



# GUIDE MÉTHODOLOGIQUE D'ANALYSE COÛTS-AVANTAGES DES OPTIONS D'ADAPTATION AUX INONDATIONS ET ALÉAS FLUVIAUX EN CONTEXTE DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Rapport final  
Septembre 2021



# **GUIDE MÉTHODOLOGIQUE D'ANALYSE COÛTS-AVANTAGES DES OPTIONS D'ADAPTATION AUX INONDATIONS ET ALÉAS FLUVIAUX EN CONTEXTE DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES**

Rapport final

09/2021

**DIRECTRICE DE PROJET :** Ursule Boyer-Villemare, Ouranos

## **ÉQUIPE DE RÉALISATION :**

Ursule Boyer-Villemare, Ouranos

Caroline Simard, Ouranos

Annabelle Lamy, Ouranos

Jérémy Roques, ROBVQ

Hugo Morin, Ouranos

Raphaël Desjardins, Ouranos

Dorothy Heinrich, Ouranos

Scénarios climatiques : Marco Braun, Ouranos

**RÉVISION LINGUISTIQUE :** Ursule Boyer-Villemare, Hugo Morin, Marie-Anta Diop

**MISE EN PAGE :** Ursule Boyer-Villemare, Hugo Morin, Annabelle Lamy, Marie-Anta Diop

**CRÉDITS PHOTO PAGE COUVERTURE :** COBARIC, MRC Coaticook, Indrid Cold, Ouranos.

**Titre du projet Ouranos :** Analyse coûts-avantages de l'adaptation aux inondations riveraines

**Numéro du projet Ouranos :** 510034

**Citation suggérée :** Boyer-Villemare, U., Simard, C., Lamy, A., Roques, J., Morin, H., Desjardins, R., Heinrich, D. (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. Ouranos. Montréal 113 p. + annexes.

Les résultats et opinions présentés dans cette publication sont entièrement la responsabilité des auteurs et n'engagent pas Ouranos ni ses membres. Toute utilisation ultérieure du document sera au seul risque de l'utilisateur sans la responsabilité ou la poursuite juridique des auteurs.

# REMERCIEMENTS

---

Ce projet a été rendu possible grâce au soutien du Groupe de travail sur l'économie de la Plateforme canadienne d'adaptation au changement climatique, présidé par Ressources naturelles Canada, du gouvernement du Québec dans le cadre du Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques et de la Fédération canadienne des municipalités.

D'abord, le ROBVQ a été un partenaire privilégié pour la réalisation de ce guide, tant en matière de mobilisation que de compétences techniques sur l'évaluation des aléas. De nombreuses collaborations avec des experts ont aussi soutenu la démarche, notamment avec Mélanie Trudel, Mohammad Bizhanimanzar, Robert Leconte et Salma Gobji en génie civil à l'Université de Sherbrooke, Marc-André Bourgault sur les milieux humides de l'université Laval, Pascale Biron et Guénoles Cholé sur l'évaluation hydrogéomorphologique à l'université Concordia, Karem Chokmani sur les embâcles à l'INRS, Alain Mailhot sur les ouvrages de rétention à l'INRS, François Anctil sur la modélisation hydraulique à l'université Laval, Éric Levasseur (DEH, MELCC) et de Travis Logan (Ouranos). Tous et toutes ont généreusement partagé avec Ouranos leur expérience et leurs connaissances approfondies pour cette mise en commun complexe vers l'évaluation des risques fluviaux dans le bassin versant de la Chaudière.

Nous tenons également à souligner la contribution des membres des différents comités mis en place dans le cadre de ce projet. Leur participation a permis, entre autres, de mieux intégrer l'ensemble des enjeux des zones d'étude.

Dans le comité local de suivi de l'étude de cas du bassin versant de la rivière Chaudière, nous tenons à remercier le COBARIC / Véronique Brochu, Yannick Bourque, Marie-Ève Thérout et l'équipe, la Ville de Lévis (Jérôme Carrier), la MRC Nouvelle-Beauce (Érick Olivier/Marie-Josée Larose), le comité du PRMHH-CA-MRC de Lotbinière (Pablo Rodriguez, Josée Breton, Patrick Martineau), pour leur soutien indéfectible. Au sein de l'assemblée consultative de priorisation de cette même étude de cas, nous soulignons le taux de participation exemplaire des aménagistes des 7 MRC et 4 villes concernées dans le bassin, ainsi que plusieurs élus et officiers municipaux particulièrement actifs sur la question des inondations. L'apport précieux de ces nombreux partenaires a permis d'avoir accès aux informations et données essentielles à la réalisation du projet. Merci pour votre ouverture d'esprit et attitude de collaboration dans un contexte soulevant les préoccupations et les passions.

