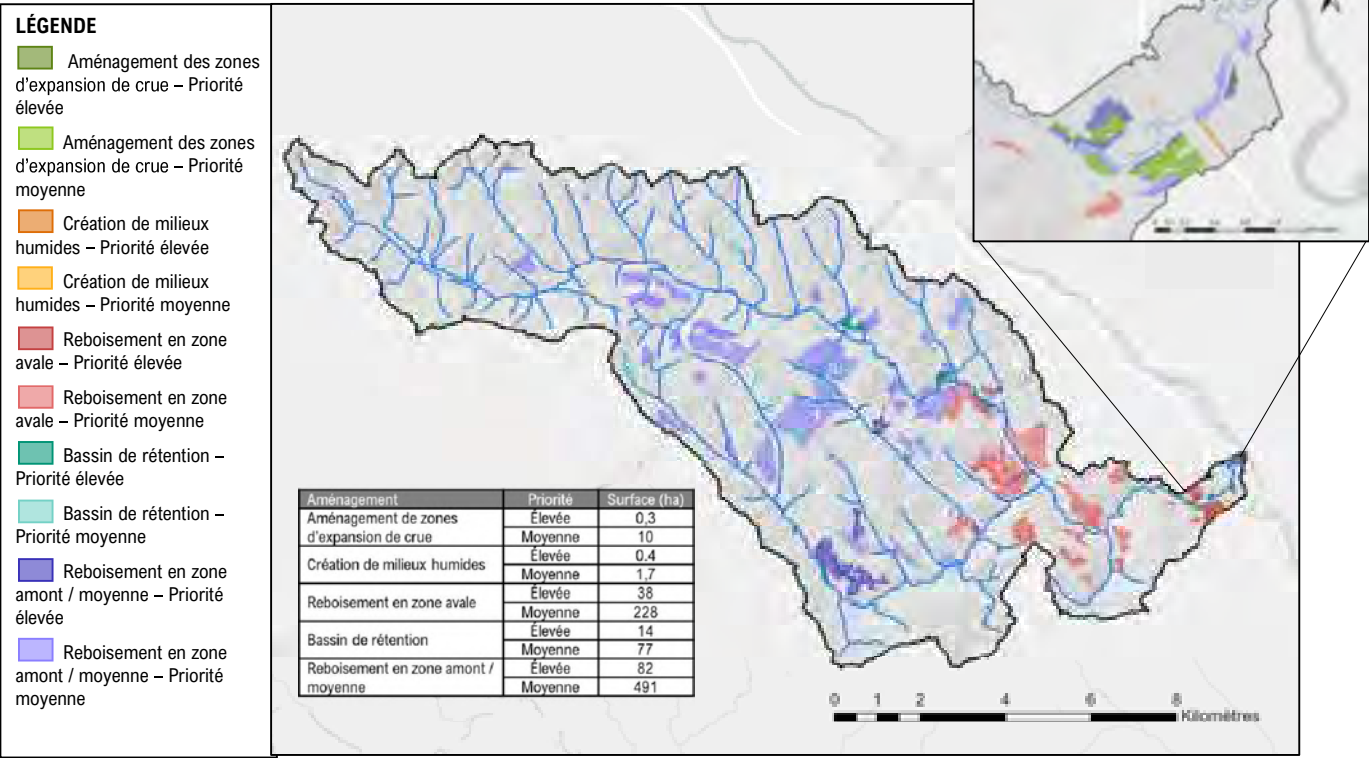
	ZEC										
ZEC		MH									
MH	⊕⊕		BR								
BR	θ	θ		RAH							
RAH	⊕⊕	⊕⊕	θ		DL						
DL	θ	⊕⊕	⊕⊕	θ		FV					
FV	θ	θ	⊕⊕	θ	θ		RebA/M				
RebA/M	θ	⊕	⊕⊕	θ	⊕⊕	⊕		RebAv			
RebAv	⊕⊕	⊕⊕	θ	⊕⊕	θ	θ	⊕		BT		
BT	⊕⊕	⊕⊕	θ	⊕⊕	⊕⊕	θ	⊕	⊕⊕		FC	
FC	⊕	⊕	θ	⊕	⊕	θ	⊕	⊕	θ		

La tenure des terres est également prise en compte dans les choix des trois scénarios d'aménagement. De ce fait, d'un point de vue administratif, les terres publiques de tenure municipale et provinciale offrent en général une plus grande facilité d'implantation que les terres privées. Plus spécifiquement, puisque la municipalité constitue le mandataire principal de ce projet, les terres dont elle est propriétaire ont donc été prioritaires.

6.1.1 Scénario 1 : Performance globale

Le scénario de performance globale présenté à la figure 6.2 constitue le portfolio d'aménagements maximisant à la fois les avantages pour l'atténuation des risques d'inondation, ainsi que les co-bénéfices pour l'environnement, la société et l'économie. Par conséquent, il représente la stratégie optimale à adopter pour la gestion intégrée des risques d'inondation dans une perspective de développement durable.

Figure 6.2 Scénario de performance globale recommandé



En raison des scores élevés obtenus lors de l'analyse multicritère, l'aménagement des zones d'expansion de crue est recommandé en priorité pour la zone avale. Cette technique inclut l'abaissement ou le retrait des ouvrages transversaux restreignant la mobilité et l'expansion du cours d'eau. Les principaux obstacles au mouvement latéral des cours d'eau répertoriés dans le bassin versant sont les gabions et l'enrochement. L'aménagement des zones d'expansion de crue vise à reconnecter le cours d'eau avec les zones de plaine inondable, et doit ainsi être planifié en fonction de l'occupation du territoire. Afin d'augmenter la capacité de stockage des zones de crue, le reprofilage du territoire en cellules de rétention stratégiques est également recommandé. Celles-ci correspondent à des dépressions qui seront rapidement drainées suivant la descente des niveaux d'eau.

De surcroît, la deuxième priorité est accordée à la restauration et la création de milieux humides en plaine inondable. Celle-ci doit être planifiée de façon conjointe avec l'aménagement de la zone d'expansion de crue. La restauration de ces milieux exige une caractérisation détaillée sur le terrain de leurs conditions écologiques et hydrologiques afin de planifier et déterminer le degré d'intervention requis. La restauration efficace des zones humides doit tenir compte des conditions locales, encourager la prolifération de la végétation indigène et se référer aux emplacements ou aux conditions historiques du milieu humide, lorsque cela est possible (Environnement Canada, 2013). En parallèle, la création de milieux humides est favorisée dans les zones ayant subi des remblais complets en raison du développement anthropique du territoire. La conception de ceux-ci doit se baser sur des écosystèmes de référence, soit « représentés par l'éventail des associations végétales présentes et des conditions abiotiques d'un ensemble de milieux humides d'un même type, mais à différents stades d'évolution, se trouvant à proximité et dans un même contexte territorial » (MELCC, 2021). Par ailleurs, l'installation de tapis de végétation flottants (Floating Wetland Island) peut également être bénéfique afin d'assurer le maintien de la qualité de l'eau, notamment en début de projet (City of Saskatoon, 2014). Sur la carte du scénario, six sites ont été identifiés comme étant optimaux pour la construction de milieux humides. De ceux-ci, cinq se superposent aux surfaces identifiées comme prioritaires pour le reboisement. La combinaison de ces deux aménagements est recommandée afin de renforcer leurs fonctions de régulation des niveaux d'eau.

En troisième priorité, le reboisement en zone avale présente plusieurs avantages et co-bénéfices pour l'atténuation des risques d'inondation. Cette technique doit répondre à plusieurs considérations afin d'optimiser l'efficacité des aménagements. Tout d'abord, la sélection d'espèces doit s'appuyer sur les principes de la diversité fonctionnelle afin de créer des plantations plus résilientes. Celle-ci doit ainsi inclure une variété de groupes hétérogènes, incluant également des herbacées et des arbustes « afin de créer un réseau naturel d'interactions favorisant l'autorégulation, l'adaptation et la résilience face aux pressions

biologiques, climatiques et environnementales » (Paquette, 2016). De plus, en raison de l'inondation régulière des plaines, les espèces sélectionnées pour le reboisement doivent être résistantes aux conditions de sols saturés. Les terres de tenure municipale et provinciale pourront être sélectionnées en priorité afin d'amorcer la mise en œuvre en raison des contraintes administratives réduites pour celles-ci.

Afin de maximiser les co-bénéfices, les aménagements en zone urbaine pourront être combinés au développement d'espaces récréatifs, tel que le projet proposé du parc Rivière-à-la-Truite en amont du pont sur le boulevard Isidore-Boucher (voir annexe 7). De ce fait, l'espace affecté pour ce projet, situé sur des terres municipales, représente un site de priorité élevée pour l'établissement de plusieurs aménagements, soit la zone d'expansion de crue, la création de milieux humides et le reboisement. Ces ANFN présentent des fonctions optimales complémentaires pour l'atténuation des risques d'inondation. Ainsi, il est recommandé de combiner ces trois aménagements afin d'optimiser leur efficacité à l'échelle du site. De plus, afin de remédier au problème de refoulement des égouts pluviaux dans cette zone, il est proposé de déconnecter l'embouchure du canal vers des zones de biorétention appropriées qui pourront stocker temporairement ces eaux. Par ailleurs, sur le territoire situé en amont de l'autoroute Transcanadienne, nous observons également plusieurs sites où se superposent deux ou trois de ces aménagements. Ces terres correspondent notamment à une zone de coupe totale et un terrain de golf abandonné. Elles représentent ainsi des sites favorables à l'aménagement d'ANFN en raison des faibles contraintes physiques, d'occupation du sol et d'utilisation des terres.

De plus, il est recommandé que la planification d'ANFN dans la zone aval s'appuie sur les principes de mise en œuvre d'une trame bleue pour la constitution de réseaux écologiques fluviaux connectés. Cet outil d'aménagement du territoire vise à créer des flux d'écoulement préférentiels afin de rediriger les eaux en région urbaine vers des zones moins à risque en prenant en compte le déplacement des espèces. Cette technique permet ainsi de maximiser la connectivité hydrologique du territoire, tout en favorisant la connectivité écologique pour la biodiversité (Belmont et al., 2010).

Afin de disperser les volumes d'eau dans le bassin versant, la répartition stratégique de bassins de rétention de petites et moyennes tailles est à privilégier en quatrième position. En fonction des caractéristiques et des contraintes du territoire, un réseau de bassins connectés et déconnectés du réseau hydrographique, placés de façon individuelle ou en cascade est ainsi recommandé. Les zones de rupture de pente, soit où l'inclinaison du terrain varie rapidement de convexe à concave, sont particulièrement efficaces comme emplacement de contrôle du ruissellement selon l'approche du *Keyline Design* (Walton et al., 2019). Par ailleurs, lors de la conception, l'aire et le volume de stockage de ces bassins doivent augmenter de façon progressive suivant la diminution de l'altitude et de la pente. De plus, la capacité volumique des bassins doit

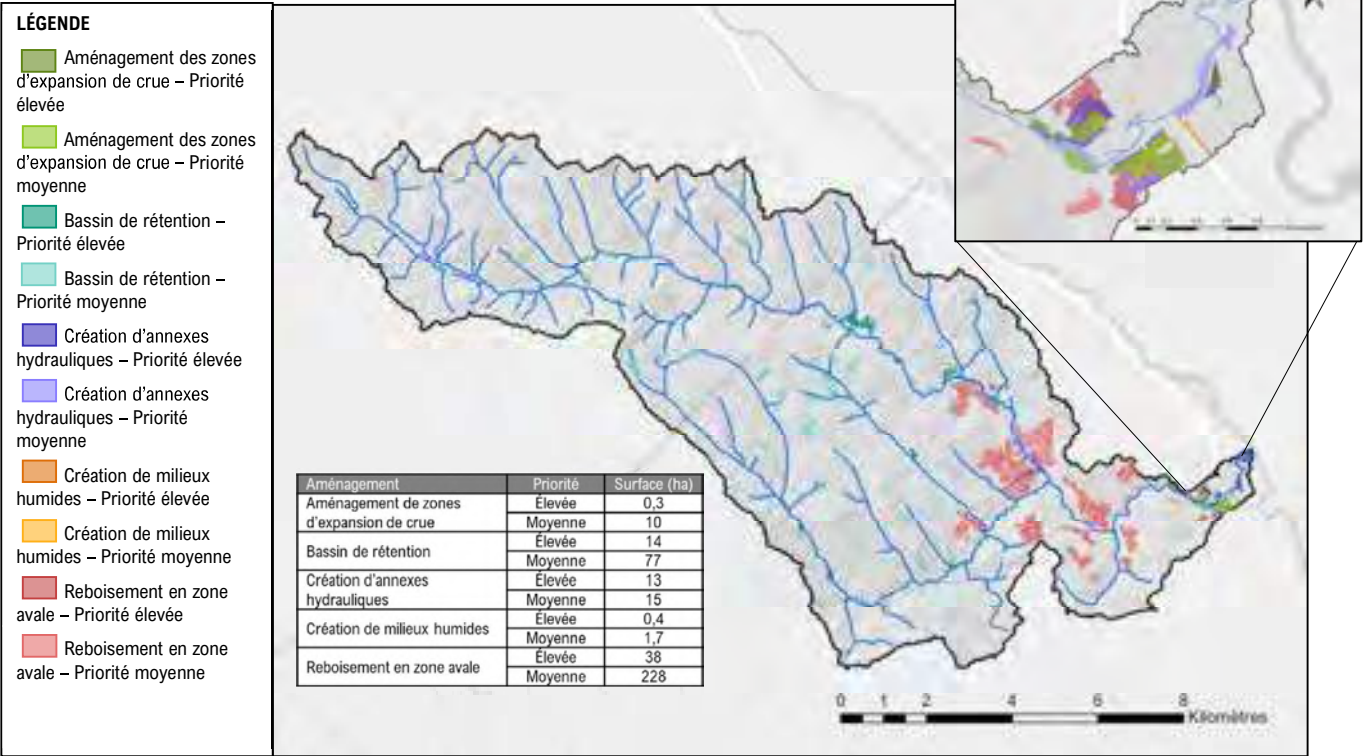
prendre en compte les prévisions climatiques futures pour la région. Afin d'augmenter leurs capacités de stockage, un talus de rétention en terre parallèle aux lignes de contour topographique pourra également être intégré à la conception, ainsi que la création de routes d'écoulement préférentiel. Ceux-ci pourront être construits en revalorisant les matériaux recueillis lors de l'excavation du bassin. Afin d'augmenter les bénéfices pour la biodiversité, la conception des bassins doit privilégier des formes naturelles et une diversité de profondeurs afin de créer plusieurs niches écologiques. D'un point de vue logistique, la construction d'un réseau de bassins de rétention pourra considérer l'ordre suivant : débuter avec les sites de priorité élevée, suivis des sites des terres de la couronne, puis des sites chevauchant les zones identifiées comme étant également prioritaires pour le reboisement.

Afin de réduire le ruissellement et l'érosion de surface, la technique du reboisement est l'aménagement final à privilégier en zones amont et moyenne pour le scénario de performance globale. En raison des contraintes techniques potentielles pour le reboisement dans ces zones, la plantation stratégique de rangées d'arbres suivant les lignes de contour topographiques peut s'avérer davantage appropriée. D'une largeur d'environ 10 mètres de large, ces bandes forestières doivent miser sur la plantation d'espèces mixtes variées placées en quinconce afin de reproduire au maximum les conditions de croissance naturelles. En zone moyenne, la restauration d'un couvert continu doit constituer l'objectif principal afin d'assurer une performance optimale des bénéfices directs et des co-bénéfices. Lorsque l'établissement d'un couvert continu est impraticable, la mise en œuvre de corridors écologiques perpendiculaires à la pente est privilégiée afin de maximiser les bénéfices pour la gestion du ruissellement et la biodiversité. La composition et le choix des espèces pour le reboisement doivent également être planifiés minutieusement. L'approche privilégiée est une combinaison de différentes strates végétatives d'espèces indigènes qui requièrent peu d'entretien et seront tolérantes aux changements climatiques anticipés. Lorsque cela est pertinent selon le contexte écologique, la priorité pourra être accordée aux espèces résineuses qui offrent un meilleur rendement en matière d'interception des précipitations et de ralentissement de la fonte des neiges par ombrage. Suivant les résultats de la carte du scénario, nous observons que les efforts de reboisement devront se concentrer principalement sur le territoire situé au Nouveau-Brunswick. Ce résultat correspond au constat initial de la couverture de la végétation indiquant que l'exploitation forestière est légèrement plus étendue dans cette région.

6.1.2 Scénario 2 : Performance technique

Le scénario de performance technique présenté à la figure 6.3 accorde la priorité aux aménagements ayant le plus grand potentiel de réduction des risques d'inondation dans le bassin en fonction des résultats obtenus dans l'analyse multicritère. Cette stratégie est donc recommandée uniquement si les inondations dans le bassin versant sont évaluées comme présentant un risque élevé ou très élevé pour les communautés.

Figure 6.3 Scénario de performance technique recommandé



La sélection des aménagements pour ce scénario présente plusieurs similarités avec le portfolio de performance globale. En effet, quatre des cinq aménagements sont identiques, hormis la restauration d'annexes hydrauliques. Toutefois, l'ordre de priorité pour la mise en œuvre d'une stratégie d'atténuation des risques d'inondation entre les scénarios diffère. Une particularité notable de ce scénario est l'absence d'aménagement pour la zone amont. Cette singularité s'explique par la distance éloignée de cette zone de la portion urbaine du bassin. De ce fait, le temps de parcours prolongé de l'eau entre ces deux aires atténue l'impact potentiel des aménagements sur le risque global d'inondation.

De façon similaire au scénario de performance globale, l'aménagement de la zone d'expansion de crue est jugé prioritaire en raison du score élevé obtenu dans l'analyse multicritère pour la dimension de performance technique. Ainsi, les recommandations émises dans la section précédente conviennent également pour cette stratégie. Afin de maximiser l'efficacité de cet aménagement pour l'atténuation des risques d'inondation, il y aura lieu d'accorder une importance particulière au reprofilage du territoire en cellules de rétention.

En seconde priorité, l'établissement de bassins de rétention dispersés en zone moyenne vise plusieurs fonctions préventives pour la GIRI. Notamment, ces ANFN favorisent la réduction de la charge hydraulique vers les milieux récepteurs lors d'averses et de fonte de neige, la désynchronisation des débits des différents tributaires, la balance des sédiments et la rétention de l'eau sur le territoire. En plus des recommandations présentées pour le scénario de performance globale pour cet aménagement, une priorité supplémentaire devra être accordée pour les bassins connectés hydrologiquement aux cours d'eau. De ce fait, ceux-ci démontrent une performance supérieure pour la réduction des pics de crue (Goff et Gentry, 2006).

La restauration d'annexes hydrauliques se positionne en troisième place pour le scénario de performance technique. La planification de cet aménagement doit tout d'abord prioriser les tronçons ayant subi d'importantes modifications hydromorphologiques. Ainsi, il est recommandé d'utiliser les photographies aériennes disponibles depuis les années 1940 afin de planifier la remise en fonction des bras morts et secondaires ayant été remblayés, lorsque ceux-ci sont compatibles avec l'occupation actuelle du territoire. De façon générale, la construction d'annexes dans la zone de méandre convexe de la rivière, où se déposent les sédiments, est à éviter en raison des risques accrus de colmatage de l'ouvrage et d'érosion (Vecchio, 2010). Lors de la planification d'annexes hydrauliques, la conception du profil transversal des aménagements doit privilégier une morphologie hétérogène permettant la création d'une variété de micro-habitats (Yochum, 2018). Par ailleurs, la construction de ces structures doit être accompagnée par l'établissement d'une bande riveraine végétalisée appropriée en pente douce afin d'assurer la stabilité des rives et maximiser les bénéfices écologiques. Lors de la conception, une attention particulière doit être apportée à la morphologie des annexes connectées au cours d'eau afin d'éviter les embâcles de glace.

Un projet de restauration du bras secondaire et de la complexité hydromorphologique du cours d'eau en amont de l'autoroute Transcanadienne pourrait être développé afin de remplacer les lagunes d'eau potable non fonctionnelles. En fonction des résultats des cartes d'aptitude, ce projet pourra être combiné à l'aménagement de la zone d'expansion de crue, la création de milieux humides et le reboisement afin de maximiser son efficacité. Dans un même ordre d'idée, un projet de restauration pour la section en amont et en aval de la rue Demers a déjà été développé afin de réduire l'accumulation problématique de sédiments dans ce tronçon (voir annexe 8). Ce site correspond à une aire priorisée pour la restauration d'annexes hydrauliques.

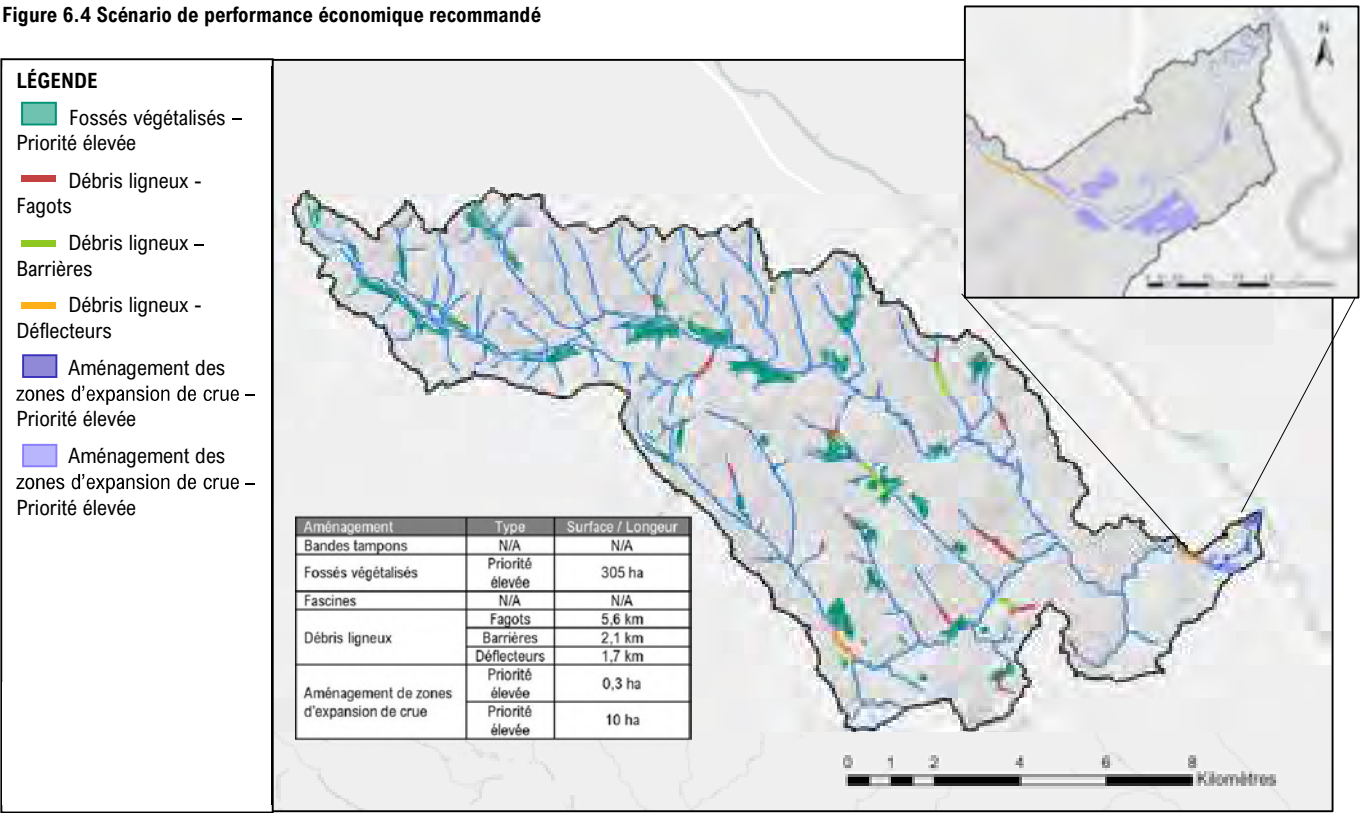
Suivant la liste des priorités, la restauration et la création de milieux humides offrent plusieurs bénéfices pour la régulation des niveaux d'inondation. Cet aménagement nécessite des considérations similaires à celles présentées pour le scénario de performance globale. En raison de sa position inférieure dans l'ordre des priorités, il est recommandé de privilégier en préséance le site de priorité élevée, situé sur l'aire réservée pour le projet du parc Rivière-à-la-Truite. Nous retrouvons également sur ce site l'aménagement de la zone d'expansion de crue, la restauration d'annexes hydrauliques et le reboisement. La planification de ces quatre aménagements sur un même site permettrait d'optimiser les fonctions pour la GIRI.