Dans le comité local de suivi de l'étude de cas de Compton, nous tenons à remercier la MRC Coaticook / Marie-Claude Bernard, le COGESAF / Catherine Frizzle, la fédération de l'UPA-Estrie / Roberto Toffoli, la municipalité de Compton / Jean-Pierre Charuest pour leur soutien indéfectible. L'apport précieux de ces nombreux partenaires a permis d'avoir accès aux informations et données essentielles à la réalisation du projet. Un merci sincère aux producteurs locaux ayant participé à l'assemblée locale de priorisation, merci pour votre ouverture d'esprit et attitude de collaboration dans un contexte soulevant les préoccupations et les passions.

Nous remercions aussi toutes les organisations et firmes qui ont fourni des données essentielles ou du temps pour ce projet, WSP, Stantec, Canards Illimités et plusieurs autres. Cet apport essentiel a grandement renforcé la crédibilité de l'estimation du coût des mesures.

Les membres du comité de suivi ont aussi été d'un précieux conseil : Pamela Kertland (Ressources Naturelles Canada), Richard Turcotte/Audrey Lavoie (MELCC-Ouranos), Sami El-Leuch (FCM), Skander Ben Abdallah (UQAM), Geneviève Cloutier (U.Laval), François Anctil (U.Laval), Antoine Verville/Marie-Hélène Gendron (ROBVQ), Claude Sauvé (CBJC), Anne Blondlot (Ouranos), Alexandrine Bisailon (Ouranos), Pascal Marceau (MSP), Jimmy Duschesneau/Myriam Michel/Steve Héту (MAMH).

Merci à tous ceux et celles y ayant apporté une contribution pour faire de ce projet collectif une réussite.





# RÉSUMÉ

---

## *Introduction*

Au Québec, les inondations fluviales constituent une problématique multidimensionnelle complexe. Ce guide méthodologique vise à soutenir la prise de décision en guidant les décideurs et professionnels dans une démarche étape par étape pour réaliser une analyse rigoureuse de différents scénarios d'adaptation. Il a été rédigé en parallèle des projets d'analyse coûts-avantages (ACA) pour la municipalité de Compton, en Estrie ([Boyer-Villemaire et al., 2021a](#)), et du bassin versant de la rivière Chaudière, dans la région de Chaudière-Appalaches ([Boyer-Villemaire et al., 2021b](#)). La personne souhaitant voir une application concrète de cette méthodologie est invitée à se référer à ces deux rapports. À noter qu'un webinaire Ouranos résumant la méthodologie et les résultats des deux études de cas est également disponible [en ligne](#). En revanche, ce guide a une visée générale. Le cadre conceptuel des différents jalons du processus est décrit dans une perspective de répliquabilité. Ainsi, l'objectif en filigrane de l'ensemble du document est de permettre d'adapter la méthode à des territoires, des problématiques et des capacités distinctes et variées. Une modulation adéquate des méthodologies présentées peut être atteinte grâce à la rencontre ou l'accompagnement de multiples disciplines.

## *Méthodologie*

Ce guide est le fruit d'un effort conjoint entre Ouranos, le Regroupement des organismes de bassins versants du Québec (ROBVQ), des partenaires du Ministère de l'Environnement et de la Lutte aux Changements climatiques (MELCC), de Ressources naturelles Canada, de différents organismes de bassins versants (OBV) locaux et de chercheurs de l'UQAM, de l'université Laval, de l'université de Sherbrooke. Il est construit sur la méthodologie utilisée par Ouranos dans la série d'études de cas en milieu maritime au Québec et dans les provinces atlantiques. Sur ces bases, il a été adapté pour les milieux fluviaux et mis à jour avec la littérature scientifique et diverses innovations dans les processus liés à sa réalisation, notamment concernant la valorisation des services rendus par les écosystèmes.

La démarche s'inscrit en convergence entre l'analyse économique et l'analyse de risque basée sur une approche multi-aléas, appuyées par une démarche participative. En combinant ces trois concepts, la méthodologie permet non seulement de dégager les

scénarios les plus rentables pour la société (analyse économique) et de favoriser les investissements rapportant les plus grands dommages évités par une diversité aléas (analyse de risque), mais facilite également la mise en œuvre des options d'adaptation par une consultation active des acteurs locaux (approche participative). En incluant les différentes parties prenantes, non seulement l'efficacité des scénarios d'adaptation est accrue, mais leur acceptabilité l'est tout autant.

### *Résultat*

Ce guide présente une généralisation de la méthodologie développée pour les deux analyses coûts-avantages de ce projet (Boyer-Villemaire et al., [2021a](#); [2021b](#)), pour en permettre une répliquabilité aussi aisée que possible dans des contextes divers. Le déroulement de ces projets se résume en cinq grandes étapes :

- 1- Design de l'étude (chapitre 3)
- 2- La mobilisation des parties prenantes au projet (chapitre 4);
- 3- L'analyse de risque (chapitre 5);
- 4- La scénarisation des stratégies d'adaptation (chapitre 6) et
- 5- La réalisation des ACA (chapitre 7).

Pour chaque étape, le guide méthodologique fait ressortir une mécanique générale, à savoir les différents éléments nécessaires pour réutiliser la méthode dans d'autres cas de figure. Ainsi, les communautés qui seront affectées par l'impact des changements climatiques sur les inondations et autres aléas fluviaux pourront décider, de façon éclairée et rigoureuse, de la meilleure manière pour s'adapter.

Autrement, la plus grande innovation ayant découlé de ce projet est d'avoir mis en commun un ensemble de connaissances et de littératures éparses. Les ACA sont couramment utilisées dans différents milieux depuis de nombreuses années. Toutefois, des notions peu conventionnelles y ont été ajoutées. Premièrement : le risque. Celui-ci est propre au contexte de gestion des inondations et risques fluviaux, et dans la modélisation des incidences des changements climatiques. Deuxièmement, les ACA ont été bonifiées d'impondérables, à la fois trop souvent occultés et pourtant si cruciaux pour une vision complète de la problématique : l'impact des scénarios d'adaptation sur les écosystèmes et le bien-être.

Dans la même veine, il paraît tout à fait incontournable de souligner la pluridisciplinarité de tels projets. Les équipes d'analyses doivent maîtriser des techniques complexes, à la fois portant sur les modélisations hydrologiques, hydrauliques, hydrogéomorphologiques, les analyses des écosystèmes et les analyses économiques. En revanche, aussi spécialisées que puissent être ces équipes d'analyse, elles restent souvent bien limitées dans leurs connaissances du contexte d'étude. L'approche participative, détaillée dans le chapitre de mobilisation des parties prenantes, s'avère essentielle afin d'impliquer les communautés vivant dans des milieux et les différentes organisations et autorités susceptibles de prendre part à la mise en œuvre des scénarios d'adaptation.

### *Retombées pour l'adaptation*

- Les méthodes peuvent être appliquées autant à l'échelle municipale que du bassin versant
- Les méthodes d'évaluation économique intègrent presque tous les secteurs, dont les services rendus par les écosystèmes, pour une prise de décision intégrée en adaptation
- Les méthodes d'analyse complémentaire favorisent une adaptation robuste et intègre, quant aux enjeux d'équité entre les acteurs et aux enjeux multi-aléas



# TABLE DES MATIÈRES

---

<b>REMERCIEMENTS .....</b>	<b>1</b>
<b>RÉSUMÉ .....</b>	<b>3</b>
<b>GLOSSAIRE.....</b>	<b>11</b>
<b>LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES .....</b>	<b>14</b>
<b>LISTE DES FIGURES.....</b>	<b>16</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX.....</b>	<b>17</b>
<b>LISTE DES ANNEXES.....</b>	<b>19</b>
<b>1. INTRODUCTION.....</b>	<b>1</b>
1.1 Mise en contexte générale.....	1
1.2 Les risques fluviaux : une problématique multidimensionnelle et des décisions complexes.....	2
1.3 Principes et concepts de l'analyse coûts-avantages (ACA) participative pour soutenir la prise de décision face aux risques fluviaux .....	4
1.4 Avantages, limites et bonifications de l'ACA .....	9
1.5 Représentation du flux de travail.....	10
1.6 Table des matières générique.....	12
1.7 Contenu du guide.....	13
<b>2. INTRODUCTION ET DESIGN DE L'ÉTUDE .....</b>	<b>14</b>
2.1 Caractérisation.....	15
2.1.1 Localisation .....	15
2.1.2 Milieu physique .....	16
2.1.3 Utilisation du sol .....	17