Enfin, le reboisement en zone avale constitue le dernier aménagement à considérer pour le scénario de performance technique. De façon similaire aux milieux humides, sa position moindre sur la liste des priorités engendre une limitation potentielle pour la sélection des sites dans un plan d'action final. Ainsi, les zones de priorité élevée ainsi que celles chevauchant des sites optimaux pour d'autres aménagements dans le scénario sont à privilégier.

6.1.3 Scénario 3 : Performance économique

Le scénario de performance économique présenté à la figure 6.4 constitue le portfolio d'aménagements le plus avantageux d'un point de vue monétaire. Il représente ainsi le scénario prioritaire dans un contexte administratif où les ressources matérielles, financières et humaines sont particulièrement limitées. Cependant, ces aménagements peuvent offrir des bénéfices restreints en matière de réduction des risques d'inondation et d'érosion et d'avantages environnementaux et sociaux.

Figure 6.4 Scénario de performance économique recommandé



Selon le scénario de performance économique, la restauration des bandes tampons est considérée comme prioritaire sur l'ensemble du bassin versant en raison de sa forte performance coût-bénéfice. Puisque l'identification des rives présentant des fonctions dégradées requiert des efforts de caractérisation sur le terrain, cet aménagement n'est donc pas représenté sur la carte du scénario. Dans le même sens, les sites pour l'aménagement de fascines, en troisième priorité pour cette stratégie, ne sont également pas identifiés. Le choix entre la végétalisation d'une bande tampon ou la pose de fascines dépend des caractéristiques physiques du site. Ainsi, concernant la mise en place de fascines, celles-ci sont recommandées pour les bandes riveraines dénudées nécessitant une stabilisation accrue, soit en fonction du critère de pente ($\geq 16\%$), de la proximité d'infrastructures routières ($< 15\text{ m}$), ou de l'instabilité des sols (grains grossiers) (Gouvernement du Québec, 2005).

Afin de restaurer les bandes tampons, les cours d'eau devraient être bordés des deux côtés en visant une largeur optimale de végétation naturelle de 30 mètres lorsque cela est possible, et de 15 mètres au minimum (Environnement Canada, 2013). Les bénéfices associés à la mise en place de bandes tampons sont maximaux dans les zones de reconnexion avec la plaine inondable et dans les sections où la rive présente des instabilités structurelles (Environment Agency, 2018). Par ailleurs, le choix des végétaux pour la revégétalisation doit mettre l'accent sur la reconstitution des conditions biotiques et abiotiques appropriées en privilégiant des espèces indigènes variées ayant un système racinaire robuste afin de maximiser la stabilité des sols. Le moteur de recherche sur les végétaux recommandés de Québec Vert (s. d.) pourrait notamment s'avérer utile pour la planification de la bande riveraine. À titre de référence, le Myrique baumier (*Myrica gale*), l'érable rouge (*Acer tataricum ginnala*), le sorbaire à feuille de Sorbier (*Sorbaria sorbifolia*) et la viorne trilobées (*Viburnum trilobum*) sont quelques exemples d'espèces identifiées comme étant adaptées et bénéfiques pour la stabilisation des bandes riveraines (SARM, 2021).

En deuxième priorité, la construction stratégique de fossés végétalisés suivant les lignes de contour topographiques est recommandée en zone amont et moyenne afin de capter le ruissellement sur le territoire. En raison du grand nombre de superficies obtenues pour la carte d'aptitude, seuls les sites de priorité élevée furent retenus. De plus, les zones situées entre les chemins forestiers et les cours d'eau furent privilégiées afin de réduire le transport de sédiments et la charge hydraulique vers le réseau hydrographique. De la même façon, les sites positionnés entre des zones d'occupation du sol problématiques, tels que les aires de coupes totales ou les carrières, et un cours d'eau furent sélectionnés. Afin de protéger la contribution écologique de l'apport des sédiments et de la matière organique dans le réseau hydrographique, les zones d'apport de matière identifiées par Conservation de la nature Canada furent également éliminées de la sélection finale (Nussey et Noseworthy, 2020). Ainsi, la construction de fossés de rétention est

particulièrement appropriée pour les zones pentues mises à nues ou présentant un couvert végétatif immature ou parsemé. Lorsque construit dans des zones sans couvert végétal naturel, il est recommandé de planter une haie d'arbres ou d'arbustes d'espèces indigènes en aval du fossé afin de renforcer l'infiltration et l'interception du ruissellement et protéger la structure.

Par ailleurs, la mise en œuvre d'un système de drainage durable pour les chemins forestiers est également recommandée. Ainsi, l'établissement de végétation dans les fossés dénudés est primordial afin de rétablir la balance sédimentaire dans le bassin et diminuer la charge hydraulique vers les milieux récepteurs. En raison des efforts de caractérisation requis pour l'identification des fossés dénudés, cet aménagement n'est ainsi pas représenté dans la carte du scénario. Afin de faciliter l'entretien des fossés végétalisés, il est recommandé d'appliquer la méthode du tiers inférieur, consistant à déblayer seulement le fond et à laisser les talus végétalisés. Cette technique permet une diminution de 75 à 84 % de l'érosion et des gains économiques de 40 à 66 % (Monast Robineau, 2007). De façon générale, l'utilisation préliminaire d'une terre végétale composée d'un mélange fertile de terre, de sable et de matière organique est primordiale afin d'assurer l'implantation de la végétation dans les fossés. Afin d'augmenter les chances de succès et réduire les risques d'introduction d'espèces envahissantes, des mélanges de graines d'espèces indigènes doivent également être utilisés. La construction de canaux de diversion des fossés vers les milieux forestiers est également envisageable afin d'évacuer une partie de la charge hydraulique.

Par ailleurs, la gestion des débris ligneux est privilégiée en quatrième position en raison de sa rentabilité pour l'atténuation des risques d'inondation. Les tronçons identifiés sur la carte du scénario furent sélectionnés en fonction des caractéristiques des terres adjacentes des deux côtés des cours d'eau. Dans les cours d'eau intermittents ou pentus, soit d'ordre 0 et 1, les fagots de bois placés dans les rigoles suivant le sens des écoulements sont recommandés afin de réduire le volume hydraulique à la source lors d'averses ou de fonte des neiges rapide. Ces fagots sont habituellement placés en série et conçus afin de couvrir entièrement la surface du canal actif. Dans les zones moins inclinées, soit les cours d'eau d'ordre 2, les « leaky dams » ou barrières perméables exercent des fonctions similaires et sont ainsi appropriés pour la rétention et la diversion des écoulements dans les cours d'eau de moins de 3 mètres de large. Ces structures peuvent être installées de façon indépendante ou en série (Highways England, 2021). Dans les cours d'eau d'ordres supérieurs, soit 3 et 4, la pose de déflecteurs est recommandée afin de réorienter et ralentir les débits. Cette technique est particulièrement efficace pour le réalignement naturel de tronçons linéarisés afin de restaurer naturellement la sinuosité de la rivière. Les déflecteurs peuvent être également placés de façon stratégique afin de diminuer la force érosive du courant sur les rives plus vulnérables à l'érosion.

Enfin, l'aménagement de la zone d'expansion des crues représente la cinquième priorité pour le scénario de performance économique. Puisqu'il constitue la seule mesure située en zone aval, il est recommandé de maximiser le nombre de sites aménagés pour la stratégie finale, malgré sa position inférieure sur la liste des priorités.

6.2 ATTÉNUATION DES RISQUES

Tout projet de modification de l'aménagement du territoire peut entraîner des répercussions négatives sur l'environnement, l'économie ou la société. La réalisation de ces impacts pose des risques importants sur la viabilité et la crédibilité du projet, notamment en termes de financement et d'acceptabilité sociale. Afin de réduire les effets négatifs du projet, il est ainsi important de définir des stratégies d'atténuation pour tous les risques de l'établissement d'ANFN dans le bassin versant. Le tableau 6.2 présente une liste de solutions à mettre en œuvre afin d'atténuer les risques identifiés à la section 3.4 pour chaque aménagement.

Tableau 6.2 Stratégies d'atténuation

AMÉNAGEMENT	RISQUE	ATTÉNUATION
Multiples	Perte de terres vouées à d'autres usages.	Effectuer une consultation publique rassemblant des représentants de tous les secteurs potentiellement impactés par la mise en œuvre de l'aménagement.
		Mettre en œuvre un outil d'observation foncier afin d'évaluer les impacts potentiels des ANFN sur le marché foncier.
Restauration d'annexes hydrauliques	Création de rives d'érosion et de dépôts sédimentaires problématiques.	Effectuer une modélisation morphologique en amont du projet afin de déterminer l'emplacement optimal pour l'établissement de l'aménagement, incluant des considérations pour l'espace de liberté de la rivière et du libre mouvement des glaces.
	Formation de tronçons propices aux embâcles de glace et aux débris ligneux.	
	Modifications hydromorphologiques non désirables en aval.	
Aménagement des zones d'expansion de crues	Échouement des poissons après une période de hautes eaux	Lors de la conception de l'aménagement, créer un design conciliant la maximisation des bénéfices pour la GIRI et le drainage rapide du territoire après une période de crue.
Restauration / Création de milieux humides	Émissions de méthane.	Adopter des stratégies de conservation des milieux humides ainsi qu'une zone tampon de 30 mètres afin de protéger leurs fonctions pour un minimum de 50 ans.
Bassins de rétention	Impacts négatifs potentiels sur la température de l'eau en aval.	Planter des arbres sur le pourtour et à la sortie du bassin afin de procurer de l'ombre et réguler la température de l'eau. Combiner le bassin de rétention avec d'autres ANFN ayant un fort potentiel d'infiltration et d'évapotranspiration tels que les fossés végétalisés à la sortie du bassin.
	Réduction de l'oxygène dissout disponible et risque d'eutrophisation.	Appliquer des stratégies de phytoremédiation afin de maximiser l'élimination de l'excès d'éléments nutritifs dans l'eau et augmenter la quantité d'oxygène dissout.

Tableau 6.2 Stratégies d'atténuation (suite)

AMÉNAGEMENT	RISQUE	ATTÉNUATION
Aménagement de débris ligneux	Risque d'inondation localisée en amont.	À partir des résultats de la carte d'aptitude et d'observations sur le terrain, s'assurer qu'aucun milieu sensible ou activité socio-économique non compatible ne sont présents dans la zone d'inondabilité.
	Création d'embâcles et enjeu de sécurité lié au détachement du débris.	Éviter toute installation de débris ligneux directement en amont de structures telles que les ponts et les ponceaux. Fixer solidement les débris ligneux en place afin de réduire les risques de détachement.
	Sédimentation en amont de l'aménagement pouvant réduire l'efficacité.	Combiner la technique de débris ligneux avec d'autres ANFN ayant un fort potentiel de rétention des sédiments.
Fossés végétalisés	Risques d'inondation localisée si la végétation est mal entretenue.	Effectuer un entretien régulier des fossés lors de temps sec en suivant la méthode du tiers inférieur.
	Transfert de polluants vers la nappe phréatique.	Planifier adéquatement le choix d'espèces indigènes variées pour la revégétalisation des fossés.
Reboisement en zone amont et moyenne	Réduction de la quantité d'eau de surface disponible.	Combiner le reboisement en amont avec d'autres ANFN plus en aval ayant un fort potentiel de stockage de l'eau dans des zones stratégiques pour les activités socio-économiques utilisant l'eau de surface.
	Création d'embâcles ligneux hasardeux.	Éviter la plantation d'arbres dans un rayon de 15 mètres des cours d'eau.
	Introduction d'espèces envahissantes.	Planifier adéquatement le choix d'espèces indigènes variées les plus adaptées pour la plantation d'arbres selon le secteur en considérant les effets des changements climatiques sur la composition future des forêts.
	Réduction des revenus pour l'industrie forestière.	Élaborer une stratégie d'aménagement du territoire collaborative avec les acteurs de l'industrie forestière afin de concilier les usages.
Reboisement en plaine inondable	Dommages des infrastructures urbaines sous terrains par le réseau racinaire.	Éviter la plantation d'arbres dans un rayon de 2 mètres des réseaux d'égout souterrains.
	Refoulement des eaux en amont.	Combiner la plantation d'arbres avec d'autres ANFN ayant un fort potentiel de stockage de l'eau dans les zones à risques.
Bandes tampons	Introduction d'espèces envahissantes.	Planifier adéquatement le choix d'espèces indigènes variées les plus adaptées pour la revégétalisation selon le secteur, en utilisant par exemple l'outil de Québec Vert (s. d.).
	Création d'embâcles ligneux hasardeux.	Planifier adéquatement la composition de plantation selon les trois strates de végétation en évitant la plantation d'arbres dans un rayon de 15 mètres des cours d'eau.
Fascines	Risque de défaillance entraînant l'érosion de la rive.	Effectuer un suivi régulier en début de projet afin de vérifier le développement du système racinaire et remplacer les végétaux défaillants.

6.3 CONTINUITÉ DU PROJET

Ce rapport de recherche constitue la première étape pour la mise en œuvre d'une stratégie de gestion intégrée des inondations pour le bassin versant Rivière-à-la-Truite. De ce fait, la présente étude complète les six premières étapes du cadre de gestion pour la mise en œuvre d'ANFN présenté à la figure 6.5.

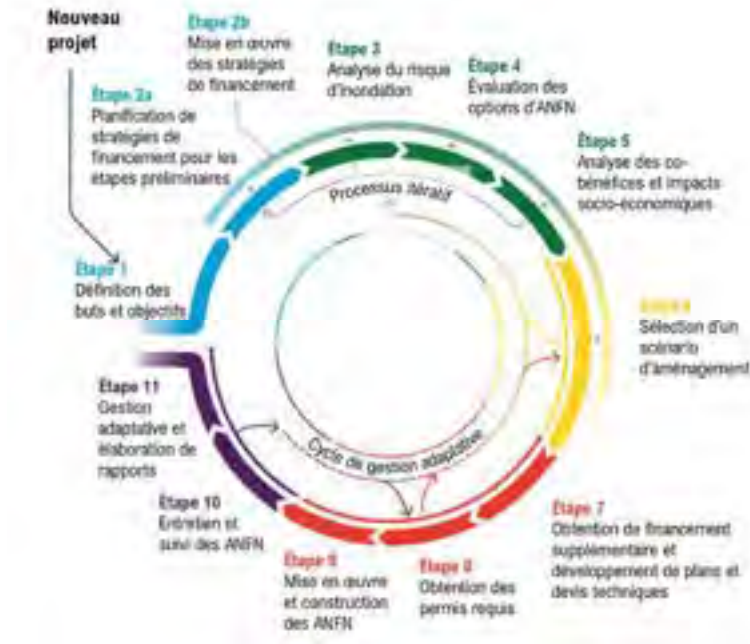


Figure 6.5 Étapes du cadre de gestion pour la mise en œuvre d'ANFN (adapté de Bridges et al., 2021)

En se basant sur les résultats d'analyse obtenus, la prochaine phase du projet vise à développer un plan de gestion adaptatif pour l'établissement des ANFN dans le bassin versant. La gestion adaptative est un processus itératif dans lequel les plans d'action sont continuellement actualisés en fonction de l'atteinte d'objectifs prédéfinis. En plus de la définition d'objectifs spécifiques, cette démarche inclut l'identification de scénarios de gestion alternatifs, de procédures de suivi et de phases d'évaluation et de réitération. (Banque Mondiale, 2017). Ce type de gestion est particulièrement adapté à la mise en œuvre de structures qui dépendent de l'évolution incertaine de dynamiques écosystémiques. Par le même fait, l'intégration d'une approche systémique pour toutes les étapes du cadre de gestion du projet est cruciale pour son succès. La compréhension des interactions dynamiques entre les dimensions écologiques, climatiques, hydrologiques, morphologiques et sociales permet de développer un plan holistique à long terme et d'anticiper les risques.

À cet égard, le tableau 6.3 présente une série de recommandations afin d'appliquer une approche itérative et systémique pour la continuité du projet. Puisque la mise en œuvre de solutions fondées sur la nature nécessite la contribution d'une équipe experte et multidisciplinaire, chaque recommandation est également accompagnée d'une sélection de partenaires potentiels pour leur réalisation.

Tableau 6.3 Recommandations pour la mise en œuvre des scénarios d'ANFN

LÉGENDE DES TYPES DE MESURE

AC : Acquisition de connaissances

R : Réglementation

IF : Incitatif financier

DT : Développement technique

SI : Sensibilisation des intervenants

IT : Intervention terrain

PI : Projet d'infrastructure

RECOMMANDATIONS	PARTENAIRES	TYPE DE MESURE
ORIENTATION 1 : CONSULTATION, ENGAGEMENT ET PARTICIPATION DES PARTIES PRENANTES		
Objectif 1.1 Favoriser l'acceptabilité sociale du projet.		
Développer une plateforme web centralisée et participative permettant de contribuer, de partager et d'accéder librement aux informations sur le projet.	Municipalités et organismes régionaux / Développeurs web	DT / SI
Organiser des rencontres individuelles avec les propriétaires fonciers des zones d'intérêt pour l'établissement d'aménagement.	Citoyens / Chargé de projet	SI
Organiser des consultations publiques interactives regroupant des représentants des secteurs communautaires, environnementaux, municipaux et économiques selon une composition représentative de la nature des activités et des intérêts dans le bassin versant.	Organisateurs communautaires / Citoyens et acteurs économiques / Municipalités et organismes régionaux / Organisations environnementales / Table de concertation de l'OBV Saint-Jean	SI
Développer des initiatives de conception collaborative grâce à des groupes de travail citoyens à l'échelle du quartier afin de planifier et mettre en œuvre les aménagements.	Organisateurs communautaires / Citoyens et acteurs économiques / Municipalités et organismes régionaux	DT / SI
Objectif 1.2 Sensibiliser et éduquer le public		
Adopter une approche de science citoyenne pour le suivi de certains indicateurs.	Organisateur communautaire / Experts scientifiques / Organismes environnementaux / Écoles locales	SI / IT
Inclure des infrastructures récréotouristiques permettant un accès inclusif aux aménagements ainsi que des panneaux informatifs sur le projet.	Chargé de projet / Architecte paysagiste / Ingénieur civil	DT / SI
Créer et promouvoir un guide de bonnes pratiques à l'intention des propriétaires de lots boisés privés et des propriétaires riverains.	Gestionnaire en environnement / Office de Vente des produits forestiers du Madawaska / Fédération des propriétaires de lots boisés du Nouveau-Brunswick / Société d'aménagement de la rivière Madawaska	DT / SI

Tableau 6.3 Recommandations pour la mise en œuvre des scénarios d'ANFN (suite)

RECOMMANDATIONS	PARTENAIRES	TYPE DE MESURE
ORIENTATION 2 : GESTION ADAPTATIVE		
Objectif 2.1 Planifier adéquatement les étapes de réalisation des travaux.		
Établir un calendrier des activités pour chaque étape du projet (coordination, conception, réalisation des travaux, suivis et entretien), identifiant les responsables et les délais prévus.	Chargé de projet / Maîtres d'œuvre	DT
Estimer les montants requis pour chacune des phases du projet, incluant les salaires, les frais pour des experts, les autorisations, les déplacements, la réalisation d'une caractérisation, la conception des plans et devis, l'acquisition de terrain, la réalisation des travaux, la surveillance du chantier, les suivis, les mesures correctives, ainsi qu'un fond de contingence.	Chargé de projet / Maîtres d'œuvre	DT
Planifier une stratégie de financement variée incluant des fonds publics et privés.	Chargé de projet / Municipalités	DT
Planifier les matériaux et la machinerie requis pour la préparation du terrain et la construction en misant sur une politique d'approvisionnement locale de source écologique et socialement responsable.	Chargé de projet / Maître d'œuvre	DT
Anticiper le processus réglementaire, incluant les processus d'autorisations et les permis requis, la réglementation environnementale et les lois pour l'aménagement du territoire et l'urbanisme.	Urbanistes / Firms de consultants Ministères (MFFP, MERN, MAMH, MEGL, MRNDE, MTI) / Municipalités	DT / AC
Élaborer des plans et devis techniques détaillés incluant les activités préparatoires au terrain et les personnes responsables.	Ingénieurs civils / Hydrologistes / Architectes paysagistes	DT
Objectif 2.2 Assurer le suivi et l'entretien des aménagements.		
Élaborer un plan à long terme, incluant la fréquence, l'échéancier et les responsables afin d'assurer l'entretien et le suivi des aménagements.	Chargé de projet	DT
Développer des objectifs et des indicateurs SMART (spécifique, mesurable, atteignable, réaliste et temporellement défini) pour chaque aménagement.	Chargé de projet	DT
Effectuer un suivi à l'automne et au printemps suivant l'établissement des aménagements et selon une base régulière par la suite en fonction du type d'aménagement.	Chargé de projet / Techniciens en environnement	IT
Analyser les résultats des suivis de manière itérative et effectuer les changements nécessaires pour la gestion du projet de façon continue.	Chargé de projet	DT

Tableau 6.3 Recommandations pour la mise en œuvre des scénarios d'ANFN (suite)

RECOMMANDATIONS	PARTENAIRES	TYPE DE MESURE
ORIENTATION 3 : GESTION DU RISQUE		
Objectif 3.1 Atténuer les impacts environnementaux.		
Selon le type d'aménagement, effectuer une étude d'impact ou une analyse environnementale afin d'évaluer et d'atténuer les effets sur les écosystèmes.	Gestionnaire en environnement / Bureau d'étude / Écologistes / Biologistes	AC
Sélectionner des espèces de plantes indigènes et variées basées sur la classification écologique des terres du site.	Architectes paysagistes / Horticulteurs / Ingénieurs forestiers	IT
Prévoir les périodes de travail sur le terrain en fonction des périodes sensibles pour certaines espèces. Privilégier les périodes hivernales pour la construction de routes.	Écologistes / Biologistes / Chargé de projet	IT
Prendre en compte la structure, la diversité des espèces et le fonctionnement des écosystèmes dans le choix et la localisation des sites.	Écologistes / Biologistes / Gestionnaire en environnement	DT
Mettre en œuvre un plan de contrôle des espèces envahissantes suivant la construction des ANFN, principalement pour les sites constamment chargés en eau.	Écologistes / Biologistes / Gestionnaire en environnement / Citoyens	IT
Objectif 3.2 Atténuer les impacts socio-économiques.		
Mettre en œuvre un outil d'observation foncier afin d'évaluer les impacts potentiels des ANFN sur le marché foncier.	Économistes / Municipalités	AC
Développer des stratégies de synergies économiques avec l'industrie forestière.	Propriétaires de lots boisés privés	IF
Objectif 3.3 Éviter le transfert du risque d'inondation.		
Effectuer une modélisation hydraulique et hydrologique des aménagements afin de maximiser la désynchronisation des débits de pointe.	Hydrologistes / Géomaticiens	AC
Anticiper les risques de refoulement des eaux dans les zones adjacentes aux ANFN durant la conception des aménagement.	Hydrologistes / Ingénieur civil	DT

Tableau 6.3 Recommandations pour la mise en œuvre des scénarios d'ANFN (suite)

RECOMMANDATIONS	PARTENAIRES	TYPE DE MESURE
ORIENTATION 4 : RÉSILIENCE DU PROJET		
Objectif 4.1 Adapter les travaux aux réalités du terrain.		
Effectuer une modélisation hydraulique et des dynamiques morphologiques afin d'estimer les capacités de stockage du territoire et déterminer les espaces de mobilité M_{50} et M_{plaine} de la rivière (Demers et al., 2017).	Hydrologistes / Géomaticiens / Géomorphologistes	AC
Effectuer une caractérisation détaillée des conditions initiales du site du projet incluant des inventaires floristiques, des relevés topographiques, des études de sol, etc.	Techniciens en environnement / Gestionnaire en environnement	AC
Considérer le couvert nival et de glace dans la conception des aménagements, incluant un espace de liberté afin d'éviter les embâcles de glace.	Ingénieurs civils / Hydrologistes	DT
Objectif 4.2 Adopter une approche holistique par bassin versant.		
Collaborer avec les intervenants de la gestion de l'aménagement et des ressources en eau du bassin versant Saint-Jean pour toutes les étapes de gestion.	OBV Saint-Jean / Société d'aménagement de la rivière Madawaska / Chargé de projet	DT
Mettre en œuvre un portfolio varié d'ANFN en fonction des différentes zones du bassin versant (amont, moyenne et aval) en misant sur les caractéristiques morphologiques naturelles du territoire.	Chargé de projet / Gestionnaire en environnement / Hydrologistes / Géomorphologistes / Géomaticiens	DT
Objectif 4.3 Intégrer les ANFN dans les stratégies territoriales à différentes échelles.		
Intégrer la stratégie de gestion intégrée des risques d'inondation dans les différents documents pour l'aménagement du territoire à toutes les échelles (arrêtés de zonage, plans d'urbanisme, schémas d'aménagement, plans municipaux, plans ruraux, déclarations de perspectives d'urbanisme, plans directeurs des milieux naturels, etc.)	MRC, Municipalités, CSRNO	R
Prévoir des stratégies de financement alternatives incluant des partenaires locaux, régionaux, provinciaux et fédéraux.	Chargé de projet / Gestionnaire en environnement	DT
Objectif 4.4 Adapter le projet au contexte des changements climatiques.		
Intégrer les prévisions climatiques et hydrométéorologiques pour 2100 dans la conception des ANFN.	Climatologues / Hydrologistes / Ingénieurs civils	DT
Effectuer un suivi annuel des changements des inondations et des prévisions climatiques et hydrométéorologiques et réévaluer la stratégie de GIRI en conséquence.	Chargé de projet / Gestionnaire en environnement	DT

Tableau 6.3 Recommandations pour la mise en œuvre des scénarios d'ANFN (suite)

RECOMMANDATIONS	PARTENAIRES	TYPE DE MESURE
ORIENTATION 5 : PLANIFICATION DE STRATÉGIES COMPLÉMENTAIRES POUR LA GIRI		
Objectif 5.1 Protéger les actifs naturels exerçant des fonctions pour l'atténuation des inondations dans le bassin versant.		
Réaliser un inventaire et une caractérisation des milieux naturels d'intérêt selon leur potentiel d'atténuation sur le territoire.	Gestionnaire en environnement / Écologistes / Biologistes	AC
Adopter des mesures réglementaires appropriées (zonage, lotissement, PAE, PIIA, etc.) restreignant la gamme des usages autorisés dans ces milieux et dans leurs bandes tampons.	Municipalités	R
Mettre en œuvre des plans de conservation volontaire pour les terres privées, tels que les contrats de rivière.	Organismes environnementaux / Propriétaires fonciers	SI / IF
Développer un programme de surveillance et de démantèlement des barrages de castor à risque, principalement pour ceux construits en série ou situés près de ponceaux.	Organismes environnementaux / Techniciens en environnement / Écologistes	AC / IT
Objectif 5.2 Accroître les connaissances sur les risques d'inondation		
Installer une station pluviométrique et hydrométrique sur la rivière à la Truite afin de fournir des informations pour le suivi en temps réel des crues dans le bassin versant.	Hydrologistes / Municipalité d'Edmundston	AC / IT
Archiver toutes les informations relatives aux événements d'inondation sur le territoire sur une plateforme publique et centralisée.	Services d'urgence / Municipalité d'Edmundston	AC
Objectif 5.3 Minimiser l'exposition des communautés à l'aléa d'inondation		
Mettre en œuvre une politique de priorité de rachat des territoires à forte vulnérabilité.	Municipalité	R
Remplacer les ponts et ponceaux sous-dimensionnés dans le bassin selon un ordre prioritaire en fonction des prévisions hydrauliques en contexte de changements climatiques.	Ministères des transports (Québec et Nouveau-Brunswick) / Municipalités / Compagnies forestières	PI
Offrir des incitatifs pour la mise en œuvre d'ANFN de gestion des eaux pluviales sur les propriétés résidentielles et commerciales.	Municipalités / Citoyens / Organismes de conservation	IF

Tableau 6.3 Recommandations pour la mise en œuvre des scénarios d'ANFN (suite)

ORIENTATION 6 : DOCUMENTATION ET PARTAGE DES APPRENTISSAGES		
Objectif 6.1 Contribuer au développement des connaissances sur les solutions fondées sur la nature		
Offrir un libre accès aux données afin de partager les résultats de manière transparente et interactive avec d'autres spécialistes et intervenants locaux, régionaux et internationaux.	Chercheurs / Chargé de projet	AC
Utiliser les ANFN mis en œuvre comme sites expérimentaux afin de faire un suivi de leur performance et promouvoir les solutions fondées sur la nature.	Chercheurs / Chargé de projet	AC / IT

6.4 LEVIERS D'ACTION ET LIMITES DE L'ÉTUDE

Plusieurs caractéristiques territoriales et de gouvernance peuvent contribuer au succès de la mise en œuvre d'un plan d'action fondé sur la nature pour la réduction des risques d'inondation dans le bassin versant Rivière-à-la-Truite. Ainsi, l'élaboration d'une stratégie concrète devra miser sur ces leviers d'action, ainsi que sur les résultats de la présente étude, en considérant toutefois les limites méthodologiques de celle-ci.

6.4.1 Identification des opportunités locales

Tout d'abord, la forte proportion de couvert naturel dans le bassin versant constitue un avantage important pour la mise en œuvre de solutions fondées sur la nature à l'échelle paysagère. De ce fait, le faible coefficient d'urbanisation sur le territoire du bassin versant réduit les contraintes pour l'établissement d'ANFN ainsi que les risques de conflits d'usage. Cette caractéristique permet ainsi d'adopter une approche préventive plutôt que corrective afin d'anticiper les problématiques pour la gestion de l'eau dans un contexte de changements climatiques et de développement du territoire.

Par ailleurs, il existe un fort appui politique de la part des intervenants locaux pour l'adoption de solutions alternatives aux techniques d'ingénierie conventionnelles pour la gestion des risques d'inondation. Cette volonté se manifeste par les plans et stratégies de développement durable municipaux, les rencontres individuelles avec les intervenants, le financement de cette étude ainsi que l'historique de projets similaires.

De ce fait, des projets intégrant les principes des solutions fondées sur la nature ont déjà été complétés dans le bassin versant afin de réduire les risques d'inondation. Tout d'abord, dans le cadre de mesures de compensation pour la construction d'un barrage au centre-ville d'Edmundston, un projet de restauration écologique de berges de la rivière à la Truite a été mis en œuvre. Située aux abords du chemin Rivière à la Truite, la rive droite avait été détruite lors des inondations de 2008, posant d'importants risques pour la stabilité structurelle de ce tronçon. La restauration a misé sur des techniques de génie végétal, incluant la pose d'une jute en fibre de coco, la revégétalisation de la bande riveraine et la diversion d'une portion de la

rivière (voir annexe 9). De plus, un autre projet a été mis en œuvre en aval du pont de la rue Demers. Celui-ci s'est fondé sur la technique de reconnexion de la plaine inondable afin de réduire les risques d'inondation en éliminant les contraintes latérales et en abaissant les terres adjacentes de la rive droite de la rivière. De plus, la plaine d'inondation créée a été reboisée afin d'augmenter la rugosité hydraulique de la surface. Selon les intervenants consultés, ces projets ont démontré d'excellentes performances structurelles durant les périodes de crue qui ont suivi la construction des aménagements.

6.4.2 Limites méthodologiques des analyses

Tout d'abord, la mise en contexte du bassin versant et l'analyse du risque d'inondation sont limitées par la qualité et la disponibilité des données pour le territoire. De ce fait, plusieurs lacunes dans les connaissances ont été recensées, notamment par l'absence de jaugeage pour la rivière à la Truite, le manque de recensement précis de la pluviométrie locale et les données fragmentaires disponibles sur les dommages et l'historique des inondations. Ces lacunes peuvent ainsi générer une analyse incomplète ou partiellement erronée de la caractérisation du bassin versant et du risque d'inondation.

De plus, quoique l'évaluation de chaque indicateur pour l'analyse multicritère se base sur une multitude de données qualitatives et quantitatives d'ouvrages scientifiques, de guides de références et d'études de cas, les lacunes dans les connaissances identifiées à la section 3.3 limitent la fiabilité des résultats. Par ailleurs, seulement 8 intervenants sur une possibilité de 16 ont rempli le questionnaire visant à intégrer les préférences locales pour chaque critère d'analyse. De ce fait, aucun acteur économique n'a participé au processus de consultation, affectant ainsi la représentativité de l'échantillon. Ce faible taux de participation peut ainsi biaiser les résultats pour la pondération des critères. De plus, l'analyse multicritère peut être considérée comme une approche partiellement subjective, puisque l'évaluation des critères relève de l'analyse d'un seul chercheur. En outre, il est à noter que les résultats obtenus en termes de bénéfices, co-bénéfices et de performance économique dépendent de plusieurs facteurs et ne sont pas garantis. De ce fait, la performance des aménagements à réaliser leur plein potentiel de bénéfices dépend de la conception judicieuse de ceux-ci au sein d'une gestion adaptative et intégrée de l'aménagement du territoire et des ressources en eau.

De façon similaire à l'analyse multicritère, la réalisation de cartes d'aptitude dépend fortement de la qualité et de la disponibilité des données. De ce fait, les couches cartographiques fournies par les instances gouvernementales sont parfois désuètes ou incomplètes, générant une marge d'erreur significative pour la production des cartes. De surcroît, l'absence d'harmonisation entre les données produites par le gouvernement du Québec et celui du Nouveau-Brunswick crée des difficultés supplémentaires pouvant

biaisier les résultats obtenus. De par ses objectifs inhérents visant la planification stratégique à grande échelle, l'outil de carte d'aptitude manque de spécificité et requiert l'acquisition de données supplémentaires afin d'effectuer le choix final des sites d'aménagement. De ce fait, afin d'être validés, la majorité des résultats nécessitent la réalisation de caractérisation sur le terrain et plusieurs exigent l'utilisation d'une modélisation hydraulique.

Enfin, la courte période accordée pour la production de la présente étude limite les opportunités pour le développement collaboratif avec d'autres experts, la mise en œuvre d'outils de participation publique, l'approfondissement de certains concepts et la validation empirique des résultats.

CONCLUSION

En conclusion, la combinaison appropriée d'aménagements naturels et fondés sur la nature représente une stratégie viable pour accroître la résistance du bassin versant Rivière-à-la-Truite face aux risques d'inondation. De ce fait, l'analyse des caractéristiques hydromorphologiques naturelles du bassin versant démontre peu de facteurs aggravants pour la genèse de crues soudaines. Au contraire, la forme allongée du bassin et la faible pente moyenne du principal cours d'eau, combinés à la présence de nombreux milieux humides riverains, sont plutôt des éléments modérateurs des débits de pointe dans le réseau hydrographique. Toutefois, la région a connu plusieurs événements d'inondations dans les dernières années, causant d'importants dommages aux biens et infrastructures. Majoritairement associés aux conditions printanières, les principaux types d'inondations observés sont les débordements en eau libre, ainsi que les refoulements de la rivière Madawaska et des égouts pluviaux. Bien que l'origine de ces inondations puisse être liée à l'importante pluviométrie observée dans la région, de nombreux facteurs additionnels modifient les conditions hydrologiques et hydrauliques du bassin, exacerbant les risques.

En effet, les barrages problématiques de castor, les techniques d'ingénierie conventionnelles modifiant la dynamique fluviale naturelle de la rivière ainsi que la présence de ponts et ponceaux sous-dimensionnés modifient l'équilibre fonctionnel de la rivière. Ces modifications hydromorphologiques engendrent des conséquences indésirables pour les communautés en aval, dont le dépôt problématique de sédiments, l'augmentation des pics de crues ou les débordements dans des zones à risque. De plus, la présence de nombreux chemins forestiers, accompagnée par les traverses problématiques dans les cours d'eau et l'aménagement d'un important réseau de drainage inadapté, entraîne un déséquilibre des dynamiques sédimentaires dans le bassin versant. Les chemins forestiers contribuent également à l'intensification de la charge hydraulique vers les milieux récepteurs durant les périodes d'averses ou de fonte rapide des neiges. Enfin, les changements des types de couvert de la végétation, d'occupation des sols et d'utilisations des terres affectent les composantes du cycle hydrologique à l'échelle du bassin versant. Ces modifications sont susceptibles d'entraîner des répercussions importantes sur les paramètres physiques à l'origine des inondations. Les impacts sont principalement liés aux activités d'exploitation forestière, mais incluent également les effets de l'urbanisation, incluant la dévégétalisation des bandes riveraines, l'augmentation du coefficient d'imperméabilité et l'installation d'un réseau de drainage artificiel.

Face à l'intensification prévue des phénomènes hydrologiques par les changements climatiques, les techniques de solutions fondées sur la nature ont été sélectionnées afin de mettre en œuvre une stratégie d'aménagement durable pour le bassin versant Rivière-à-la-Truite. Malgré certaines limitations conceptuelles, techniques et empiriques, la présentation d'une sélection d'ANFN a su attester le potentiel de

ces aménagements pour la gestion intégrée des risques d'inondation. De surcroît, l'évaluation d'une série d'indicateurs du développement durable a démontré que ces techniques génèrent également des bénéfices complémentaires sociaux et environnementaux. Ce faisant, la combinaison des deux méthodologies proposées, soit l'analyse multicritère et la carte d'aptitude, a permis de développer trois stratégies cohérentes d'aménagement du territoire pour l'atténuation des risques d'inondation. Ces outils sont particulièrement pertinents pour la planification d'ANFN à l'échelle du bassin versant en intégrant les préférences des parties prenantes, les éléments logistiques de l'occupation du territoire et les caractéristiques physiques du bassin comme éléments essentiels à la prise de décision. Sur la base des scénarios proposés, le succès de la mise en œuvre d'un plan d'action reposera tout d'abord sur la prévention des risques inhérents à l'établissement des aménagements via la mise en œuvre de stratégies d'atténuation appropriées. Par ailleurs, l'acceptation, la pertinence et la pérennité du projet dépendront de l'intégration de celui-ci au sein d'une démarche de gestion adaptative et systémique. Ces approches itératives permettent d'intégrer le projet de façon transversale et holistique dans les stratégies d'aménagement du territoire.

Ainsi, les résultats de cette étude proposent trois portefeuilles de solutions structurelles fondées sur la nature adaptées au bassin versant Rivière-à-la-Truite. Ces stratégies visent à accroître la résilience des communautés face aux risques d'inondation en misant sur le renforcement des fonctions régulatrices des écosystèmes. Toutefois, tel que souligné à la section 6.4.2, la portée de l'étude présente certaines limites, notamment du fait que les résultats obtenus constituent des outils d'aide à la décision. De ce fait, l'objectif de ces outils est d'analyser et d'organiser les connaissances disponibles afin d'émettre des propositions. Sur la base de celles-ci, les autorités responsables peuvent ainsi choisir les solutions et les plans d'action les plus adaptés pour établir une stratégie de réduction des risques d'inondation dans un contexte de changements climatiques.

Par conséquent, la continuation de cette étude nécessitera la contribution d'experts multidisciplinaires afin de produire des plans détaillés et réalisables en fonction des ressources financières disponibles et des contraintes réglementaires. De plus, cette démarche devra miser sur des stratégies complémentaires afin de développer un plan exhaustif pour la gestion intégrée des risques d'inondation. En règle générale, un plan d'action complet devra prioriser la mise en valeur des actifs naturels en s'appuyant sur la rentabilité des actions selon l'ordre décisionnel suivant (Golnaraghi et al., 2020) :

1. Conserver les actifs naturels présents sur le territoire
2. Restaurer les actifs naturels dégradés
3. Construire ce qui est nécessaire

De ce fait, les réalités du changement climatique nous forcent à reconnaître que les activités anthropiques affectent le système global et qu'il est impossible de prédire et contrôler entièrement la nature. Ainsi, un système durable de gestion intégrée des risques d'inondation devra considérer un large spectre de solutions potentielles contribuant à accroître la résilience des communautés et de l'environnement.

RÉFÉRENCES

- Abrinord. (2009). *Contrôle de l'érosion et gestion des fossés. Document complémentaire à la formation et support technique à la visite terrain*. http://crebsl.com/documents/pdf/algues_bleu-vert/municipalites/Controle_erosion_gestion_fosses.pdf
- Adam, P, Debiais, N. et Malavois, J. R. (2007). *Manuel de restauration hydromorphologique des cours d'eau*. http://www.trameverteetbleue.fr/sites/default/files/02guide_terrain.pdf
- Agriculture and Agri-Food Canada. (2010). *Soils of New Brunswick: The Second Approximation*. https://sis.agr.gc.ca/cansis/publications/surveys/nb/nbsa/nbsa_report.pdf
- Alfieri, L., Feyen, L. et Di Baldassare, G. (2016). Increasing flood risk under climate change: a pan-European assessment of the benefits of four adaptation strategies. *Climatic Change*, 136, 507-521.
- American Rivers. (2016). *Reconnecting Rivers to Floodplains: Returning natural functions to restore rivers and benefit communities*. https://floodready.vermont.gov/sites/floodready/files/documents/ReconnectingFloodplains_WP_Final.pdf
- Aquaportail. (2022). *Glossaire de la vie : dictionnaire biologie*. <https://www.aquaportail.com/dictionnaire-biologie.html>
- AquaTerra Solutions. (s. d.). *Branches ou fagots de branches de saules vivantes pour fascine ou tressage*. <http://www.genie-vegetal.eu/produit/fiche/97/en-branches-vivantes.htm>
- Association des gestionnaires régionaux des cours d'eau du Québec (AGRCQ). (2016). *Guide sur la gestion des cours d'eau du Québec*. 238-318. https://agrcq.ca/wp-content/uploads/2016/11/Guide_AGRCQ_Chapitre-5_27032017.pdf
- Ayalew, T. B., Krajewski, W. F., Mantilla, R., Wright, D. B. et Small, S. J. (2017). Effect of Spatially Distributed Small Dams on Flood Frequency: Insights from the Soap Creek Watershed. *Journal of Hydrological Engineering*, 22(7).
- Banque Mondiale. (2017). *Dispositifs de protection contre les inondations fondés sur la nature : principes et recommandations pour la mise en œuvre*. https://www.gfdrr.org/sites/default/files/publication/Brochure%20Implementing%20nature-based%20flood%20protection_Final_FRE.pdf
- Barnes, D. (2017). *The Permaculture Earthworks Handbook*. New Society Publishers.
- Belmont, L., Étienne, R. et Bordas, C. (2010). *Guide méthodologique de prise en compte de la trame verte et bleue*. https://www.trameverteetbleue.fr/sites/default/files/references_bibliographiques/volume-1-1.pdf
- Bérubé, P., Dubé, M., Delisle, S., Robitaille, J. et Grégoire, Y. (2010). *L'effet à long terme des chemins forestiers sur la sédimentation*. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune. <https://mffp.gouv.qc.ca/documents/forets/connaissances/sedimentation.pdf>
- Biotec. (2007). *Manuel de restauration hydromorphologique des cours d'eau*. https://www.eau-seine-normandie.fr/sites/public_file/docutheque/2017-03/01Manuel_restoration.pdf
- Bosch, J. M. et Hewlett, J. D. (1982). A review of catchment experiments to determine the effects of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, 55, 323.
- Bossé, C., Grenon, L., Lapointe, M., Lemire, P.-L. et Boivin, C. (2022). *Guide explicatif : Fiches de description et d'interprétation des séries de sols du Québec*. Institut de recherche et de développement en agroenvironnement. https://www.agrireseau.net/documents/Document_108623.pdf

- Bridges, T. S., J. K. King, J. D. Simm, M. W. Beck, G. Collins, Q. Lodder, et R. K. Mohan. (2021). *International Guidelines on Natural and Nature Based Features for Flood Risk Management*. U.S. Army Corps of Engineers. https://ewn.erdcdren.mil/?page_id=5630
- Bristol Avon Rivers Trust. (s. d.). *Flow Deflectors Project*. <https://bristolavonriverstrust.org/project-2/>
- Broadmeadow, S., Thomas, H. et Nisbet, T. (2013). *Midlands Woodlands for Water Project – Phase 1: Opportunity Mapping Final Report*. Forest Research, Environmental Agency. <https://frwordpressmedia.blob.core.windows.net/staging/2022/02/midlandsreport.pdf>
- Brookes, A. (1988). *Channelized Rivers: Perspectives for Environmental Management*. Éditions Wiley–Blackwell.
- Burgess-Gamble, L. et al. (2018). *Working with Natural Processes – Evidence Directory*. Environment Agency. https://assets.publishing.service.gov.uk/media/6036c5468fa8f5480a5386e9/Working_with_natural_processes_evidence_directory.pdf
- Butzen, V., Seeger, M., Wirtz, S., Huemann, M., Mueller, C., Casper, M. et Ries, J.B. (2014). Quantification of Hortonian overland flow generation and soil erosion in a Central European low mountain range using rainfall experiments. *Catena*, 113, 202-212.
- Cairns, S. (2020). *Cohort 2 National Project Overview*. MNAI. <https://mnai.ca/media/2020/02/MNAI-CohortSummary.pdf>
- Canards Illimités Canada (CIC). (2007). *Plan régional de conservation des milieux humides et de leurs terres hautes adjacentes : Laurentides*. https://www.ducks.ca/assets/2021/01/PRCMH_R15_LAUR_2007_portrait_texte.pdf
- Canards Illimités. (2022). *L'Inventaire canadien des milieux humides*. <https://www.canards.ca/inventaire-canadien-des-terres-humide/>
- Centre Européen de Prévention des Risques d'Inondation (CEPRI). (2022). *Guide SafN - ARTISAN Les Solutions d'adaptation fondées sur la Nature pour prévenir les risques d'inondation*. https://www.cepri.net/tl_files/Guides%20CEPRI/Guide_SafN.pdf
- Chin, A., Rohrer, D. M., Marion, D. A. et Clingenpeel, J. A. (2004). Effects of All-Terrain Vehicles on Stream Dynamics. (Rapport technique). U.S. Department of Agriculture, Forest Service. 292-296.
- Chocat, B. (2017). *Dictionnaire encyclopédique de l'hydrologie urbaine et de l'assainissement : Pour une gestion durable de l'eau et de la ville*. <http://www.graie.org/eurydice/encyclopedie/>
- City of Durham. (s. d.). *South Ellerbe Restoration Project*. <https://www.durhamnc.gov/1616/South-Ellerbe-Project>
- City of Saskatoon. (2014). *Wetland Design Guidelines*. https://www.saskatoon.ca/sites/default/files/documents/transportation-utilities/construction-design/new-neighbourhood-design/wetlands_design_guidelines.pdf
- Climate-data.org. (s. d.). *Climat Edmundston (Canada)*. <https://fr.climate-data.org/amerique-du-nord/canada/nouveau-brunswick/edmundston-10794/>
- Cohen-Shacham, E., Walters, G., Janzen, C. et Maginnis, S. (2016). *Nature-based Solutions to Address Global Societal Challenges*. IUCN. <https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/2016-036.pdf>
- Commission des services régionaux Nord-Ouest (CSRNO). (2019). *Prévisions climatiques municipales - Nord-Ouest*. <https://csrno.ca/climat/municipal/>