2.1.4	Milieux humains et population d'intérêt.....	17
2.1.5	Historique des problématiques liées à la rivière.....	18
2.2	Horizon temporel .....	18
2.3	Paramètres économiques.....	19
2.3.1	Taux d'actualisation.....	19
2.3.2	Unité monétaire.....	19
2.3.3	Indicateurs économiques.....	20
<b>3.</b>	<b>MOBILISATION DES PARTIES PRENANTES .....</b>	<b>21</b>
3.1	Contexte .....	21
3.2	Objectifs.....	22
3.3	Approche générale .....	23
3.4	Enchaînement suggéré des ateliers.....	25
3.5	Ateliers d'assemblées consultatives de priorisation (ACP).....	27
<b>4.</b>	<b>PROCESSUS D'ANALYSE DE RISQUE .....</b>	<b>29</b>
4.1	Méthodologie : L'approche multi-aléas .....	29
4.2	Analyse des aléas.....	30
4.2.1	Analyse des inondations en climat futur .....	30
4.2.1.1	Modélisation climatique.....	31
4.2.1.2	Modélisation des débits.....	33
4.2.1.3	Cartographie des submersions .....	36
4.2.1.4	Choix et arrimage des méthodes.....	40
4.2.2	Analyse de l'érosion des berges .....	41
4.2.2.1	Taux d'érosion et zone de mobilité.....	41
4.2.2.2	Enrochement .....	42
4.2.3	Analyse des aléas fluviaux non probabilistes.....	42
4.3	Analyse des risques.....	43
4.3.1	Dénombrement.....	43
4.3.2	Valorisation économique.....	44
4.3.3	Vulnérabilité aux impacts.....	47
4.4	Évaluation des risques .....	49

<b>5.</b>	<b>SCÉNARISATION DES STRATÉGIES D'ADAPTATION.....</b>	<b>51</b>
5.1	Scénario de référence .....	51
5.1.1	Définition du scénario de référence.....	51
5.1.2	Identification des impacts du scénario de référence .....	52
5.1.3	État de référence de l'environnement .....	53
5.2	Composition d'un scénario d'adaptation .....	55
5.3	Inventaire des mesures.....	57
5.3.1	Digues.....	58
5.3.2	Dragage.....	58
5.3.3	Enrochement (avec végétalisation ou phytotechnologie) .....	58
5.3.4	Bassin de rétention .....	59
5.3.5	Bassin de rétention surdimensionné .....	59
5.3.6	Gestion des barrages.....	59
5.3.7	Système de prévision et d'alerte.....	60
5.3.8	Relocalisation des propriétés résidentielles, commerciales et/ou institutionnelles .....	60
5.3.9	Immunisation individuelle des bâtiments.....	60
5.3.10	Adaptation des pratiques agricoles et aménagements hydro-agricoles.....	60
5.3.11	Restriction des cultures permises dans la zone inondable .....	61
5.3.12	Milieux humides .....	61
5.3.13	Bandes riveraines.....	61
5.3.14	Espace de mobilité ou corridor inondable .....	62
5.4	Identification Des retombées anticipées des mesures.....	62
5.5	co-construction d'un scénario d'adaptation .....	62
5.6	Estimation des coûts d'implantation des scénarios .....	64
5.7	Présentation des scénarios .....	67
5.8	Estimation de l'efficacité des scénarios .....	69
5.8.1	Mesures visant un contrôle de l'aléa d'inondation .....	69
5.8.2	Scénario visant un contrôle de l'exposition et/ou de la vulnérabilité.....	69
5.9	Création d'une matrice des impacts des scénarios.....	70