- Commission Européenne. (2006). *Ecoflood guidelines: How to use floodplain for flood risk reduction*. https://d3n8a8pro7vhmx.cloudfront.net/yycacres/pages/20/attachments/original/1498666598/EU__Ecoflood_Guidelines__HOW_TO_USE_FLOODPLAINS_FOR_FLOOD_RISK_REDUCTION_compressed.pdf?1498666598
- Comission Européenne. (2015). *Catalogue of Natural Water Retention Measures – Access per Sector*. <http://nwrme.eu/measures-catalogue>
- Comité de l'aménagement rural du Nord-Ouest (CARNO). (s. d.). *Portrait régional du Nord-Ouest du Nouveau-Brunswick*. [Document interne, fichier PDF].
- Comité de l'aménagement rural du Nord-Ouest (CARNO). (2017a). *Amélioration et surveillance des bassins hydrographiques désignés*. [Document interne, fichier PDF].
- Comité de l'aménagement rural du Nord-Ouest (CARNO). (2017b). *Plan de gestion visant des bassins hydrographiques désignés*. [Document interne, fichier PDF].
- Comité de l'aménagement rural du Nord-Ouest (CARNO). (2018). *Gestion durable des bassins hydrographiques désignés*. [Document interne, fichier PDF].
- Conseil de bassin du lac Saint-Augustin (CBLSA). (s. d.). *La végétalisation des rives*. <https://lacsaintaugustin.com/prevention/bandes-riveraines/limportance-des-bandes-riveraines/>
- Coulibaly, I. (s. d.). *Utilisation des terres*. [Document interne, fichier PowerBI].
- Commission des services régionaux du Nord-Ouest (CSRNO). (2021). *Géoportail – Gestion de l'environnement*. [Document interne, site web].
- CRUE Funding Initiative on Flood Risk Management Research. (2008). *Flood risk reduction by PReserving and restOring river Floodplains (PRO_Floodplain)*. http://www.crue-eranet.net/calls/final_report_pro_floodplain.pdf
- CSA Group Research. (2021). *Nature-Based Solutions for Coastal and Riverine Flood and Erosion Risk Management*. <https://www.csagroup.org/wp-content/uploads/CSA-Group-Research-Nature-Based-Solutions-for-Coastal-and-Riverine-Flood-and-Erosion-Risk-Management.pdf>
- Dekker, I., Sharifyazd, S., Evans, B. et Dubrawski, K. L. (2021). Maximizing Benefits to Nature and Society in Techno-Ecological Innovation for Water. *Sustainability*, 13(11).
- Demers S., Massé S., Buffin-Bélanger T. (2017). *Cartographie des aléas fluviaux de la rivière Coaticook : diagnostic, méthodologie et recommandations*. (Rapport remis à la MRC de Coaticook et au Ministère de la Sécurité publique du Québec). Laboratoire de géomorphologie et dynamique fluviale, Université du Québec à Rimouski.
- Depietri, Y. et McPhearson, T. (2017). Integrating the grey, green, and blue in cities: nature-based solutions for climate change adaptation and risk reduction. *Nature-Based Solutions to Climate Change Adaptation in Urban Areas*, 91-109.
- Duchesne, D., D. Kovacz et A-R. Caissy. (2013). *Cohabiter avec le castor : de la planification à l'intervention*. Organisme de bassins versants des rivières Rouge, Petite Nation et Saumon. https://belsp.uqtr.ca/id/eprint/1334/1/OBV%20des%20rivi%C3%A8res%20Rouge%2C%20Petite%20Nation%20et%20Saumon_2013_Cohabiter_castor_intervention_A.pdf
- Duncan, S. et Krawczy, T. (2018). *Keyline Water Management: Field Research & Education in the Capital Region Soil Indicators Monitoring Program*. (Rapport préparé pour BC Agriculture & Food Climate Action Initiative Farm Adaptation Innovator Program). http://crkeyline.ca/wp-content/uploads/2018/08/FI09_report_final_March2018_approved.pdf

- École nationale du génie de l'eau et de l'environnement de Strasbourg (ENGEE). (2018). *Caractériser le bassin versant pour appréhender le potentiel de la ressource et sa vulnérabilité*. <http://ressources.unit.eu/cours/engees/GEMEue2module1partie2bis/co/Forme.html>
- Ecological Society of America (ESA). (2022). *Detention basins could catch more than stormwater*. <https://www.esa.org/blog/2019/08/23/detention-basins-could-catch-more-than-stormwater/>
- EEA. (2015). *Water-retention potential of Europe's forests. A European overview to support natural water-retention measures*. (Rapport technique, numéro de référence : 13/2015). Copenhagen: European Environment Agency.
- Eggermont, H., Balian, E., Azevedo, J. M. N., Beumer, V., Brodin, T., Claudet, J., Fady, B., Grube, M., Keune, H., Lamarque, P., Reuter, K., Smith, M., van Ham, C., Weisser, W. W., et Le Roux, X. (2015). Nature-Based Solutions: New influence for environmental management and research in Europe. *GAIA*, 24(4), 243–248.
- Emmons and Olivier Resources. (2020). *Municipal Conservation of Wetlands for Flood Resiliency*. (Rapport préparé pour Ducks Unlimited Canada).
- Environment Agency. (2011). *Runoff Attenuation Features A guide for all those working in catchment Management*. https://research.ncl.ac.uk/proactive/belford/papers/Runoff_Attenuation_Features_Handbook_final.pdf
- Environment Agency. (2012). *Rural Sustainable Drainage Systems (RSuDS)*. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/291508/scho0612buwh-e.pdf
- Environment Agency. (2017). *Natural Flood Management Toolbox*. <https://catchmentbasedapproach.org/wp-content/uploads/2018/08/EA-NFM-Toolbox-Final-Draft.compressed.pdf>
- Environment Agency. (2018). *Working with Natural Processes – Evidence Directory*. https://assets.publishing.service.gov.uk/media/6036c5468fa8f5480a5386e9/Working_with_natural_processes_evidence_directory.pdf
- Environmental Protection Agency (EPA). (2009). *Stormwater Wet Pond and Wetland Management Guidebook*. <https://www3.epa.gov/npdes/pubs/pondmgmtguide.pdf>
- Environnement Canada. (2013). *Quand l'habitat est-il suffisant? Troisième édition*. Toronto, Environnement Canada.
- European Commission. (2015). *Towards an EU Research and Innovation Policy Agenda for Nature-Based Solutions & Re-naturing Cities: Final Report of the Horizon 2020 Expert Group on "Nature-Based Solutions and Re-naturing Cities"*. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/fb117980-d5aa-46df-8edc-af367cddc202>
- Evette, A., Tisserant, M. et Keita, N. (2019). Le génie végétal pour la protection des berges de cours d'eau au Québec : état des lieux et perspectives pour les Basses-terres du Saint-Laurent. *Sciences, Eaux et Territoires*, 57, 2-7.
- Fédération des propriétaires de lots boisés du Nouveau-Brunswick. (2021). *Missed Opportunities and Misplaced Priorities*. <https://www.nbwoodlotowners.ca/blog/missed-opportunities-and-misplaced-priorities>
- Fédération interdisciplinaire de l'horticulture ornementale du Québec. (2013). *Aménagement et techniques de restauration des bandes riveraines*. http://banderiveraine.org/wp-content/uploads/2013/07/FIHOQ_guide_2013_web_spread.pdf

- Fink, S., Döring, M., Franca, M. J., Martin Sanz, E., Nadyeina, O., Robinson, C., Schleiss, A. et Scheidegger, C. (2017). *Dynamique et biodiversité des zones alluviales. Dynamique du charriage et des habitats – Fiche 5*. Office fédéral de l'environnement, Berne.
- Finlayson-Pitts, B. J. et Pitts, J. N. (2000). Chemistry of the Upper and Lower Atmosphere. *Academic Press*, 15-42.
- Floyd, D. W., Ritchier, R. et Rotherham, T. (2012). *New Approaches for Private Woodlots - Reframing the Forest Policy Debate*. Gouvernement du Nouveau-Brunswick. <https://www2.gnb.ca/content/dam/gnb/Departments/nr-rn/pdf/en/ForestsCrownLands/NewApproachesForPrivateWoodlots.pdf>
- Fort, M., Bétard, F. et Fassetta, G. A. (2015). *Géomorphologie dynamique et environnement*. Éditions Armand Colin. Paris, France.
- Fortin, C., M. Laliberté et J. Ouzilleau. (2001). *Guide d'aménagement et de gestion du territoire utilisé par le castor au Québec*. Fondation de la Faune du Québec. http://fondationdelafaune.qc.ca/documents/x_guides/850_guideamenaggestionterritoirecastor.pdf
- Goff, K.M. et Gentry, R.W. (2006). The Influence of Watershed and Development Characteristics on the Cumulative Impacts of Stormwater Detention Ponds. *Water Resource Management*, 20, 829–860.
- Golnaraghi, M., Thistlethwaite, J., Henstra, D. et Stewart, C. (2020). *Flood Risk Management in Canada: Building flood resilience in a changing climate*. https://www.genevaassociation.org/sites/default/files/research-topics-document-type/pdf_public/frm_canada_web.pdf
- Gouvernement du Canada. (1980). *Soils of Madawaska County*. <https://sis.agr.gc.ca/cansis/publications/surveys/nb/nb8/index.html>
- Gouvernement du Canada (2013). *Classe de pente de relief*. https://sis.agr.gc.ca/siscan/nsdb/slc/v3.2/let/lf_slope.html
- Gouvernement du Canada. (2016). *Pollution de l'eau : érosion et sédimentation*. <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/eau-aperçu/pollution-causes-effets/erosion-sedimentation.html#dragage>
- Gouvernement du Canada. (2017). *Modèle numérique d'élévation de haute résolution (MNEHR) - Série CanÉlévation*. <https://ouvert.canada.ca/data/fr/dataset/957782bf-847c-4644-a757-e383c0057995>
- Gouvernement du Canada. (2019). *Canada's Changing Climate Report*. https://changingclimate.ca/site/assets/uploads/sites/2/2020/06/CCCR_FULLREPORT-EN-FINAL.pdf
- Gouvernement du Canada. (2021). *Vers la création d'une Agence canadienne de l'eau : mobilisation des intervenants et du public – ce que nous avons entendu*. <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/services/eau-aperçu/protéger-eau-douce/agence-canadienne-eau-mobilisation-intervenants-public-nous-avons-entendu.html>
- Gouvernement du Canada. (2022). *Cartographie des inondations*. <https://www.rncan.gc.ca/science-et-donnees/science-et-recherche/dangers-naturels/cartographie-des-inondations/24228>
- Gouvernement du Nouveau-Brunswick. (s. d.). *Guide d'interprétation du Décret de désignation du secteur protégé des bassins hydrographiques du Nouveau-Brunswick*. <https://www2.gnb.ca/content/dam/gnb/Departments/env/pdf/Water-Eau/SecteurProtegeBassinsHydrographiques.pdf>
- Gouvernement du Québec. (2005). *Techniques de stabilisation des rives - Guide des bonnes pratiques*. https://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/rives/stabilisation_rives.pdf
- Gouvernement du Québec. (2022). *Forêt Ouverte*. <https://www.foretouverte.gouv.qc.ca/>

- Greater Fundy Ecosystem Research Group. (2005). *Forest Management Guidelines to Protect Native Biodiversity in the Greater Fundy Ecosystem*. http://www2.unb.ca/fundy/documents/GFE_Guidelines.pdf
- Groupe Aster. (2020). *Plan d'adaptation aux changements climatiques pour la Ville d'Edmundston*.
- Gustafsson, M. et Von Plater, H. N. (2018). *Nature-based Solutions for Flood Risk Reduction, Contamination Control and Climate Change Adaption*. <https://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:1254673/FULLTEXT01.pdf>
- Habersack, H., B. Schober, and C. Hauer. (2015). Floodplain Evaluation Matrix (FEM): An Interdisciplinary Method for Evaluating River Floodplains in the Context of Integrated Flood Risk Management. *Natural Hazards*, 75(1), 5–32.
- Hannu, M. et Kløve, B. (2010). Managing runoff, water quality and erosion in peatland forestry by peak runoff control. *Ecological Engineering*, 36(7), 900-911.
- Hauer, C., Leitner, P., Unfer, G., Pulg, U., Habersack, H. et Graf, W. (2018). The Role of Sediment and Sediment Dynamics in the Aquatic Environment. *Riverine Ecosystem Management*, 8, 151-169.
- Hewett et al. (2020). Catchment systems engineering: An holistic approach to catchment management. *Wiley Interdisciplinary Reviews*, 7(1).
- Highways England. (2021). *Natural Flood Management Design Specification Catalogue*. <https://catchmentbasedapproach.org/wp-content/uploads/2021/03/Design-Specification-Catalogue.pdf>
- Hounsell, K. (2018, 18 mai). Les inondations au Nouveau-Brunswick pourraient coûter jusqu'à 80 millions \$. *Radio-Canada*. <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1101843/acadie-10-000-maisons-inondees-nouveau-brunswick>
- ICF. (2018). *Best Practices and Resources on Climate Resilient Natural Infrastructure*. *Canadian Council of Ministers of the Environment*. https://www.preventionweb.net/files/64196_naturalinfrastructurereporten1.pdf
- Institut Français de l'Éducation. (2014). *Les climats du globe*. <http://eduterre.ens-lyon.fr/thematiques/climat/climats-de-la-terre>
- Institut national de la recherche agronomique (INRAE). (2019). *Inondations : les outils INRAE de surveillance des crues*. <https://www.inrae.fr/actualites/inondations-outils-inrae-surveillance-crues>
- Insurance Bureau of Canada. (2018). *Combatting Canada's Flood Risks: Natural Infrastructure Is an Underutilized Option*. <http://www.ibc.ca/ab/resources/studies/natural-infrastructure-is-an-underutilized-option>
- Interagency Workgroup on Wetland Restoration. (2003). *An Introduction and User's Guide to Wetland Restoration, Creation, and Enhancement*. <https://www.csu.edu/cerc/documents/AnIntroductionandUsersGuidetoWetlandsRestoration.pdf>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2012). *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/SREX_Full_Report-1.pdf
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2022). *Climate Change 2022 Impacts, Adaptation and Vulnerability*. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_SummaryForPolicymakers.pdf

- Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES). (2019). *Le rapport de l'évaluation mondiale de la biodiversité et des services écosystémiques : résumé à l'intention des décideurs*. https://ipbes.net/sites/default/files/2020-02/ipbes_global_assessment_report_summary_for_policymakers_fr.pdf
- International Union for Conservation of Nature (IUCN). (2020). *The IUCN Global Standard for Nature-based Solutions: A User-Friendly Framework for the Verification, Design and Scaling Up of NbS*. <https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/2020-020-En.pdf>
- Iowa Department of Natural Resources. (2018). *River Restoration Toolbox*. <https://www.iowadnr.gov/Environmental-Protection/Water-Quality/River-Restoration/River-Restoration-Toolbox>
- Island Nature Trust. (s. d.). *Beneficial Management Practices for Riparian Zones in Atlantic Canada. Préparé pour Agriculture et Agroalimentaire Canada*. <https://www.gov.nl.ca/ffa/files/publications-pdf-riparian-zones.pdf>
- Joly, M., Primeau, S., Sager, M. et Bazoge, A. (2008). *Guide d'élaboration d'un plan de conservation des milieux humides*. http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/rives/Guide_plan.pdf
- Keesstra, S., Nunes, J., Novara, A., Finger, D., Avelar, D., Kalantari, Z., et Cerdà, A. (2018). The superior effect of nature based solutions in land management for enhancing ecosystem services. *Science of the Total Environment*, 610, 997-1009.
- Kennebecassis Watershed Restauration Comittee. (2020). *Riparian Restoration Toolbox For Watershed Organizations*. https://www.kennebecassisriver.org/_files/ugd/3eb1e8_74757e2e104f4f2cbff7b7fa5df0ca6a.pdf
- Labelle, T. (2022). *Estimations des volumes inondés*. [Document interne, fichier Excell].
- Lalancette, P. P. et Movila, M. (17 mars 2022). Des chemins forestiers négligés et dangereux. *Radio-Canada*. <https://ici.radio-canada.ca/recit-numerique/3783/chemins-forestiers-abandonnes-dangereux-environnement>
- Langemeyer, J., Gómez-Baggethun, E., Haase, D., Scheuer, S. et Elmqvist, T. (2016). Bridging the gap between ecosystem service assessments and land-use planning through Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA). *Environmental Science & Policy*, 62, 45-56.
- Lavoie, M. (2018). *Guide sur la saine gestion du castor par la protection des ponceaux*. Fédération des Trappeurs Gestionnaires du Québec. https://ftgq.qc.ca/wp-content/uploads/2020/04/FTGQ_guide_castor.pdf
- Le Lay, Y.-F. (2004). Y a-t-il une place pour le bois dans la rivière aménagée? La rivière aménagée : entre héritages et modernité. *Revue Aesturia*, 7, 437-458.
- Limnotech. (2022). *A Green Build-Out Model To Quantify Green Infrastructure Stormwater Benefits*. <https://www.limno.com/portfolio-posts/a-green-build-out-model-to-quantify-green-infrastructure-stormwater-benefits/>
- Loi sur les espèces en péril*, LRN-B. 2012, c. 6.
- Loi sur les espèces menacées d'extinction*, LN-B. 1996, c. E-9.101.
- Malavoi, J.-R. et Adam, P. (2007). Les interventions humaines et leurs impacts hydromorphologiques sur les cours d'eau. *Ingénieries*, 50, 35-48.

- McGrath, D., Munroe, R. et Henry, G. (2019). *Ontario Landscape Tree Planting Guide*. Landscape Ontario Horticultural Trades Association. https://landscapeontario.com/assets/1570803523.Ontario_Landscape_Tree_Planting_Guide-2019_updated.pdf
- MEM. (2002). *Retention Basin. Chapter 7, Best Management Practices*. Aggregate Operators Best Management Handbook for British Columbia. https://sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/Retention%20Basin.pdf
- Miguez, M. G. et Veról, A. P. (2016). A catchment scale Integrated Flood Resilience Index to support decision making in urban flood control design. *Urban Analytics and City Science*, 44(5).
- Milan, D. J. et Schwendel, A. C. (2021). Climate-change driven increased flood magnitudes and frequency in the British uplands: Geomorphologically informed scientific underpinning for upland flood-risk management. *Earth Surface Processes and Landforms*, 46(15), 3026–3044.
- Millison, A. (2020). *Permaculture Design: Tools for Climate Resilience*. Oregon State University. <https://open.oregonstate.edu/permaculturedesign/>
- Ministère de l'Environnement du Nouveau-Brunswick. (2012). *Directives techniques de la modification des cours d'eau et des terres humides*. <https://www2.gnb.ca/content/dam/gnb/Departments/env/pdf/Water-Eau/DirectivesTechniquesModificationCoursDeauTerresHumides.pdf>
- Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC). (s. d.). *Écologie et territoire*. <https://www.environnement.gouv.qc.ca/biodiversite/cadre-ecologique/index.htm#:~:text=La%20connectivit%C3%A9%20%C3%A9cologique%20est%20d%C3%A9finie,et%20de%20leurs%20fonctions%20%C3%A9cologiques>.
- Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC). (2014). *Fiche d'identification et délimitation des milieux hydriques*. <https://www.environnement.gouv.qc.ca/Eau/rives/delimitation.pdf>
- Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC). (2018). *Stratégie québécoise de l'eau 2018-2030*. <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/eau/strategie-quebecoise>
- Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC). (2021). *Guide d'élaboration d'un projet de restauration ou de création de milieux humides et hydriques*. <https://environnement.gouv.qc.ca/eau/milieux-humides/guide-elaboration-projet-restauration-creation-milieux-humideshydriques.pdf>.
- Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC). (2022). *Gestion intégrée des ressources en eau par bassin versant*. <https://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/bassinversant/gire-bassins-versants.htm#:~:text=Appliqu%C3%A9%20aux%20eaux%20de%20surface,un%20lac%20ou%20une%20baie>.
- Ministère de l'Environnement et des Gouvernements locaux (MEGL). (2012). *Base de données historiques sur les inondations*. <https://www.elgegl.gnb.ca/0001/fr/Maison/Principal>
- Ministère de l'Environnement et des Gouvernements locaux (MEGL). (2018). *Une stratégie de l'eau pour le Nouveau-Brunswick 2018-2028*. Gouvernement du Nouveau-Brunswick. <https://www2.gnb.ca/content/dam/gnb/Departments/env/pdf/Water-Eau/WaterStrategy-StrategieSurLeau/Strategiedeeau-2018-2028.pdf>
- Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs. (MFFP). (2017). *Atlas des contraintes à l'aménagement forestier liées au milieu physique de la région administrative Bas-Saint-Laurent*.

- Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs. (MFFP). (2018). *Sommaire du plan d'aménagement forestier intégré tactique 2018-2023 : Région du Bas-Saint-Laurent Unité d'aménagement 011-71*. <https://numerique.banq.qc.ca/patrimoine/details/52327/3429802>
- Ministère des Ressources Naturelles du Nouveau-Brunswick. (2007). *Notre patrimoine du paysage : l'histoire de la classification écologique des terres du Nouveau-Brunswick*. <https://www2.gnb.ca/content/dam/gnb/Departments/nr-rn/pdf/fr/ForetsEtTerresDeLaCouronne/ZonesProtegees/notre-patrimoine-du-paysage.pdf>
- Ministère des Transports du Nouveau-Brunswick. (2010). *Manuel de gestion de l'environnement*. <https://www2.gnb.ca/content/dam/gnb/Departments/trans/pdf/fr/routeautoroute/ManuelGestionLenvir onnement.pdf>
- Monast Robineau, P. (2007) *Évaluation environnementale et économique de la méthode du tiers inférieur pour l'entretien des fossés routiers*. Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Sherbrooke.
- Montoroi, J.-P. (2012). *Rôle des sols sur la genèse des inondations*. Publications du symposium européen sur les problèmes actuels de la protection contre les inondations de mars 2012, Bondy, France. http://www.donnees.centre.developpement-durable.gouv.fr/symposium/expose/ST1-1_fra.pdf
- Moudrak, N. et al. (2018). *Combating Canada's Rising Flood Costs: Natural Infrastructure Is an Underutilized Option*. Intact Centre on Climate Adaptation, University of Waterloo, Waterloo. <http://assets.abc.ca/Documents/Resources/IBC-Natural-Infrastructure-Report-2018.pdf>
- Moudrak, N., Hutter, A.M. et Feltmate, B. (2017). *When the Big Storms Hit: The Role of Wetlands to Limit Urban and Rural Flood Damage*. (Rapport préparé pour Ontario Ministry of Natural Resources and Forestry). Intact Centre on Climate Adaptation University of Waterloo. <https://www.intactcentre climateadaptation.ca/wp-content/uploads/2017/07/When-the-Big-Storms-Hit.pdf>
- Mubeen, A., Ruangpan, L., Vojinovic, Z., Sanchez Torrez, A. et Plavšić, J. (2021). Planning and Suitability Assessment of Large-scale Nature-based Solutions for Flood-risk Reduction. *Water Resources Management*, 35.
- National Council for Air and Stream Improvement (NCASI). (2009). Effects of Forest Management on Water Resources in Canada: A Research Review. <https://www.ncasi.org/wp-content/uploads/2019/02/tb969.pdf>
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (2021). *Green Infrastructure Mapping Guide*. <https://coast.noaa.gov/greeninfrastructureguide/>
- National Risk Management Research Laboratory. (2004). *Stormwater Best Management Practice Design Guide. Volume 3 – Basin Best Management Practices*. <https://www.onestl.org/media/site/documents/practices/RetentionDetention/Stormwater%20Management%20Best%20Practices.pdf>
- National Water Retention Measures (NWRM). (2015). *Catalogue of NWRM – Access per sector*. <http://nwrn.eu/measures-catalogue>
- Nature Conservancy Canada. (2018). *New England–Acadian Forest Restoration - A Landowner's Guide to Theory and Practice*. https://www.nswooa.ca/uploads/5/9/6/9/59690537/new_england_-_acadian_forest_restoration.pdf
- Nesshover, C., Assmuth, T., Irvine, K. N., Rusch, G. M., Waylen, K. M., Delbaere, B., Haase, D., Jones-Walters, L., Keune, H., Kovacs, S., Krauze, K., Kulvik, M., Rey, F., Dijk, J. V., Vistad, O. I, Wilkinson, M. E. et Wittmer, H. (2017). The science, policy and practice of nature-based solutions: an interdisciplinary perspective. *Science of the Total Environment*, 579, 1215-1227.

- Nisbet, T. (2005). *Water use by tree*. Forestry Commission. <https://melbreakcommunities.files.wordpress.com/2012/02/water-use-by-trees.pdf>
- Nussey, P. et Noseworthy, J. (2020). *Évaluation des zones lotiques actives dans la région canadienne des Appalaches nordiques et de l'Acadie*. Bureau régional pour le Canada Atlantique. Fredericton, Nouveau-Brunswick.
- Office international de l'eau (OiEau). (2019). *Glossaire eau, milieux marins et biodiversité*. <https://glossaire.eauetbiodiversite.fr/>
- Office québécois de la langue française. (2012). *Grand dictionnaire terminologique (GDT)*. <https://gdt.oqlf.gouv.qc.ca/index.aspx>
- O'Neil, S. (2018). *Municipal National Assets Initiative: Results from the First National Cohort*. MNAI. <https://institut.intelliprosperite.ca/sites/default/files/spmnaijuly25-summaryweb.pdf>
- O'Neill, S. et Cairns, S. (2017). *Defining and Scoping Municipal Natural Assets*. MNAI. <https://mnai.ca/media/2018/02/finaldesignedsept18mnai.pdf>
- Ontario Ministry of Environment. (2003). *Stormwater Management Planning and Design Manual*. <https://dr6j45jk9xcmk.cloudfront.net/documents/1757/195-stormwater-planning-and-design-en.pdf>
- Ontario Ministry of Natural Resources. (2001). *Understanding Natural Hazards*. <https://www.scrca.on.ca/wp-content/uploads/2018/09/MNR-Understanding-Natural-Hazards.pdf>
- Ontario Ministry of Natural Resources and Watershed Science Centre. (2001). *Adaptive Management of Stream Corridors in Ontario*. Trent University, Watershed Science Centre.
- Organisation des Nations Unies (ONU). (2019). *Bilan mondial sur la réduction des risques de catastrophe*. file:///C:/Users/user1/Downloads/GAR19%20MR_FR_Web.pdf
- Organisme de bassin versant du fleuve Saint-Jean (OBV Saint-Jean). (2016). *Plan directeur de l'eau du bassin versant du fleuve Saint-Jean*. https://obvfleuvestjean.com/wp-content/uploads/2016/11/OBVFSJ_PDE.pdf
- Organisme de bassin versant du fleuve Saint-Jean (OBV Saint-Jean). (2018). *Cahier de planification intégrée pour l'omble de fontaine dans le bassin versant à la Truite*. https://obvfleuvestjean.com/wp-content/uploads/2020/01/CPI_A_la_Truite.pdf
- Ouranos. (2015). *Vers l'adaptation : Synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec*. <https://www.ouranos.ca/wp-content/uploads/SynthesePartie1.pdf>
- Ouranos. (2017). *Le rôle important des milieux humides dans l'adaptation aux changements climatiques*. <https://www.ouranos.ca/role-milieux-humides/>
- Ouranos. (2018). *Les inondations dans un contexte de changements climatiques*. <https://www.ouranos.ca/wp-content/uploads/FicheAvisInondation2018-Fr.pdf>
- Ouranos. (2020). *Réduire la vulnérabilité aux inondations et à l'érosion associées aux changements climatiques pour des communautés riveraines du tronçon fluvial du Saint-Laurent*. (Rapport technique). <https://www.ouranos.ca/wp-content/uploads/RapportRondeau-Genesse2020.pdf>
- Ouranos. (2021). *Guide méthodologique d'analyse coûts-avantages des options d'adaptation aux inondations et aléas fluviaux en contexte de changements climatiques*. (Rapport présenté à Ressources naturelles Canada). <http://www.bv.transports.gouv.qc.ca/mono/1279339.pdf>

- Paquette, A. (2016). *Repenser le reboisement : Guide stratégique pour l'augmentation de la canopée et de la résilience de la forêt urbaine de la région métropolitaine de Montréal*. Comité de reboisement de la CMM. <https://www.biopolis.ca/wp-content/uploads/2016/10/Repenser-le-reboisement.pdf>
- Pépin, A.-C. (2005). *Les lots boisés privés : Bilan de la situation actuelle dans le nord-ouest du Nouveau-Brunswick*. (Rapport préparé pour la Table de concertation pour l'aménagement durable des boisés privés du Nord-Ouest). <https://www.umoncton.ca/umce-foresterie/files/umce-foresterie/wf/wf/pdf/bilan.pdf>
- Plamondon, A. P. (2004). *La récolte forestière et les débits de pointe : état des connaissances sur la prévision des augmentations des pointes, le concept de l'aire équivalente de coupe acceptable et les taux régressifs des effets de la coupe sur les débits de pointe*. Université Laval.
- Québec Vert. (s. d.). *Recherche de plantes recommandées pour la végétalisation des bandes riveraines du Québec*. <http://vegetaux.fihq.com/>
- Raymond, C. M., Berry, P., Breil, M., Nita, M. R., Kabisch, N., de Bel, M., Enzi, V., Frantzeskaki, N., Geneletti, D., Cardinaletti, M., Lovinger, L., Basnou, C., Monteiro, A., Robrecht, H., Sgrigna, G., Muhari, L. et Calfapietra, C. (2017). *An Impact Evaluation Framework to Support Planning and Evaluation of Nature-Based Solutions Projects*. (Rapport préparé par EKLIPSE). http://www.eclipse-mechanism.eu/apps/Eclipse_data/website/EKLIPSE_Report1-NBS_FINAL_Complete-08022017_LowRes_4Web.pdf
- Regroupement des organismes de bassins versants du Québec (ROBVQ). (2019). *La gestion intégrée de l'eau par bassin versant – GIEBV*. <https://robvq.qc.ca/la-giebv/>
- Reid, D. et Church, M. (2015). Geomorphic and ecological consequences of riprap placement in river systems, *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 51(4), 1043-1059.
- Réseau Environnement. (2014). *Guide de gestion des eaux pluviales*. (Préparé pour le ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (MDDEFP) et le ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire (MAMROT). <https://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/pluviales/guide-gestion-eaux-pluviales.pdf>
- Ruangpan L. et al. (2020). Incorporating stakeholders' preferences into a multi-criteria framework for planning large-scale Nature-Based Solutions. *Ambio*, 50. 1514–1531.
- Plamondon, A. P. (2004). *La récolte forestière et les débits de pointe : état des connaissances sur la prévision des augmentations des pointes, le concept de l'aire équivalente de coupe acceptable et les taux régressifs des effets de la coupe sur les débits de pointe*. (Préparé pour le ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs). Québec, Université Laval.
- Québec Vert. (s. d.). *Recherche de plantes recommandées pour la végétalisation des bandes riveraines du Québec*. <http://vegetaux.fihq.com/>
- SAGE Rance Frémur Baie de Beausais. (s. d.). *Lexique*. <http://www.sagerancefremur.com/lexique.html>
- Sayers P., Galloway, G., Penning-Rowsell, E., Shen, F., Wen, K. (2015). Strategic Flood Management: Ten 'Golden Rules' to Guide a Sound Approach. *International Journal of River Basin Management*, 13(2), 137-151.
- Sayers, P. Galloway, Y. L.i, G., Penning-Rowsell, E., Shen, F., Yuanyuan, L., Kang, W., Yiwei, C., et T. Le Quesne. (2013). *Flood Risk Management: A Strategic Approach*. UNESCO. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000220870>

- Scarwell, H.-J. et Laganier, R. (2004). *Risque d'inondation et aménagement durable des territoires*. Villeneuve d'Ascq : Presses universitaires du Septentrion.
- Scottish Environment Protection Agency (SEPA). (2001). *Conceptual Design Guideline - Application of Engineered Logjams*. https://www.therrc.co.uk/pdf/reports/Application_of_Engineered_Logjams.pdf
- Scottish Environment Protection Agency (SEPA). (2015). *Natural Flood Management Handbook*. <https://www.sepa.org.uk/media/163560/sepa-natural-flood-management-handbook1.pdf>
- Service Nouveau Brunswick (SNB). (2022). *Inondations au Nouveau-Brunswick – Carte des zones inondables du Nouveau-Brunswick*. <https://inondations-flooding-geonb.hub.arcgis.com/apps/cartes-des-zones-inondables-du-nouveau-brunswick>
- Simpson, J. (2015). *Restoring the Acadian Forest*. 2ème édition. Nimbus Publishing.
- Soar, P. J. et Thorne, C. R. (2001). *Channel Restoration Design for Meandering Rivers*. US Army Corps of Engineers: Research and Development Center. <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA396990.pdf>
- Société d'aménagement de la rivière Madawaska. (2021). *Rapport d'activités 2020-2021*. [Document interne , fichier PDF].
- Statistique Canada. (2016). *Profil du recensement, Recensement de 2016, Edmundston*. <https://www12.statcan.gc.ca/census-recensement/2016/dp-pd/prof/details/page.cfm?Lang=F&Geo1=CSD&Code1=1313027&Geo2=CD&Code2=1313&Data=Count&SearchText=Edmundston&SearchType=Begin&SearchPR=01&B1=All&TABID=1>
- Stępień, E., Zawal, A., Buczyński, P., Buczyńska, E. et Szenejko, M. (2016). Effects of dredging on the vegetation in a small lowland river. *PeerJ*, 7(e6282).
- Svedarsky, D., Bruggman, J., Ellis-Felege, S., Grosshans, R., Lane, V., Norrgard, R., Knutsen, G., Clarke, R., Ripplinger, D., Ostlund, A., Lewis, J., Granfors, J. et Brenny, T. (2016). *Cattail Management in the Northern Great Plains: Implication for Wetland Wildlife and Bioenergy Harvest*. Northwest Research and Outreach Center. <https://www.crk.umn.edu/sites/crk.umn.edu/files/cattail-management-northern-great-plains.pdf>
- Swansburg, E., El-Jabi, N. et Caissie, D. (2004). *Climate change in New Brunswick (Canada): statistical downscaling of local temperature, precipitation, and river discharge*. Department of Fisheries and Oceans. https://publications.gc.ca/collections/collection_2012/mpo-dfo/Fs97-6-2544-eng.pdf
- Terrier, A., Girardin, M.P., Périe, C., Legendre, P. et Bergeron, Y. (2013). Potential changes in forest composition could reduce impacts of climate change on boreal wildfires. *Ecological Applications*, 23(1), 21–35.
- Tiner RW. (2012). *Defining hydrophytes for wetland identification and delineation*. Cold Regions Research and Engineering Laboratory. <https://erdc-library.erdc.dren.mil/jspui/bitstream/11681/2580/1/ERDC-CRREL-CR-12-1.pdf>
- Thomas, H. et Nisbet, T.R. (2012). Modelling the hydraulic impact of reintroducing large woody debris into watercourses. *Journal of Flood Risk Management*, 5, 164–174.
- Thorslund, J., Jarsjo, J., Jaramillo, F., Jawitz, J.W., Manzoni, S., Basu, N.B., Chalov, S.R., Cohen, M.J., Creed, I.F. et Goldenberg, R. (2017). Wetlands as large-scale nature-based solutions: Status and challenges for research, engineering and management. *Ecological Engineering*, 108, 489–497.
- TreeCanada. (s. d.). *A Guide to Community Tree Planting and Care*. <https://treecanada.ca/wp-content/uploads/2017/10/Guide-2-EN-tree-planting-and-care.pdf>

- Tremblay, G. (2010). *Caractérisation des paramètres de l'habitat du castor qui favorisent l'utilisation des ponceaux comme site de construction de barrage*. (Mémoire de maîtrise). Université du Québec en Abitibi Témiscamingue, QC, Canada.
- UNaLab. (2020). *Nature-Based Solutions – Technical Handbook*. <https://unalab.eu/system/files/2020-02/unalab-technical-handbook-nature-based-solutions2020-02-17.pdf>
- Unger, I. M., Kennedy, A. C. et Muzika, R. M. (2009) Flooding effects on soil microbial communities. *Applied Soil Ecology*, 42(1), 1–8.
- Union internationale pour la conservation de la nature (UICN). (2016). *Motion 77 : définition des Solutions fondées sur la Nature*. <https://portals.iucn.org/congress/fr/motion/077>
- Union internationale pour la conservation de la nature (UICN). (2019). *Les Solutions fondées sur la Nature pour les risques liés à l'eau en France*. <https://uicn.fr/wp-content/uploads/2020/01/sfn-light-ok.pdf>
- Union International pour la Conservation de la Nature (UICN). (2020). *Standard mondial de l'UICN pour les solutions fondées sur la nature*. <https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/2020-020-Fr.pdf>
- United Nations Environment (UN Environment). (2018). *Nature-Based Solutions for Water Management*. <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/32058/NBSW.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR). (2021). *Nature-based solutions for disaster risk reduction*. <https://www.undrr.org/publication/words-action-nature-basedsolutions-disaster-risk-reduction>.
- University of Minnesota. (2014). *Field Guide for Maintaining Rural Roadside Ditches. Protecting Lakes and Streams through Proper Ditch Maintenance*. https://www.lakesuperiorstreams.org/stormwater/toolkit/contractor/resources/DitchGuide_SeaGrant.pdf
- Urák, I., Hartel, T., Gallé, R. et Balog, A. (2017). Worldwide peatland degradations and the related carbon dioxide emissions: the importance of policy regulations, *Environmental Science and Policy*, 69. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1462901116309406>
- USDA Forest Service. (2002). A Soil Bioengineering Guide for Streambank and Lakeshore Stabilization. Dans *Soil Bioengineering Techniques* (p. 74-131).
- Vecchio, Y. (2010). *Retour d'expériences de restauration d'annexes hydrauliques dans le bassin Rhin-Meuse*. Office national de l'eau et des milieux aquatiques. <http://cdi.eau-rhin-meuse.fr/GEIDFile/fichier.pdf?Archive=299305701758>
- Ville de Québec. (2012). *Guide d'aménagement des bassins de rétention des eaux pluviales*. https://glsicities.org/wp-content/uploads/2015/07/Quebec-guide_aménagement_bassins.pdf
- Virginia Department of Forestry. (2011). *Best Management Practices for Water Quality – Technical Manual*. https://dof.virginia.gov/wp-content/uploads/VAs-Forestry-BMP-Technical-Guide_pub.pdf
- Walton, M., Jansens, J. W., Adams, J., Tatro, M. et Gadzia, T. E. (2019). *Applying Keyline Design Principles to Slope Wetland Restoration in a Headwater Ecosystem*. New Mexico Environment Department, Surface Water Quality Bureau Wetlands Program (NMED-SWQB).
- Westbrook, C. et al. (2006). Beaver dams and overbank floods influence groundwater–surface water interactions of a Rocky Mountain riparian area. *Water Resources Research*, 44(6).
- Wheaton J.M., Bennett S.N., Bouwes, N., Maestas J.D. and Shahverdian S.M. (2019). *Low-Tech Process-Based Restoration of Riverscapes: Design Manual*. Utah State University Restoration Consortium.

- Wilson, S. (2019). *Advancing and Integrating Municipal Natural Asset Management through Asset Management Planning in Ontario*. MNAI. https://mnai.ca/media/2020/01/MNAI_MNAPOntario.pdf
- Winkler, R. D. et Moore, R. D. (2006). Variability in snow accumulation patterns within forest stands on the interior plateau of British Columbia, Canada. *Hydrological Process*, 20, 683–3695.
- Winkler, R. D., Moore, R. D., Redding, T. D., Spittlehouse, D. L., Smerdon, B. D. et Carlyle-Moses, D. E. (2010). *Compendium of Forest Hydrology and Geomorphology in British Columbia*. BC Ministry of Forests and Range.
- Wohl et al. (2016). Management of Large Wood in Streams: An overview and Proposed Framework for Hazard Evaluation. *Journal of the American Water Resources Association*, 52(2), 315-335.
- World Wildlife (WWF). (2016). *Flood planner: a manual for the natural management of river floods*. http://assets.wwf.org.uk/downloads/floodplanner_web.pdf
- World Wildlife (WWF). (2017). *Natural and Nature-Based Flood Management: A Green Guide*. <https://www.worldwildlife.org/publications/natural-and-nature-based-flood-management-a-green-guide>
- World Wildlife (WWF). (2020). *Évaluer les vulnérabilités climatiques dans le nord-ouest du Nouveau-Brunswick*. <https://wwf.ca/wp-content/uploads/2020/05/Vuln%C3%A9rabilit%C3%A9s-aux-changements-climatiques.pdf>
- Yeomans P. A. (1958). *The Challenge of Landscape: the development and practice of keyline*. Keyline Publishing Pty. Ltd.
- Yochum, S. E. (2018). *Guidance for Stream Restoration*. (Rapport préparé pour U.S. Department of Agriculture, Forest Service, National Stream & Aquatic Ecology Center). <https://www.fs.fed.us/biology/nsaec/assets/yochumusfs-nsaec-tn102-4guidancestreamrestoration.pdf>
- Zachary, H. B., Ken, D. B., & Terry, J. W. (2003). Effects of flow regulation on shallow-water habitat dynamics and floodplain connectivity. *Transactions of the American Fisheries Society*, 132, 809-823.
- Zeco Inc. (2004). *Problématiques et pistes de solution du régime forestier québécois*. (Rapport réparé pour la Commission d'étude sur la gestion de la forêt publique québécoise). https://www.bibliotheque.assnat.qc.ca/DepotNumerique_v2/AffichageFichier.aspx?idf=10239
- Zemke, J. J. (2016). Runoff and Soil Erosion Assessment on Forest Roads Using a Small Scale Rainfall Simulator. *Hydrology*, 3(25).

BIBLIOGRAPHIE

- Agence française pour la biodiversité. (2010). *Le recueil d'expériences sur l'hydromorphologie. La reconexion des annexes hydrauliques*. https://professionnels.ofb.fr/sites/default/files/pdf/R ecueilHydro_23-intro-reconnexion_vbat.pdf
- Angelos, A., Mylopoulos, N., Loukas, A. et Gaitanaros, D. (2018). An Integrated Multicriteria Analysis Tool for Evaluating Water Resource Management Strategies. *Water*, 10(12).
- Antolini, F., et Tate, E. (2021). Location Matters: A Framework to Investigate the Spatial Characteristics of Distributed Flood Attenuation. *Water*, 13(19).
- ArcGIS. (2021). *Utilisation du modèle conceptuel pour créer une carte d'aptitude*. <https://desktop.arcgis.com/fr/arcmap/latest/extensions/spatial-analyst/solving-problems/using-the-conceptual-model-to-create-suitability.htm>
- Garneau, V. et al. (2012). *Projet de gestion du castor dans la réserve faunique des Laurentides, rapport (phase 1)*. Fédération des trappeurs gestionnaires du Québec. https://ftgq.qc.ca/wp-content/uploads/2020/04/2012-Gestion-du-castor_RFL_Phase_1.pdf
- Gordon et al. (2020). Nutrient Retention in Ecologically Functional Floodplains: A Review. *Water*, 12(20).
- Gouvernement du Nouveau-Brunswick. (s. d.). *GéoNB : Catalogue de données*. <http://www.snb.ca/geonb1/f/dc/catalogue-F.asp>
- Gouvernement du Nouveau-Brunswick. (2014). *Stratégie de réduction des risques d'inondation du Nouveau-Brunswick*. <https://www2.gnb.ca/content/dam/gnb/Departments/env/pdf/Flooding-Inondations/StrategieDeReductionDesRisquesDinondationDuNB.pdf>
- Gouvernement du Nouveau-Brunswick. (2017). *A Water Strategy for New-Brunswick : 2018-2028*. <https://www2.gnb.ca/content/dam/gnb/Departments/env/pdf/Water-Eau/strategie-de-leau.pdf>
- Jakubínský, J., Prokopová, M., Raška, P., Salvati, L., Bezak, N., Cudlín, O., Cudlín, P. et al. (2021). Managing Floodplains Using Nature-Based Solutions to Support Multiple Ecosystem Functions and Services. *WIRE's Water*, 8(5).
- Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP). (2015). *Stratégie d'aménagement durable des forêts*. <https://mffp.gouv.qc.ca/publications/forets/amenagement/strategie-amenagement-durable-forets.pdf>
- Organisme de bassin versant du fleuve Saint-Jean (OBV Saint-Jean). (2022). *Première nation Malécite et Wolastoq (Belle-rivière)*. <https://obvfleuvestjean.com/premiere-nation-malecite/>
- Ouranos. (2018). *Les inondations dans un contexte de changements climatiques*. <https://www.ouranos.ca/wp-content/uploads/FicheAvisInondation2018-Fr.pdf>
- Regroupement des organismes de bassins versants du Québec (ROBVQ). (2019). *La gestion intégrée de l'eau par bassin versant – GIEBV*. <https://robvq.qc.ca/la-giebv/>
- Service Nouveau Brunswick (SNB). (2022). *Inondations au Nouveau-Brunswick – Carte des zones inondables du Nouveau-Brunswick*. <https://inondations-flooding-geonb.hub.arcgis.com/apps/cartes-des-zones-inondables-du-nouveau-brunswick>
- The River Restoration Centre. (2014). *Why Restore?*. <https://www.therrc.co.uk/why-restore>

- Turkelboom, F., Demeyer, R., Vranken, L., De Becker, P., Raymaekers, F. et De Smet, L. (2021). How does a nature-based solution for flood control compare to a technical solution? Case study evidence from Belgium. *Ambio*, 50(8), 1431–45.
- Union Internationale pour la Conservation de la Nature (UICN). (2016). *Les solutions fondées sur la nature*. <https://uicn.fr/solutions-fondees-sur-la-nature/>
- United Nations Environment Programme (UNEP). (2018). *Nature-Based Solutions for Water Management*. <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/32058/NBSW.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Wohl et al. (2018). River beads as a conceptual framework for building carbon storage and resilience to extreme climate events into river management. *Biogeochemistry*, 141, 365–383.

ANNEXE 1 VISITE SUR LE TERRAIN – 7 JUIN 2022



Chemin inondé suite à l'affaissement de ponceaux (47.45717, -68.50142)



Chemin inondé suite à l'affaissement de ponceaux (47.45717, -68.50142)



Fossé dénudé et peu profond (47.40102, -68.42608)



Passage à gué sur un chemin (47.46521, -68.51857)



Banc de sédimentation problématique près du pont sur le boulevard Isidore-Boucher (47.42569, -68.38308)



Banc de sédimentation problématique près du pont de la rue Demers (47.41880, -68.39196)



Ponceau partiellement bloqué par les débris d'un barrage de castor à proximité, causant une inondation du chemin (47.41537, -68.51985)



Inondation d'un chemin, causé par un ponceau partiellement bloqué par les débris d'un barrage de castor à proximité (47.41537, -68.51985)

ANNEXE 2 MATRICE D'ÉVALUATION DES INDICATEURS

		REMÉANDRAGE	RESTAURATION D'ANNEXES	AMÉNAGEMENT DES ZONES D'EXPANSION DE	RESTAURATION / CRÉATION DE MILIEUX	BASSIN SEC	BASSIN DE RÉTENTION	AMÉNAGEMENT DE DEBRIS LIGNEUX	PRÉBARRAGES	FOSSÉS VÉGÉTALISÉS	BERMES FILTRANTES	BASSIN DE SÉDIMENTATION	REBOISEMENT EN ZONE AMONT / MOYENNE	REBOISEMENT EN PLAINES ALLUVIALES	BANDES TAMPONS	FASCINES
BÉNÉFICES DIRECTS POUR LA GIRI	Réduction du ruissellement	1	2	3	3	2	2	2	0	2	3	2	4	4	4	3
	Augmentation du coefficient de rugosité des terres	0	1	0	2	2	0	0	0	2	3	2	5	4	4	3
	Création d'obstacles pour la déviation du ruissellement	1	2	3	3	2	2	2	0	0	3	2	3	3	3	2
	Réduction du débit de pointe	4	5	5	4	3	4	3	3	2	2	2	2	3	2	2
	Augmentation de la rugosité hydraulique	5	5	5	3	2	3	4	3	2	3	2	2	3	3	2
	Contribution au stockage temporaire d'une partie du volume de la crue	3	4	5	4	3	5	2	2	0	1	2	1	2	1	1
	Augmentation de l'infiltration	2	2	4	3	3	4	2	2	3	2	2	4	3	2	1
	Augmentation de la porosité et de la perméabilité des sols	0	0	3	2	1	2	0	0	3	1	1	5	4	2	0
	Contribution au stockage de l'eau en surface	2	2	5	4	4	5	2	2	3	2	3	3	2	1	1
	Augmentation de la capacité de rétention hydrique	3	5	4	4	3	5	3	3	1	2	2	1	2	2	0
	Création de zones de stockage de l'eau sur le territoire	3	5	3	4	3	5	3	3	1	2	2	1	1	1	0
	Augmentation de la connectivité hydrologique latérale	3	4	5	4	2	4	2	2	1	1	2	0	2	2	0
	Augmentation de l'évapotranspiration	2	2	3	2	2	3	1	1	1	1	1	4	3	1	0
	Augmentation de l'évaporation de surface	2	2	3	2	2	3	1	1	0	1	1	3	2	0	0
	Augmentation de la transpiration par les végétaux	0	0	0	1	1	2	0	0	1	0	0	5	4	1	0
	Contrôle des sédiments et de l'érosion	4	3	4	3	2	3	4	2	3	4	4	4	4	5	4
	Réduction de la quantité de sédiments dans les cours d'eau	3	2	5	4	3	4	4	3	5	5	5	4	4	5	3
	Réduction de l'érosion des rives	4	4	5	2	1	3	3	2	2	2	3	2	3	5	5
	Réduction de l'érosion des terres adjacentes au cours d'eau	0	0	2	0	2	2	0	1	3	4	3	5	5	4	3
	MOYENNE	3	3	4	3	2	3	2	2	2	2	2	3	3	2	1

		REMÉANDRAGE	RESTAURATION D'ANNEXES	AMÉNAGEMENT DES ZONES D'EXPANSION DE	RESTAURATION / CRÉATION DE MILIEUX	BASSIN SEC	BASSIN DE RÉTENTION	AMÉNAGEMENT DE DÉBRIS LIGNEUX	PRÉBARRAGES	FOSSÉS VÉGÉTALISÉS	BERMES FILTRANTES	BASSIN DE SÉDIMENTATION	REBOISEMENT EN ZONE AMONT / MOYENNE	REBOISEMENT EN PLAINES ALLUVIALES	BANDES TAMPONS	FASCINES
CO-BÉNÉFICES - ENVIRONNEMENT	Réduction des risques de sécheresse	3	2	4	5	2	4	2	1	1	1	1	3	2	2	1
	Augmentation du taux d'humidité des sols	3	3	5	4	2	4	2	1	1	1	1	5	3	2	1
	Augmentation des niveaux d'eau durant les périodes d'étiage	2	1	2	5	0	4	1	0	0	0	0	1	1	1	0
	Amélioration de la qualité de l'eau	2	1	3	4	1	2	2	2	2	3	4	3	2	4	2
	Réduction du taux de matières en suspension dans les cours d'eau	2	2	4	4	3	4	3	2	3	4	5	4	3	4	3
	Réduction du taux de pollution organique dans les cours d'eau	0	0	3	5	2	3	1	1	2	2	2	3	3	5	2
	Réduction du taux de métaux lourds dans les cours d'eau	0	0	1	2	1	2	0	0	1	0	0	1	2	2	0
	Modération des écarts de température des cours d'eau	1	-1	0	0	-2	-1	0	0	0	0	0	0	1	5	1
	Amélioration des nappes phréatiques	2	2	3	4	1	3	2	2	1	2	2	4	3	2	1
	Contribution à la recharge de la nappe phréatique (quantité)	2	2	3	3	2	4	3	2	1	2	2	4	2	1	1
	Réduction du transfert des polluants vers la nappe phréatique (qualité)	1	1	2	5	-1	2	1	2	1	2	2	3	3	3	0
	Augmentation de la capacité de stockage du carbone	1	1	3	5	1	1	1	3	1	0	-1	5	3	1	0
	Augmentation du taux de matière organique dans la couche supérieure des sols	0	0	4	4	1	1	1	1	1	0	-1	4	3	1	0
	Augmentation des peuplements forestiers	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	3	1	0
	Augmentation des milieux humides	1	1	1	5	0	0	1	4	0	0	0	0	0	0	0
	Renforcement de la connectivité écologique	4	4	5	4	2	3	1	1	2	0	2	4	5	5	2
	Création de corridors écologiques (milieux terrestres, aquatiques et/ou riverains)	4	4	5	4	2	3	1	1	2	0	1	4	5	5	2
	Création de zones tampons	0	0	4	3	0	2	0	0	2	0	2	3	4	5	2
	Création d'habitats fauniques et floristiques	4	5	4	4	1	3	2	3	1	1	1	5	4	4	2
	Création de nouveaux habitats terrestres, aquatiques et/ou riverains	4	5	4	4	1	4	2	2	1	1	1	4	4	3	2
	Augmentation de la superficie d'habitats terrestres, aquatiques et/ou riverains existants	4	5	3	3	0	3	2	3	1	1	1	5	4	3	1
	Renforcement des fonctions et/ou des composantes d'habitats terrestres, aquatiques et/ou riverains existants	4	4	4	5	1	3	2	3	1	0	0	5	4	5	2
	MOYENNE	2	2	3	4	1	3	2	2	1	1	1	4	3	3	1

		REMÉANDRAGE	RESTAURATION D'ANNEXES	AMÉNAGEMENT DES ZONES D'EXPANSION DE	RESTAURATION / CRÉATION DE MILIEUX	BASSIN SEC	BASSIN DE RÉTENTION	AMÉNAGEMENT DE DÉBRIS LIGNEUX	PRÉBARRAGES	FOSSÉS VÉGÉTALISÉS	BERMES FILTRANTES	BASSIN DE SÉDIMENTATION	REBOISEMENT EN ZONE AMONT / MOYENNE	REBOISEMENT EN PLAINES ALLUVIALES	BANDES TAMPONS	FASCINES
CO-BÉNÉFICES - SOCIÉTÉ	Augmentation des opportunités récréotouristiques	2	3	1	2	2	4	0	1	0	0	0	2	3	0	0
	Augmentation de la superficie des espaces récréotouristiques dans la région	1	2	1	2	2	4	0	0	0	0	0	3	4	0	0
	Diversification des activités récréatives disponibles dans la région	3	3	1	2	2	5	0	1	0	0	0	1	4	0	0
	Augmentation potentielle du nombre de touristes dans la région	3	3	0	2	0	3	0	1	0	0	0	2	2	0	0
	Augmentation des opportunités éducatives	5	4	3	5	1	4	4	2	0	1	1	3	4	3	4
	Création d'opportunités pour l'acquisition de connaissances scientifiques en matière de réduction du risque d'inondation, de gestion de l'eau et des dynamiques des écosystèmes dans la région.	5	5	4	4	1	3	4	2	0	1	1	3	3	2	4
	Création d'opportunités pour la sensibilisation des citoyens en matière de réduction du risque d'inondation, de gestion de l'eau et des dynamiques des écosystèmes dans la région	4	3	2	5	1	5	0	0	0	0	0	2	4	4	3
	Augmentation de la quantité d'eau disponible	1	1	-1	2	0	3	-1	-1	0	0	0	1	0	2	0
	Augmentation des réserves d'eau potable dans la région (quantité)	2	2	0	2	0	4	0	0	0	0	0	2	0	2	0
	Augmentation de l'eau disponible pour l'irrigation des cultures dans la région (quantité)	2	2	1	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Augmentation de l'eau disponible pour les besoins industriels et énergétiques dans la région (quantité)	-2	-2	-2	0	0	2	-1	-1	0	0	0	-1	0	0	0
	Réduction des îlots de chaleur urbains	2	2	2	2	2	2	0	0	0	0	0	3	5	1	0
	Réduction de l'effet albédo dans la région urbaine	2	2	2	2	0	1	0	0	0	0	0	0	4	1	0
	Augmentation de l'indice d'humidité de l'air dans la région urbaine.	2	2	2	1	2	2	0	0	0	0	0	3	5	1	0
	Amélioration de la santé humaine et du bien-être	2	2	2	2	2	4	0	0	0	0	0	3	4	1	0
	Création d'opportunités pour la pratique d'activités physiques dans la région	2	2	2	2	2	4	0	0	0	0	0	3	5	0	0
	Amélioration de la qualité de l'air	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	4	0	0
	Réduction de la pollution auditive près des zones résidentielles	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	1	0
	Augmentation de la valeur foncière des terres et propriétés	4	4	3	3	2	4	-2	-2	2	0	0	2	5	2	0
	Augmentation des espaces verts urbains	3	3	3	3	3	3	0	0	0	0	0	1	4	1	0
	Amélioration de l'esthétique paysagère	5	4	2	2	1	4	-2	-2	2	0	0	2	5	2	0
	MOYENNE	3	2	2	2	2	3	0	0	0	0	0	2	3	1	1

		REMEANDRAGE	RESTAURATION D'ANNEXES	AMENAGEMENT DES ZONES D'EXPANSION DE	RESTAURATION / CREATION DE MILIEUX	BASSIN SEC	BASSIN DE RETENTION	AMENAGEMENT DE DEBRIS LIGNEUX	PREBARRAGES	FOSSÉS VÉGÉTALISÉS	BERMES FILTRANTES	BASSIN DE SEDIMENTATION	REBOISEMENT EN ZONE AMONT / MOYENNE	REBOISEMENT EN PLANE ALLUVIALE	BANDES TAMPONS	FASCINES
PERFORMANCE ECONOMIQUE	Minimisation des coûts initiaux	-5	-5	-3	-4	-3	-4	-2	-2	-1	-2	-2	-2	-2	-2	-2
	Degré d'expertise requis pour la conception de l'aménagement	-5	-5	-3	-3	-3	-4	-2	-3	-1	-2	-2	-2	-2	-2	-3
	Niveau de collecte de données requis pour la conception de l'aménagement	-5	-5	-3	-4	-3	-3	-2	-2	-2	-2	-3	-2	-2	-2	-2
	Quantité et complexité des permis requis pour l'implantation de l'aménagement	-4	-4	-3	-4	-3	-4	-2	-2	-1	-2	-2	-2	-3	-2	-2
	Minimisation des coûts de construction	-4	-4	-4	-3	-2	-4	-2	-2	-1	-1	-2	-3	-2	-2	-2
	Niveau des besoins en machinerie spécialisée requis pour la construction de l'aménagement	-5	-5	-3	-2	-2	-5	-1	-1	-1	-1	-2	-2	-2	-2	-2
	Niveau des besoins en main-d'œuvre requis pour la construction de l'aménagement	-4	-4	-3	-4	-3	-4	-2	-3	-2	-3	-3	-3	-2	-1	-2
	Dimension de la superficie requise pour la construction de l'aménagement	-4	-4	-5	-3	-2	-4	-2	-1	0	0	-2	-5	-3	-2	-2
	Minimisation des coûts d'exploitation	-1	-2	-2	-2	-2	-3	-2	-3	-2	-3	-3	-1	-2	-1	-2
	Fréquence et complexité de l'entretien de l'aménagement	-1	-2	-2	-1	-3	-4	-2	-3	-2	-3	-3	-1	-2	-2	-3
	Fréquence et complexité du suivi de l'aménagement	-1	-3	-3	-3	-2	-2	-2	-3	-2	-3	-3	-2	-2	-1	-2
	Quantité de frais administratifs annuels requis pour l'exploitation de l'aménagement	-1	-1	-2	-2	-2	-2	-1	-2	-1	-2	-2	-1	-1	-1	-1
	Minimisation des coûts d'opportunité	-2	-2	-1	-1	-2	-2	-1	-1	0	0	-1	-3	-3	-1	-1
	Estimation des pertes pour l'industrie forestière	-2	-2	-2	-2	-1	-1	-2	-2	0	-1	-2	-4	-2	0	0
	Estimation des pertes pour le développement immobilier	-2	-2	0	-2	-2	-3	-1	-1	0	0	0	-3	-4	-2	-3
	Estimation des pertes pour les entreprises industrielles	-1	-1	0	0	-3	-3	-1	-1	0	0	0	-3	-3	0	0
	Durabilité	5	5	5	5	4	5	1	1	3	1	1	5	5	5	5
	0 à 5 ans	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	5 à 10 ans	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	10 à 30 ans	5	5	5	5	5	5	0	0	5	0	0	5	5	5	5
	30 à 50 ans	5	5	5	5	5	5	0	0	0	0	0	5	5	5	5
	50 ans et plus	5	5	5	5	0	5	0	0	0	0	0	5	5	5	5
	Rapidité du retour sur investissement	4	4	5	4	5	5	5	4	4	4	4	1	1	4	4
	15 ans et plus	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	10 ans à 15 ans	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
	5 à 10 ans (1)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	0	0	5	5
	0 à 5 ans (2)	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	0	0	5	5
	Immédiat (3)	0	0	5	0	5	5	5	0	0	0	0	0	0	0	0
	MOYENNE	0	-1	0	0	0	-1	0	-1	0	0	-1	-1	-1	1	0

ANNEXE 3 QUESTIONNAIRE POUR LA PRIORISATION DES CRITÈRES PAR LES PARTIES PRENANTES



Priorisation de solutions fondées sur la nature pour l'atténuation des risques d'inondation dans le bassin versant Rivière-à-la-Truite

Dans le cadre de la présente étude, les solutions fondées sur la nature sont des aménagements qui s'appuient ou s'inspirent des dynamiques des écosystèmes afin de réduire les risques d'inondation. L'un des avantages de ces types d'aménagement, par rapport aux techniques d'ingénierie conventionnelles, est qu'ils procurent de multiples bénéfices complémentaires pour la société et l'environnement.

Afin de sélectionner des solutions adaptées au contexte local, le sondage suivant permettra de récolter des données concernant les intérêts et préoccupations des parties prenantes. Celles-ci seront par la suite intégrées au sein d'une grille d'analyse multicritère afin de prioriser des aménagements qui reflètent les préférences locales.



Entrez le nom de l'organisation à laquelle vous êtes affilié.

EXPLICATION DE LA MÉTHODE

Les critères présentés dans les sections suivantes correspondent aux bénéfices et coûts potentiels associés aux différents types d'aménagement considérés pour l'étude. Pour les besoins de l'analyse, ils représentent des objectifs à atteindre pour la gestion de l'aménagement du territoire et des ressources en eau.

Pour chaque critère d'analyse, veuillez entrer la valeur associée afin de démontrer l'importance relative de cet objectif pour votre organisation. Une section est également disponible pour chaque critère afin d'ajouter des spécifications ou des commentaires quant au choix de la pondération.

La pondération des critères s'effectue sur une échelle de 0 à 3 selon la classification suivante :

Dans le cadre de la gestion de l'aménagement du territoire et des ressources en eau dans le bassin versant Rivière-à-la-Truite, ce critère est un :		
0	Objectif non valable	L'atteinte de cet objectif n'est pas applicable dans le contexte du bassin versant Rivière-à-la-Truite.
1	Objectif souhaitable	L'atteinte de cet objectif n'est pas jugée particulièrement importante, ou il est non prioritaire.
2	Objectif important	L'atteinte de cet objectif est importante, mais ne figure pas parmi les priorités immédiates.
3	Objectif indispensable	L'atteinte de cet objectif est importante et figure parmi les priorités immédiates. Il est jugé indispensable pour le succès du projet.

BÉNÉFICES DIRECTS ET COBÉNÉFICES

Cette section évalue les critères de performance des aménagements pour l'atténuation de l'aléa ainsi que les co-bénéfices environnementaux et sociaux.

Critère 1 : Réduction du risque d'inondation

Ce critère considère l'importance de l'atténuation des forces physiques qui contribuent au risque d'inondation dans la région. Celles-ci incluent la réduction du ruissellement et des débits de pointe, l'augmentation de l'infiltration de l'eau dans les sols, de l'évapotranspiration et de la rétention de l'eau sur le territoire.

Critère 2 : Contrôle de la sédimentation et de l'érosion

Ce critère considère l'importance de l'atténuation des forces physiques qui contribuent au risque d'érosion hydrique de surface des terres et des rives, ainsi que des processus de sédimentation des cours d'eau. Celles-ci incluent notamment le dépôt problématique de sédiments causant l'élévation du fond de la rivière ou la création de bancs de sédimentation.

Critère 3 : Réduction des risques de sécheresse

Ce critère considère l'importance de l'atténuation de la fréquence, la durée et l'intensité des périodes de sécheresse dans la région. Il considère notamment le potentiel de l'aménagement à contribuer à

l'augmentation du taux d'humidité des sols et à l'augmentation des niveaux d'eau durant les périodes d'été.

Critère 4 : Amélioration de la qualité de l'eau

Ce critère considère l'importance de l'amélioration de la qualité physico-chimique des eaux de surface qui peuvent affecter les écosystèmes et la santé humaine. Il évalue le potentiel de l'aménagement à traiter certaines sources de pollution telles que le nitrate, le phosphore, les matières en suspension et les métaux lourds. Il considère également les effets bénéfiques sur les paramètres physiques de l'eau tels que la température, le pH et la turbidité.

Critère 5 : Amélioration des nappes phréatiques

Ce critère considère l'importance de l'amélioration des eaux souterraines dans la région. Il évalue le potentiel de l'aménagement à contribuer à la recharge de la nappe phréatique et à la réduction de la pollution et de la contamination de ces eaux.

Critère 6 : Augmentation de la capacité de stockage du carbone

Ce critère considère l'importance accordée à la réduction de la quantité de dioxyde de carbone atmosphérique en tant que stratégie d'atténuation des changements climatiques. Il évalue la capacité de l'aménagement à agir en tant que puits de carbone pour la séquestration et le stockage du CO₂, réduisant ainsi les teneurs de ce gaz à effet de serre.

Critère 7 : Renforcement de la connectivité écologique

Ce critère considère l'importance accordée au renforcement du " degré de connexion entre les divers milieux naturels présents au sein d'un même paysage, sur le plan de leurs composantes, de leur répartition spatiale et de leurs fonctions écologiques ". Il évalue la performance de l'aménagement à faciliter le mouvement des espèces au sein et entre les habitats terrestres, aquatiques et riverains dans l'optique d'améliorer la résistance de la biodiversité.

Critère 8 : Création d'habitats fauniques et floristiques

Ce critère considère l'importance accordée au renforcement de la biodiversité dans la région en termes de quantité et de diversité des espèces. Il évalue la performance de l'aménagement à créer de nouveaux habitats terrestres, aquatiques et riverains, à augmenter la superficie d'habitats existants ou à améliorer la qualité de ceux-ci en termes de fonctions et de composantes.

Critère 9 : Augmentation des opportunités récréotouristiques

Ce critère considère l'importance accordée à la création de nouvelles opportunités récréatives dans la région en termes de superficie et de diversification des activités au bénéfice des citoyens et potentiellement afin d'augmenter le nombre de touristes sur le territoire.

Critère 10 : Augmentation des opportunités éducatives

Ce critère considère l'importance accordée au développement des connaissances sur des sujets connexes tels que la réduction du risque d'inondation et les dynamiques des écosystèmes dans la région. Il considère les opportunités d'apprentissage pour la communauté scientifique, ainsi que pour la sensibilisation des citoyens.

Critère 11 : Augmentation de la quantité d'eau disponible

Ce critère considère l'importance accordée à l'augmentation des réserves d'eau disponibles pour les différents usages anthropiques dans la région. Il considère la disponibilité des eaux de surface pour l'approvisionnement en eau potable, l'irrigation des cultures et les besoins industriels et énergétiques.

Critère 12 : Réduction des îlots de chaleur urbains

Ce critère considère l'importance accordée à la modération des températures maximales en milieu urbain, notamment dans un contexte de changements climatiques. Il évalue le potentiel de l'aménagement à réduire la différence de températures observée entre la ville et la campagne, ayant des effets sur la qualité de l'air et la santé humaine.

Critère 13 : Amélioration de la santé humaine et du bien-être

Ce critère considère l'importance accordée à l'amélioration de la santé physique, mentale et psychosociale des citoyens. Il considère les bénéfices directs et indirects potentiels de l'aménagement, par exemple via l'augmentation des opportunités d'activités physiques, l'amélioration de la qualité de l'air ou la réduction de la pollution auditive.

Critère 14 : Augmentation de la valeur foncière des terres et propriétés

Ce critère considère l'importance accordée à l'augmentation de la valeur foncière des terres et propriétés de la région, notamment par l'amélioration de l'esthétique paysagère et la création d'espaces verts en milieu urbain.

PERFORMANCE ÉCONOMIQUE

Cette section évalue les critères de performance économique directs et indirects pour la priorisation d'aménagements fondés sur la nature. Ces critères visent à évaluer l'importance accordée à la minimisation

des coûts pour chaque étape de la gestion de projet, balancée par la maximisation de la performance de l'aménagement dans le temps.

Critère 15 : Coûts initiaux

Ce critère considère l'importance accordée à la minimisation des coûts liés à la conception de l'aménagement, incluant le degré d'expertise requis, les besoins en collecte de données et les frais liés à l'obtention de permis.

Critère 16 : Coûts de construction

Ce critère considère l'importance accordée à la minimisation des coûts liés à la mise en œuvre de l'aménagement, incluant les besoins en machinerie et en personnel qualifié. Il considère également les besoins en espace de l'aménagement, associés aux coûts d'acquisition foncière de terres.

Critère 17 : Coûts d'exploitation

Ce critère considère l'importance accordée à la minimisation des coûts liés à l'entretien et au suivi de l'aménagement ainsi que les frais administratifs annuels.

Critère 18 : Coûts d'opportunité

Ce critère considère l'importance accordée à la minimisation des coûts liés à la perte d'usage de certaines ressources naturelles ou de terres par la mise en œuvre de l'aménagement, notamment pour l'industrie forestière, l'agriculture, le développement immobilier ou les entreprises industrielles.

Critère 19 : Durabilité

Ce critère considère l'importance accordée à la maximisation de l'espérance de vie potentielle de l'aménagement, évaluée selon une échelle temporelle de courte (5 à 10 ans) à très longue (50 ans et plus).

Critère 20 : Rapidité du retour sur l'investissement

Ce critère considère l'importance accordée à la maximisation de la vitesse à laquelle l'aménagement peut atteindre son plein potentiel de réduction des risques, évaluée selon une échelle temporelle allant de l'immédiat à longue (10 ans et plus). Il est à noter que puisque les solutions fondées sur la nature dépendent de l'évolution de composantes environnementales, l'observation des retours sur l'investissement est généralement plus longue que pour les techniques d'ingénierie conventionnelles.

MERCI POUR VOTRE COLLABORATION!

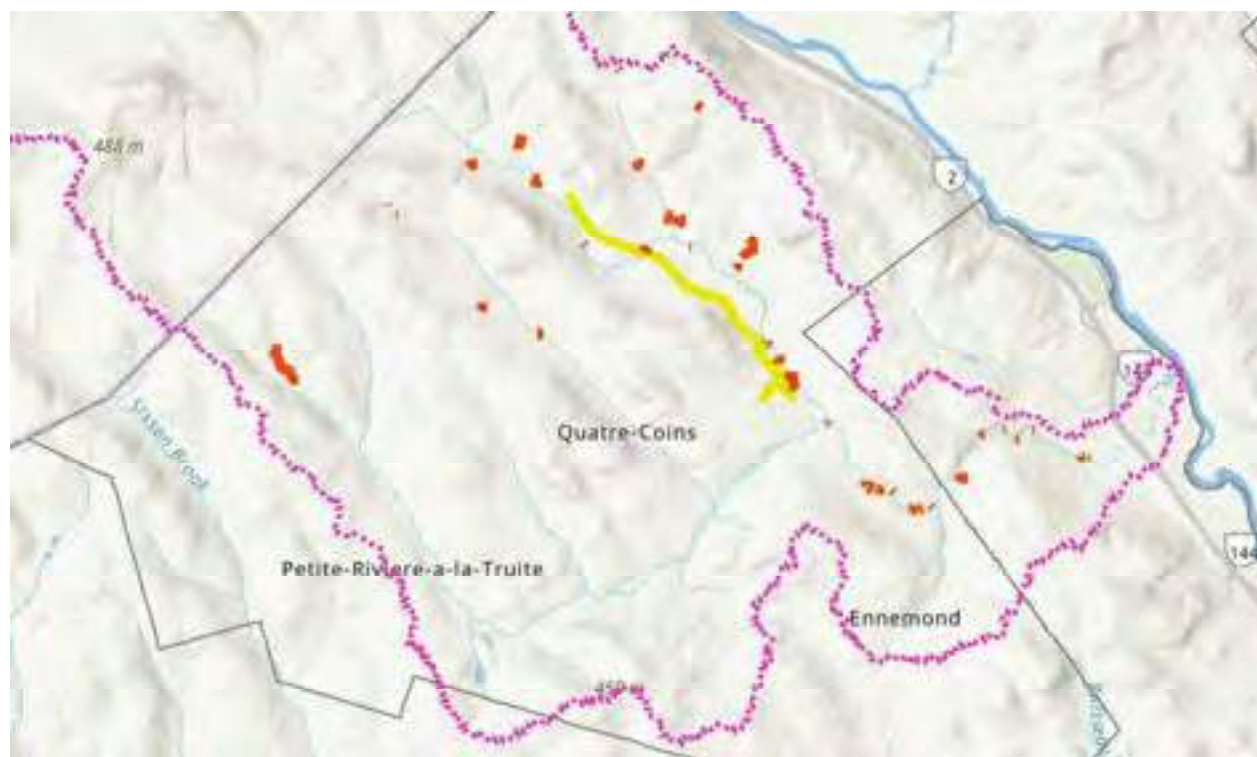
ANNEXE 4 TABLEAU DES CRITÈRES D'APTITUDE

Aménagement	Zone	Distance du réseau hydrographique	Distance du réseau de chemins	Pentes	Classe de drainage	Distance de la roche mère	WAM	TWI	LU/LC	SURFACE	AUTRES
Restauration d'annexes hydrauliques	Avale	≤ 250 m	≥ 6 m ≤ 300 m	< 9 %	-	> 1 m	-	-	Exclusions : Réseau hydrographique, Milieux humides, Bâti/Construit, Chemins, Sols dénudés	≥ 0.5 ha	-
Pondération	-	(25 %) 0-100 : 3 100-200 : 2 200-250 : 1	(10 %) 6-100 : 3 100-200 : 2 200-300 : 1	(30 %) 0-3 : 3 3-6 : 2 6-9 : 1	-	-	-	-	(20 %) ■ CT, Pelouses : 3 ■ CV 25-75, Plantations stades semis, gaulis + jeune : 2 ■ CV 75-100, Plantations stades immature + mature, Sols préparés/cultivés, Pâturage/fourrage : 1	(15 %) > 1,5 : 3 1-1,5 : 2 0,5-1 : 1	-
Restauration de la plaine inondable	Avale	≥ 30 m	-	< 9 %	-	-	-	-	Exclusions : Réseau hydrographique, Milieux humides, Bâti/Construit, Chemins, Sols dénudés	≥ 0.5 ha	Inclusion : Fréquence des inondations ≥ 1% (2100) + 50 m
Pondération	-	(20 %) 30-250 : 3 250-500 : 2 > 500 : 1	-	(35 %) 0-3 : 3 3-6 : 2 6-9 : 1	-	-	-	-	(20 %) ■ CT, Pelouses : 3 ■ CV 25-75, Plantations stades semis, gaulis + jeune : 2 ■ CV 75-100, Plantations stades immature + mature, Sols préparés/cultivés, Pâturage/fourrage : 1	(10 %) > 1,5 : 3 1-1,5 : 2 0,5-1 : 1	Profondeur inondations (15 %) 4 + m : 3 2-4 m : 2 0-2 m + buffer : 1

Aménagement	Zone	Distance du réseau hydrographique	Distance du réseau de chemins	Pentes	Classe de drainage	Distance de la roche mère	WAM	TWI	LU/LC	SURFACE	AUTRES
Restauration / Création de milieux humides	Avale	≥ 30 m ≤ 1 km	≥ 6 m ≤ 300 m	< 16 %	-	> 1 m	Saturé	Classes 7 et +	Inclusions : CV 25-75, Coupes totales, Plantations stades semis, gaulis + jeune, Sols préparation/cultivé, pâturage/Fourrage, Pelouses	≥ 0,1 ha	Inclusion : Fréquence des inondations ≥ 1% (2100) + 50 m Exclusion : Distance des réseaux d'égout > 2 m
<i>Pondération</i>	-	(10 %) 30-250 : 3 250-500 : 2 500-1000 : 1	(5 %) 6-100 : 3 100-200 : 2 200-300 : 1	(25 %) 0-4 : 3 4-9 : 2 9-16 : 1	-	-	(10 %) Saturated : 3 Very wet : 2 Damp : 1	(15 %) 13 + : 3 10-13 : 2 7-10 : 1	(15 %) ■ CT, Pelouses : 3 ■ CV 25-75, Plantations stades semis, gaulis + jeune : 2 ■ Sols préparation / cultivé, Pâturage/fourrage : 1	(10 %) >1 : 3 0,5-1 : 2 0,1-0,5 : 1	Profondeur inondations (10 %) 4 + m : 3 2-4 m : 2 0-2 m + buffer : 1
Bassins de rétention	Moyenne	≥ 30 m ≤ 1 km	≥ 6 m ≤ 300 m	< 16 %	-	> 1 m	-	Classes 7 et +	Inclusions : CV 25-75, Coupes totales, Plantations stades semis, gaulis + jeune, Sols préparation/cultivé, pâturage/Fourrage, Pelouses	≥ 0,1 ha	Exclusion : Distance des réseaux d'égout > 2 m
<i>Pondération</i>	-	(20 %) 30-250 : 3 250-500 : 2 500-1000 : 1	(10 %) 6-100 : 3 100-200 : 2 200-300 : 1	(25 %) 0-4 : 3 4-9 : 2 9-16 : 1	-	-	-	(15 %) 13 + : 3 10-13 : 2 7-10 : 1	(20 %) ■ CT, Pelouses : 3 ■ CV 25-75, Plantations stades semis, gaulis + jeune : 2 ■ Sols préparation / cultivé, Pâturage/fourrage : 1	(10 %) >1 : 3 0,5-1 : 2 0,1-0,5 : 1	-
Débris ligneux	Amont, Moyenne, Avale	≤ 250 m	≥ 50 m ≤ 300 m	< 16 %	Modéré à rapide	-	-	-	Inclusions : Coupes totales, Plantations, CV 75-100%, CV 25-75, Milieux humides	-	-
<i>Pondération</i>	-	(25 %) 0-50 : 3 50-100 : 2 100-250 : 1	(10 %) 6-100 : 3 100-200 : 2 200-300 : 1	(35 %) 0-4 : 3 4-9 : 2 9-16 : 1	-	-	-	-	(30 %) ■ CV 75-100, Milieux humides : 3 ■ CV 25-75, Plantations : 2 ■ Coupes totales : 1	-	-

Aménagement	Zone	Distance du réseau hydrographique	Distance du réseau de chemins	Pentes	Classe de drainage	TWI	LU/LC	SURFACE	AUTRES
Fossés végétalisés	Amont, Moyenne	≥ 30 m ≤ 1 km	≥ 6 m ≤ 300 m	≥ 9% < 31 %	Modéré à rapide	-	Exclusions : Réseau hydrographique, Milieux humides, Bâti/Construit, Chemins, Sols dénudés, Plantations stades immature + mature, CV 75-100%	-	-
<i>Pondération</i>	-	(25 %) 30-250 : 3 250-500 : 2 500-1000 : 1	(15 %) 6-100 : 3 100-200 : 2 200-300 : 1	(30 %) 9-16 : 3 16-23 : 2 23-31 : 1	Modéré à rapide	-	(30 %) ■ CT, Pelouses : 3 ■ CV 25-75, Plantations stades semis, gaulis + jeune : 2 ■ Sols préparation / cultivé, Pâturage/fourrage : 1	-	-
Reboisement en amont + moyen	Amont, moyenne	≥ 30 m ≤ 1 km	-	< 31 %	Très mauvais à bon	-	Inclusions : CV 25-75, Coupes totales, Sols préparation/cultivés, pâturage/Fourrage, Pelouses	> 5 ha	-
<i>Pondération</i>	-	(20 %) 30-250 : 3 250-500 : 2 500-1000 : 1	-	(30 %) 0-9 : 3 9-16 : 2 16-31 : 1	(10 %) Très mauvais à mauvais : 3 Imparfait : 2 Modéré à bon : 1	-	(25 %) ■ CT, Pelouses : 3 ■ CV 25-75 : 2 ■ Sols préparation / cultivé, Pâturage/fourrage : 1	(15 %) > 15 : 3 10-15 : 2 5-10 : 1	-
Reboisement en aval	Avale	≥ 30 m ≤ 1 km	-	< 16 %	-	-	Inclusions : CV 25-75, Coupes totales, Sols préparation/cultivés, Pâturage/Fourrage, Pelouses	> 0,5 ha	Distance réseau d'égout > 2 mètres
<i>Pondération</i>	-	(20 %) 30-250 : 3 250-500 : 2 500-1000 : 1	-	(35 %) 0-4 : 3 4-9 : 2 9-16 : 1	-	-	(30 %) ■ CT, Pelouses : 3 ■ CV 25-75 : 2 ■ Sols préparation / cultivé, Pâturage/fourrage : 1	(15 %) > 1,5 : 3 1-1,5 : 2 0,5-1 : 1	-

ANNEXE 5 CARACTÉRISATION DES BANDES RIVERAINES ET DES FOSSÉS DÉNUDÉS (tiré de CSRNO, s. d.)

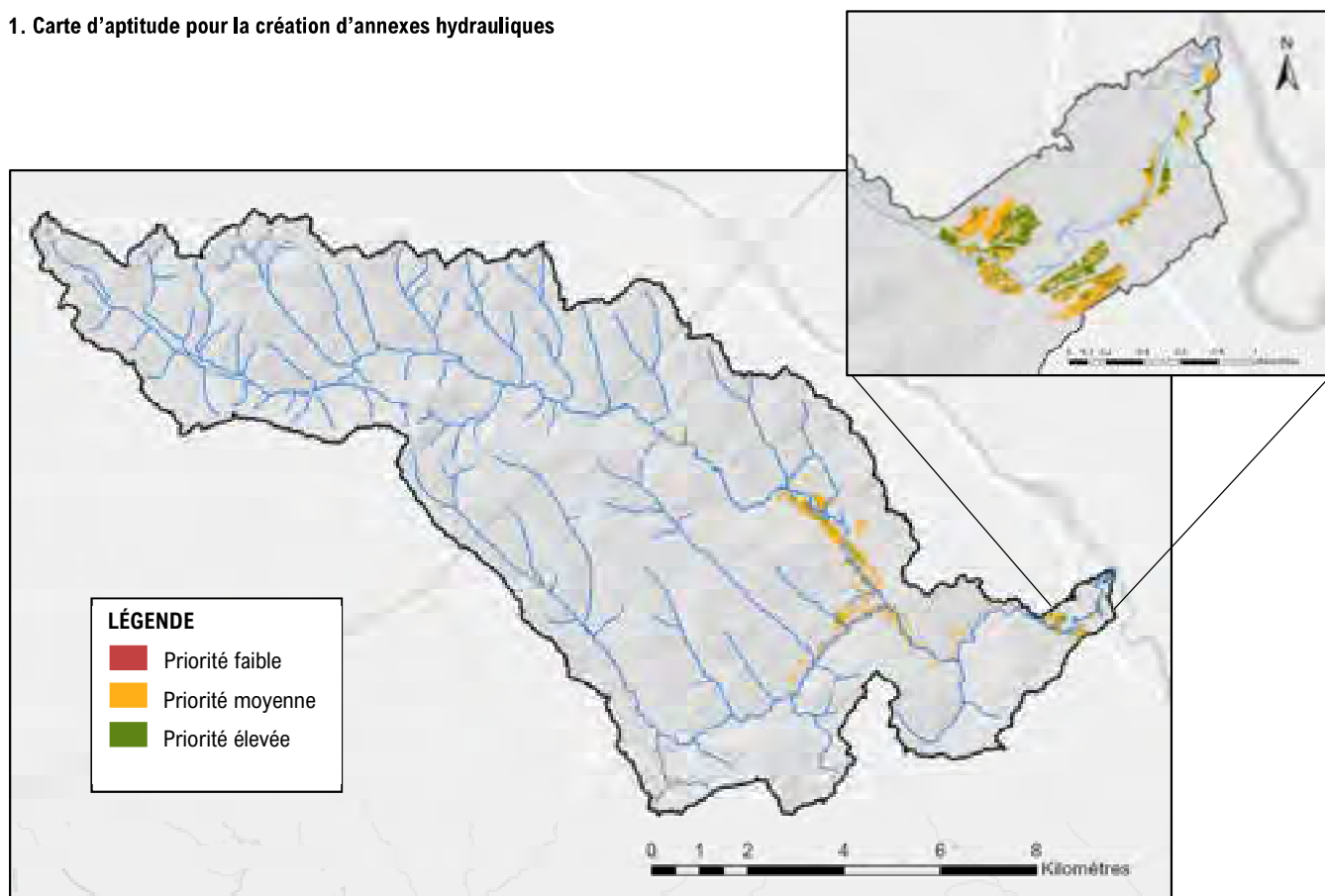


LÉGENDE

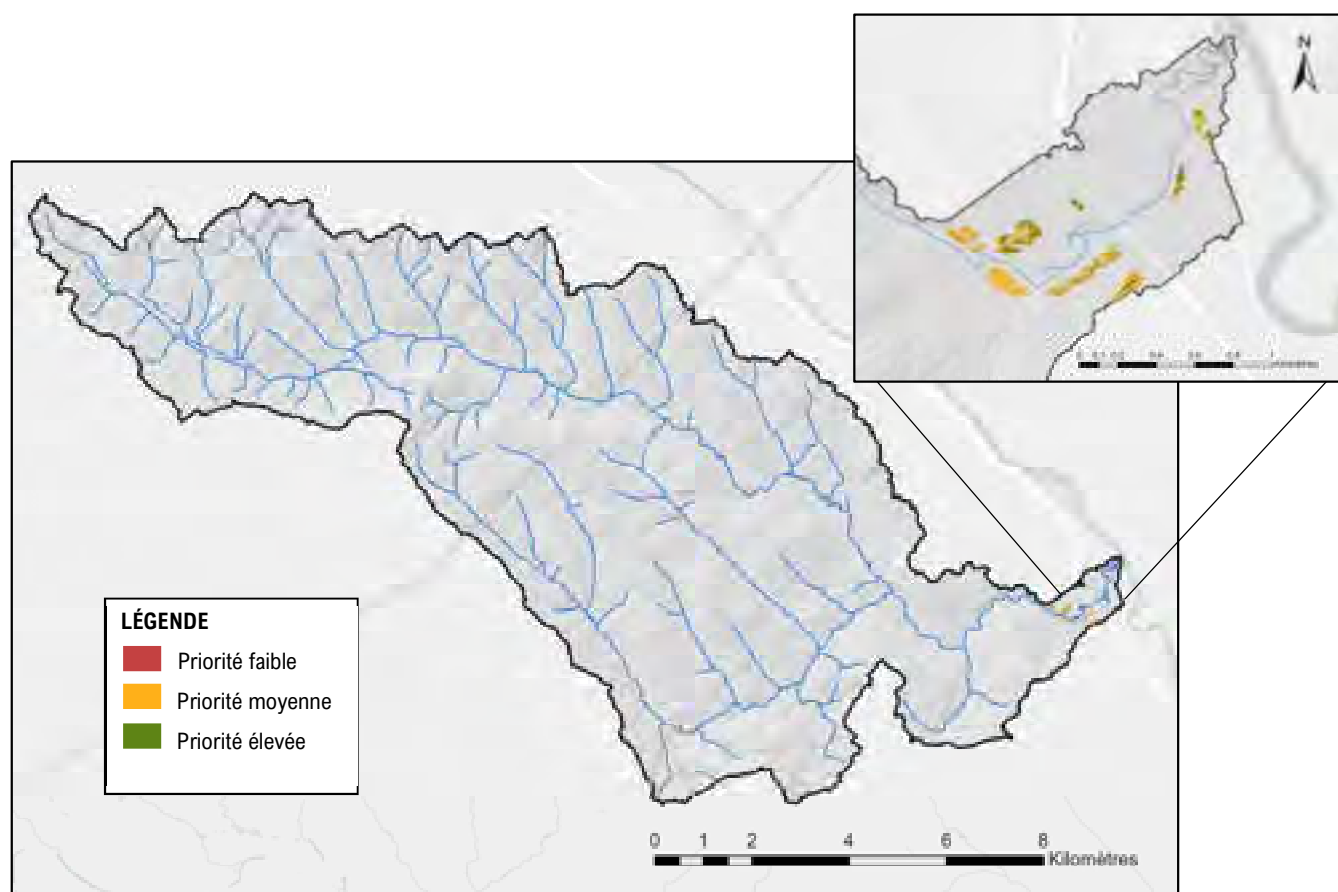
-  Fossés dénudés
-  Bandes riveraines dénudées
-  Limites du bassin versant Rivière-à-la-Truite

ANNEXE 6 CARTES D'APTITUDE SPÉCIFIQUES POUR CHAQUE AMÉNAGEMENT

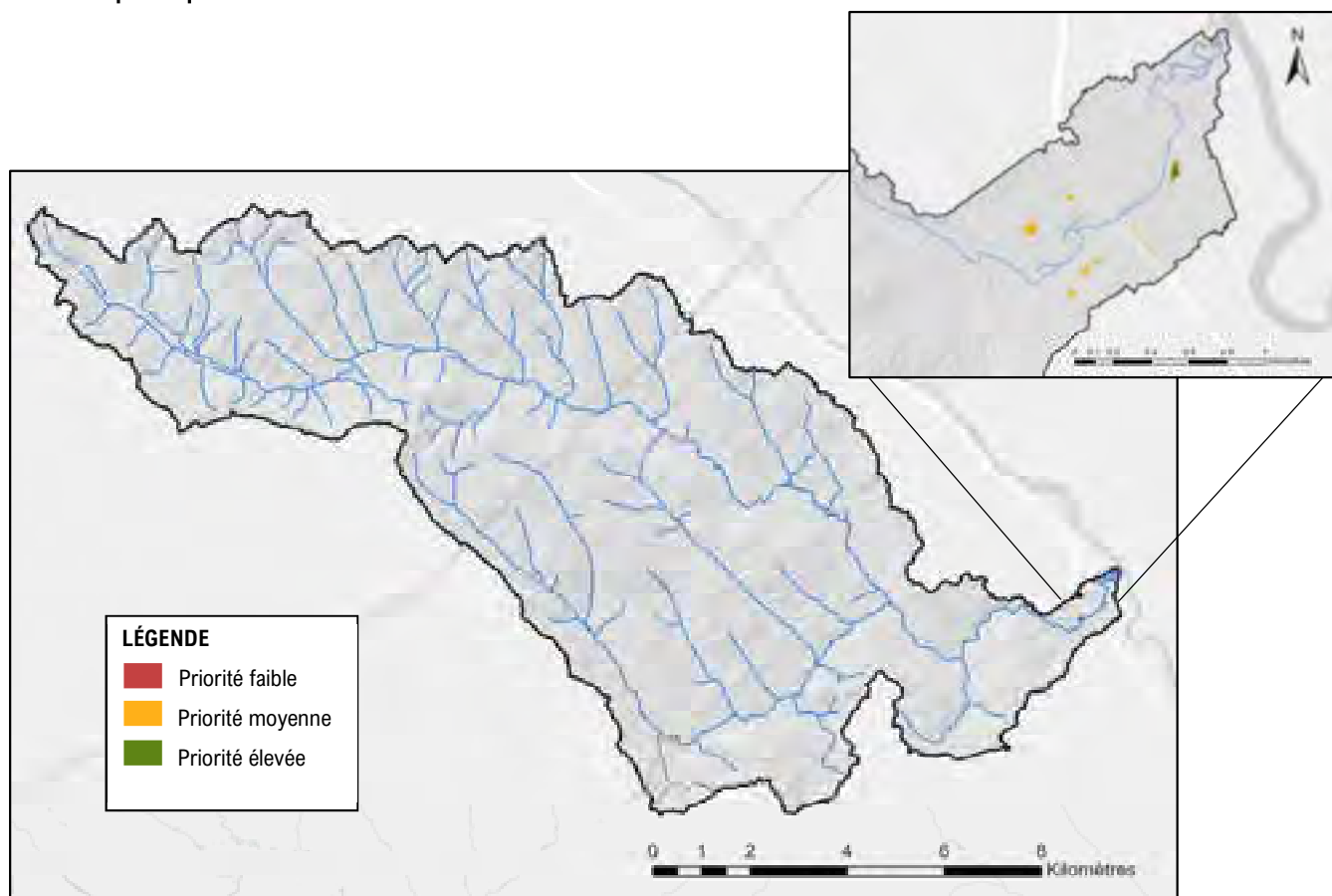
1. Carte d'aptitude pour la création d'annexes hydrauliques



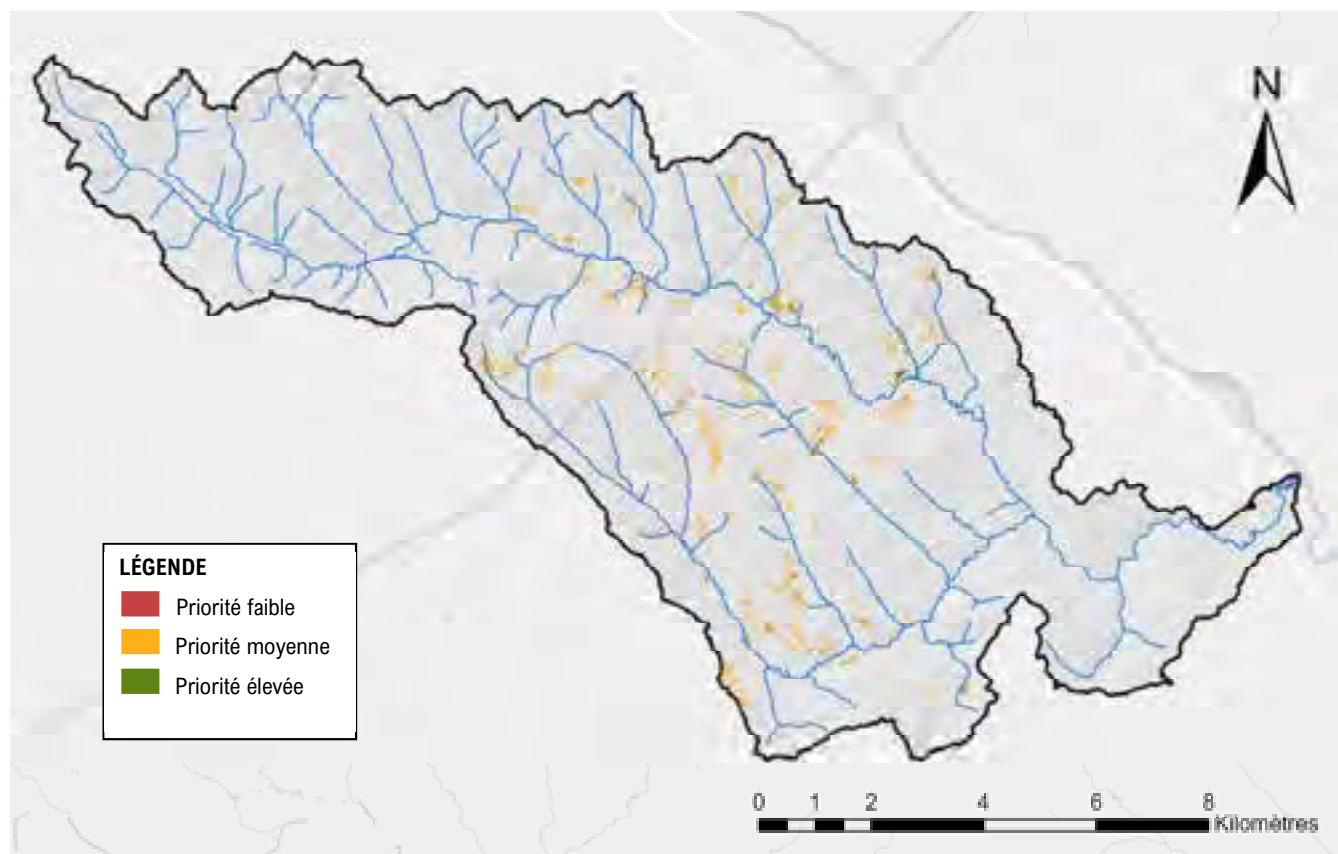
2. Carte d'aptitude pour l'aménagement des zones de crue



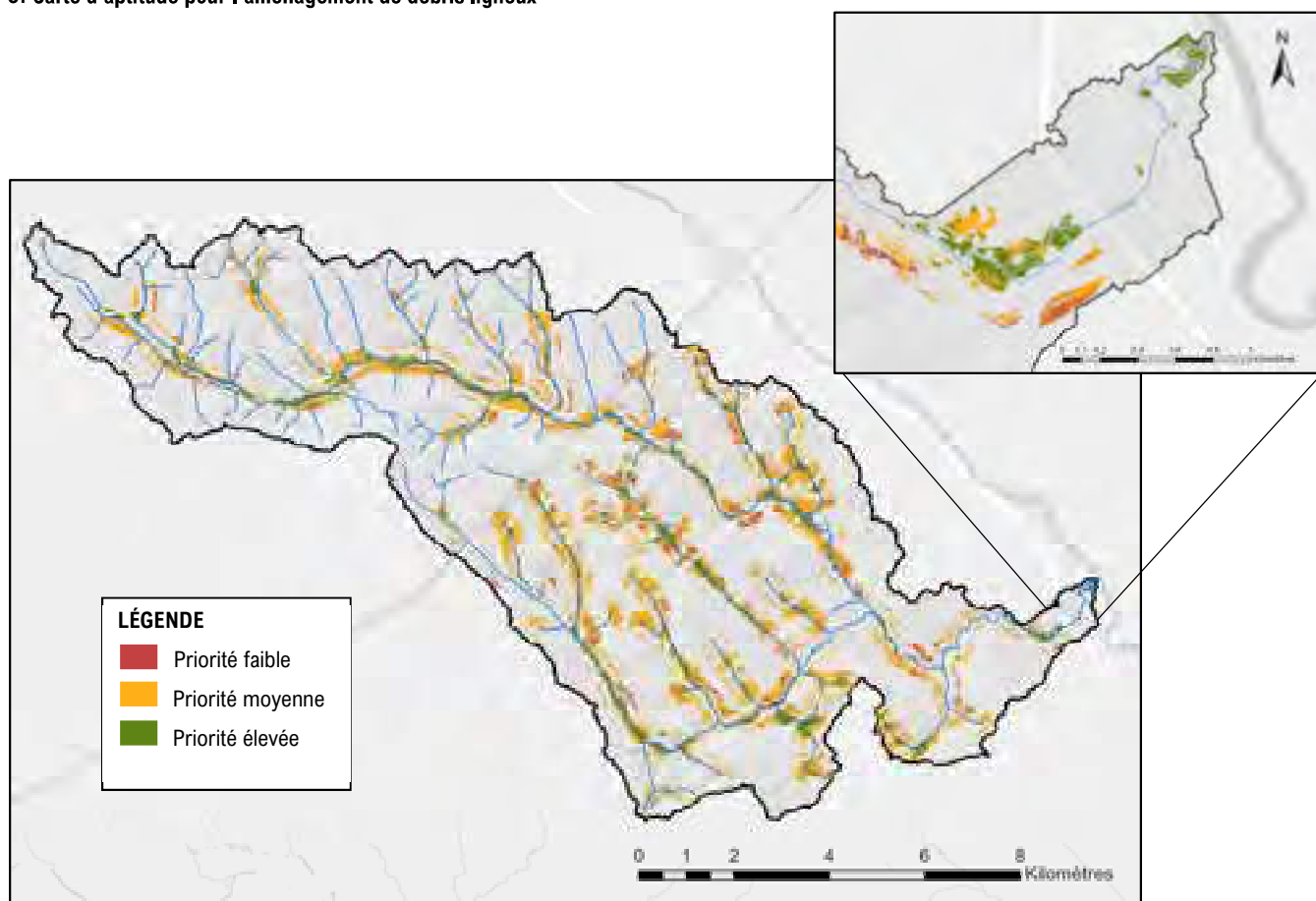
3. Carte d'aptitude pour la création de milieux humides



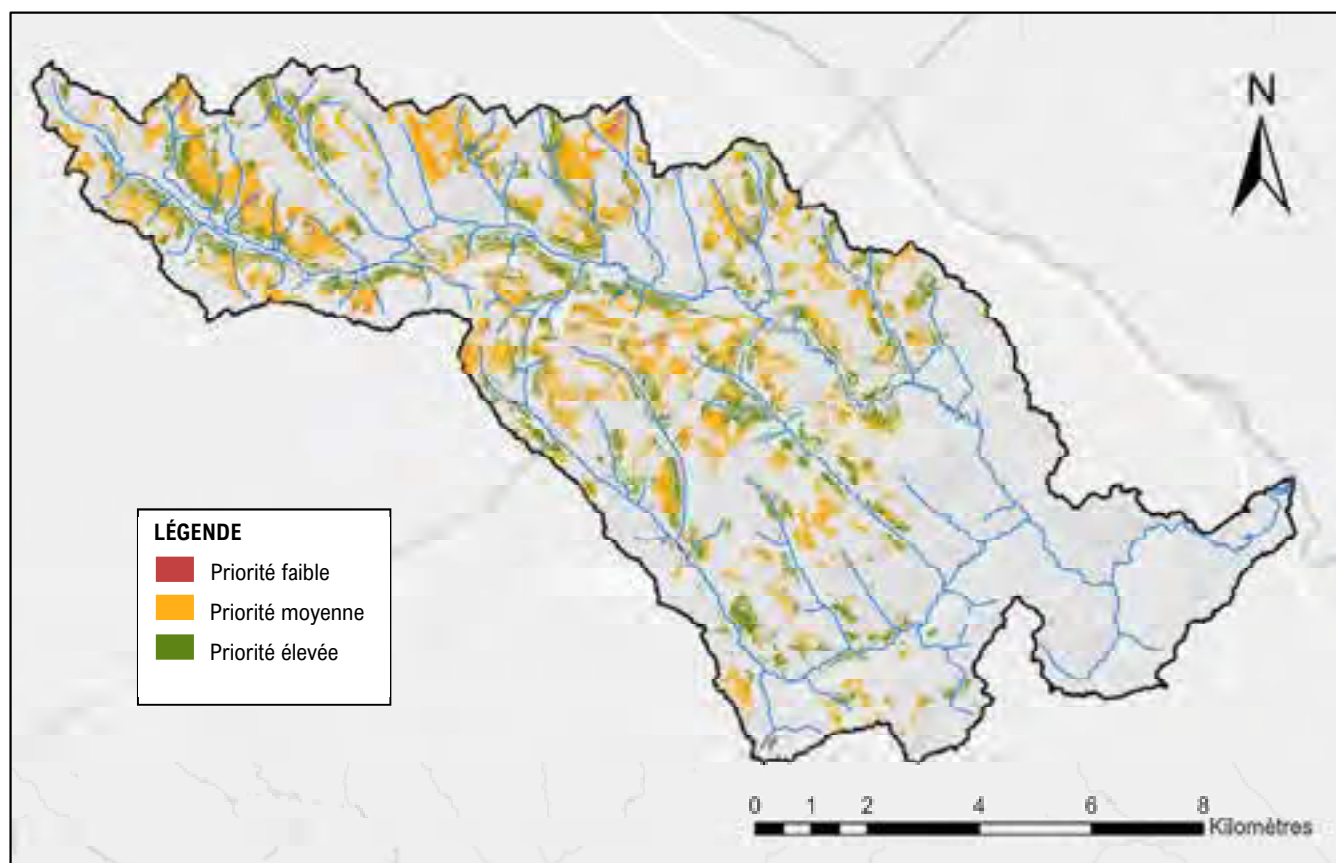
4. Carte d'aptitude pour la création de bassins de rétention



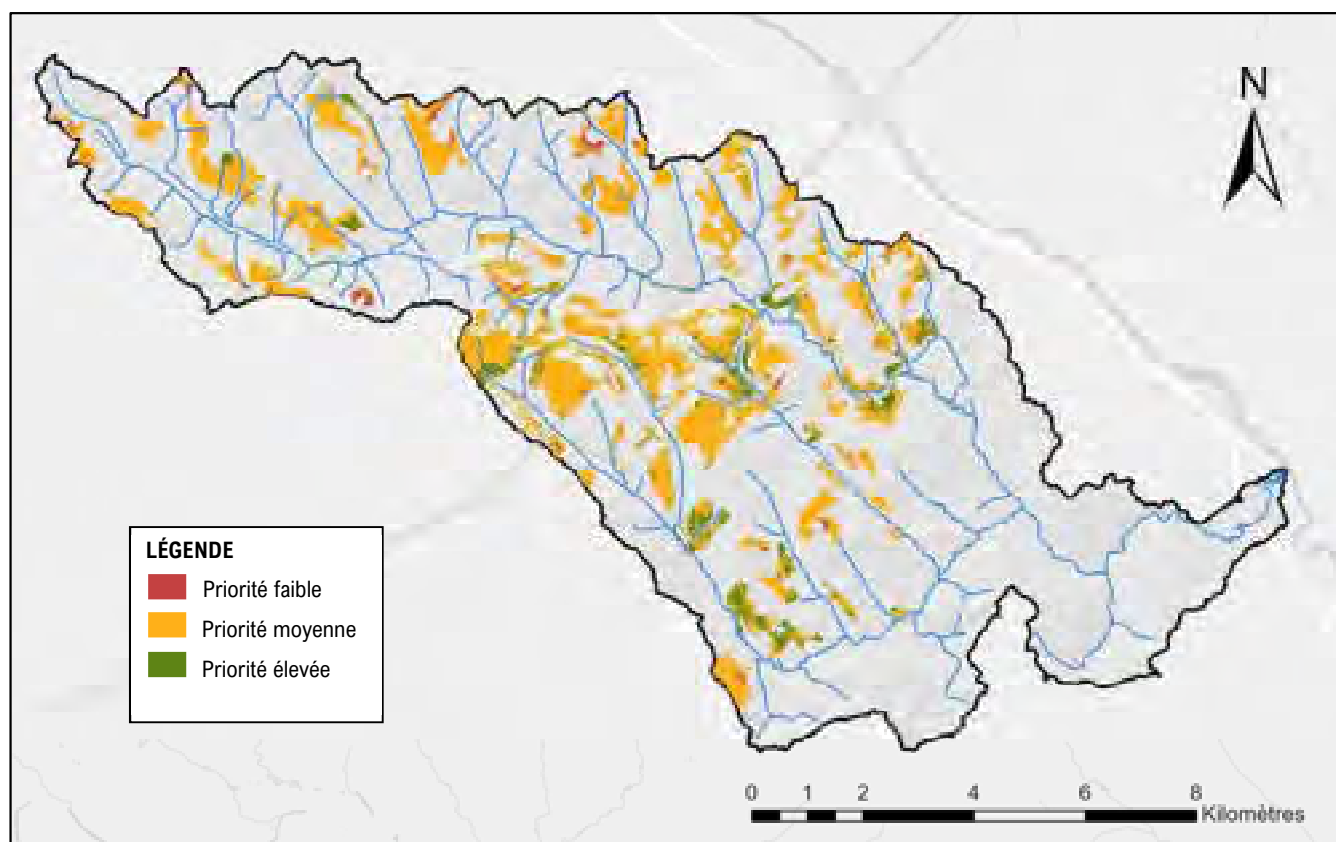
5. Carte d'aptitude pour l'aménagement de débris ligneux



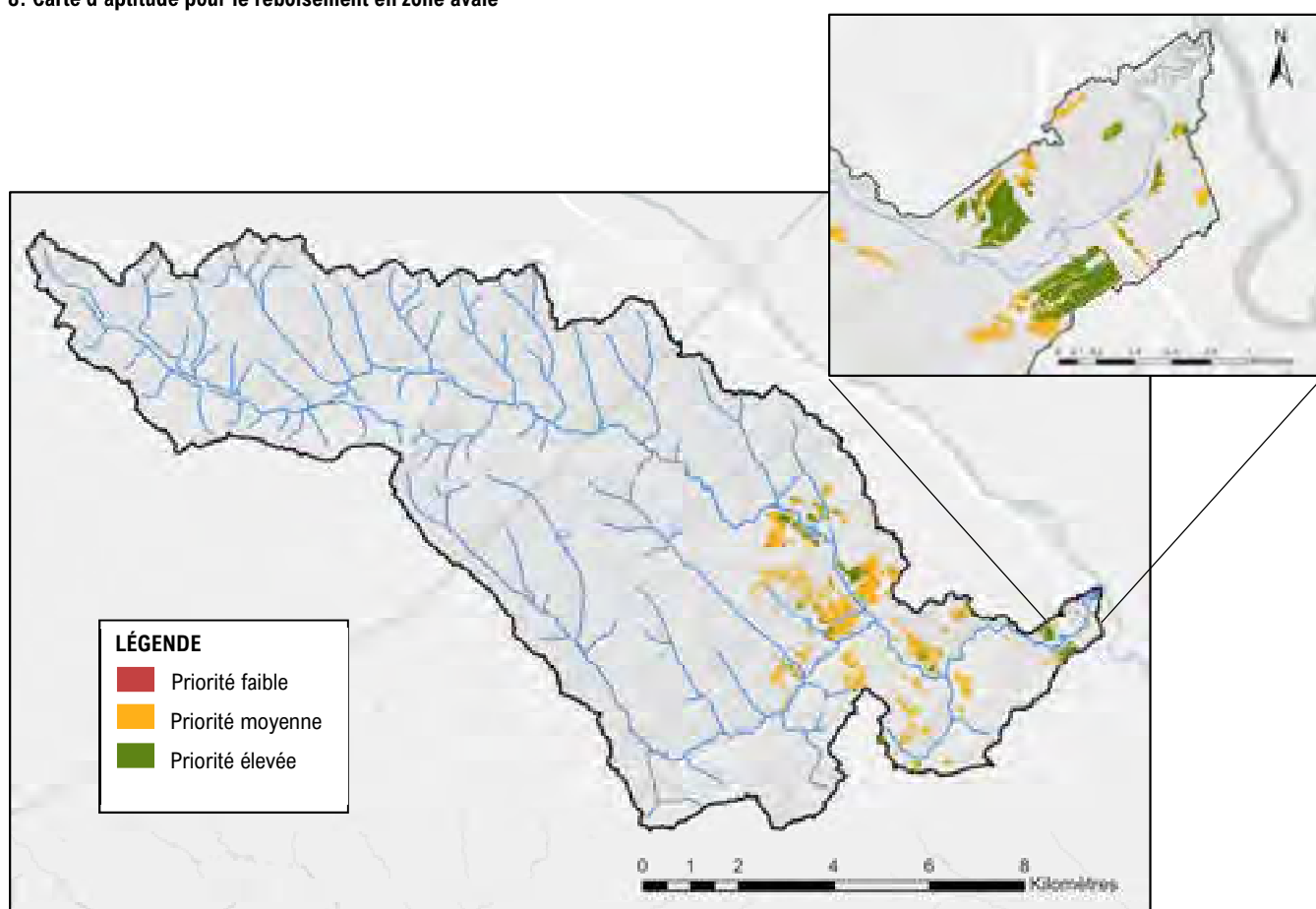
6. Carte d'aptitude pour la création de fossés végétalisés



7. Carte d'aptitude pour le reboisement en zone amont et moyenne



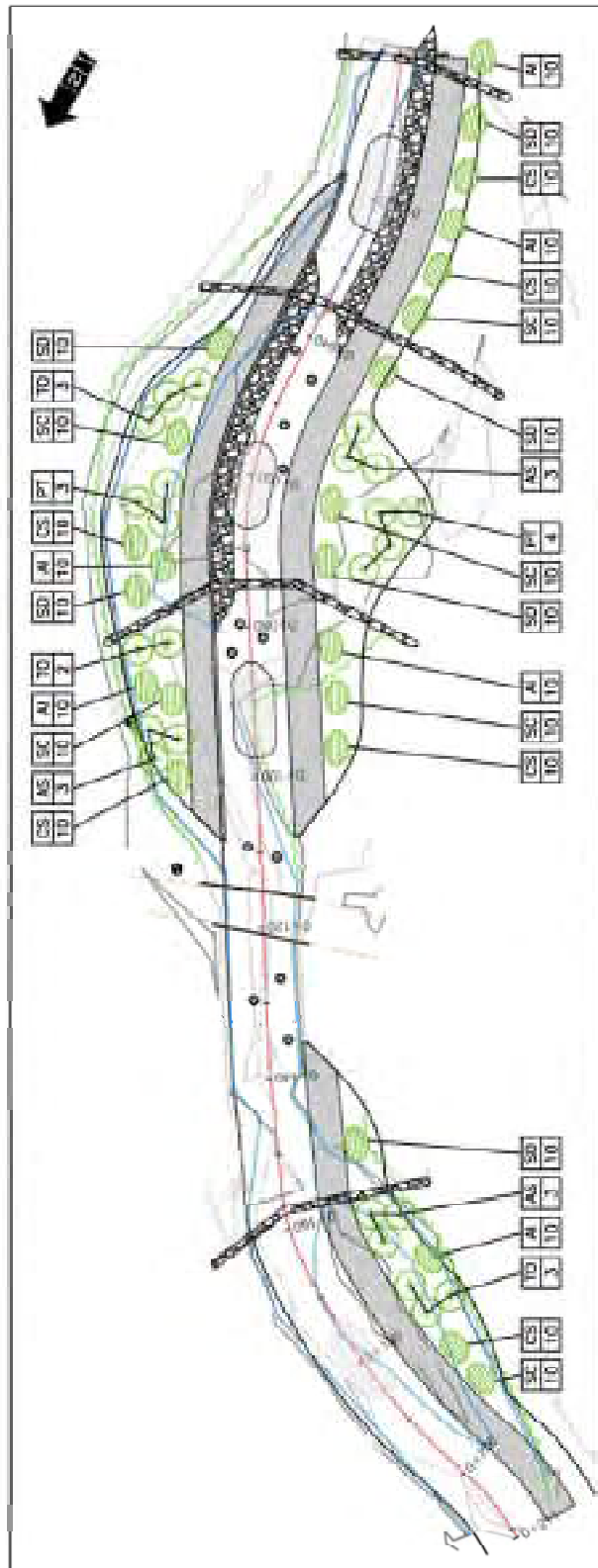
8. Carte d'aptitude pour le reboisement en zone avale



ANNEXE 7 PROJET DE PARC DANS LA PLAINE INONDABLE DU BASSIN VERSANT (document interne)



ANNEXE 8 PROPOSITION DE RESTAURATION PRÈS DE LA RUE DEMERS (tiré de Matrix Solutions Inc., 2018)



RESTORATION SEED MIX		
SCIENTIFIC NAME	COMMON NAME	% MIX
GLYCERIA STRIATA	FOWL MANNA GRASS	2
POA PALUSTRIS	FOWL BLUEGRASS	30
CAREX VULPINOIDEA	FOX SEDGE	30
JUNCUS TENUIS	PATH RUSH	8
ELYMIUS VIRGINICUS	VIRGINIA WILD RYE	30

RESTORATION PLANTINGS			
IDENTIFICATION	SCIENTIFIC NAME	COMMON NAME	QUANTITY
CS	CORNUS SERICEA	RED OSIER DOGWOOD	60
SD	SALIX DISCOLOR	PUSSY WILLOW	60
SC	SAMBUCUS CANADENSIS	AMERICAN ELDERBERRY	60
AI	ALNUS INCANA	SPECKLED ALDER	60
TO	THUJA OCCIDENTALIS	WHITE CEDAR	8
AS	ACER SACCHARUM	SUGAR MAPLE	9
PT	POPULUS TREMULOIDES	TREMBLING ASPEN	7

SEED MIX NOTES:

- ALL SEED MIXES TO BE APPLIED AT A RATE OF 22-25 KG/HA
- A COVER CROP OF ANNUAL RYE (LOLIUM MULTIFLORUM) SHOULD BE APPLIED AT A RATE OF 22 KG/HA ON ALL AREAS OF DISTURBED/EXPOSED SOIL WITHIN THE PROJECT AREA FOLLOWING COMPLETION OF GRADING. DO NOT SUBSTITUTE PERENNIAL RYEGRASS AS A COVER CROP.
- SEED WILL NOT BE APPLIED ON FROZEN SOIL OR IN INUNDATED AREAS.
- SEED SHOULD BE APPLIED IN EARLY FALL OR EARLY SPRING.
- MULCH USING STRAW IN AREAS OF ONGOING EROSION TO PROMOTE ESTABLISHMENT OF COVER CROP AND RESTORATION SEED MIX.

ANNEXE 9 PROJET DE RESTAURATION DES BERGES D'UN TRONÇON DE LA RIVIÈRE À LA TRUITE