<b>6.</b>	<b>RÉALISATION DES ANALYSES COÛTS-AVANTAGES.....</b>	<b>73</b>
6.1	Mécanique générale .....	73
6.2	Monétisation des impacts des scénarios.....	74
6.2.1	Coûts liés aux inondations .....	74
6.2.1.1	Courbe de profondeur d'eau-dommages.....	79
6.2.1.2	Courbe de profondeur d'eau-durée .....	80
6.2.1.3	Domage annuel pondéré .....	83
6.2.1.4	Transfert de valeur.....	84
6.2.2	Coûts liés à l'érosion.....	86
6.2.3	Bénéfices écosystémiques.....	87
6.2.4	Bénéfices connexes.....	90
6.3	Calcul des indicateurs économiques.....	90
6.4	Présentation des résultats .....	91
6.5	Analyses complémentaires .....	93
6.6	Analyses de sensibilité .....	93
6.6.1	Analyse de redistribution par catégories d'acteurs.....	95
6.6.2	Analyse des enjeux et risques résiduels .....	96
<b>7.</b>	<b>DISCUSSION ET CONCLUSION DE L'ÉTUDE .....</b>	<b>98</b>
<b>8.</b>	<b>TRANSFERT DE CONNAISSANCES .....</b>	<b>100</b>
8.1	Mobilisation des connaissances : un processus en continu.....	100
8.2	Accessibilité numérique et interopérabilité .....	101
8.2.1	Scénarios climatiques (PAVICS) .....	101
8.2.2	Modélisation hydrologique (SWAT).....	101
8.2.3	Modélisation hydraulique (HEC-RAS).....	101
8.2.4	Modélisation géostatistique des niveaux d'eau (Python) .....	101
8.2.5	Cartographies (ArcGIS ou QGIS).....	102
8.2.6	Analyses des services écosystémiques (InVEST) .....	102
8.2.7	Analyse économique (R).....	102

<b>9.</b>	<b>CONCLUSION</b> .....	<b>103</b>
9.1	Perspectives.....	104
	<b>RÉFÉRENCES</b> .....	<b>107</b>
	<b>ANNEXES</b> .....	<b>114</b>

# GLOSSAIRE

<b>Termes économiques</b>	
Analyses coûts-avantages (ACA)	Comparaison de différents scénarios sur la base du ratio avantages-coûts en valeurs actualisées.
Bénéfice connexe	Bénéfices indirects liés à une mesure (par exemple, bénéfices de récolte ou d'usage des milieux naturels).
Coûts d'opportunité	Coût de renonciation d'un bien ou d'une activité suite à une décision.
Ratio avantages-coûts (A/C)	Division des avantages (bénéfices) par les coûts, en valeur actualisée
Taux d'actualisation	Taux auquel les valeurs se déprécient à travers le temps.
Valeur actuelle nette (VAN)	La somme des valeurs présentes et futures actualisées.
<b>Termes hydrologiques</b>	
Amont	Partie d'un cours d'eau situé en direction de la source face à un point donné.
Aval	Partie d'un cours d'eau situé en direction de son écoulement face à un point donné.
Bassin Versant	Territoire drainé par un fleuve et ses affluents.
Coefficient de rugosité	Représente la résistance d'un tronçon à l'écoulement de l'eau.
Période de retour	Probabilité d'un territoire d'être inondé sur une échelle temporelle (2 ans : 50% de chances, 20 ans : 5%).
Débit de crue	Projection et probabilité d'occurrence de débit d'un cours d'eau lors de crues.
Embouchure	Lieu où un cours d'eau se jette dans un plan d'eau.
Réurrence	Probabilité d'observer un événement à travers le temps.
Station hydrométrique	Dispositif permettant un enregistrement en continu du débit d'un cours d'eau.
<b>Termes technologiques</b>	
Lidar	Technique de mesure de distances utilisant la réception d'un laser par son émetteur.

Systeme de référence géodésique	Un point à partir duquel on détermine la latitude et longitude des autres points de la surface terrestre.
<b>Termes mesures d'adaptation</b>	
Aléas	Événement météorologique imprévisible comprenant un facteur de risque.
Bande riveraine végétalisée	Lisière végétale permanente et variée longeant un cours d'eau.
Biodiversité	Diversité des espèces vivantes dans un milieu.
Immunsation	Adapter les structures humaines pour prévenir les conséquences des aléas fluviaux.
Infrastructure grise	Infrastructure basée sur des technologies, du bâti ou des activités humaines et n'impliquant pas la nature (barrage, muret, digue, etc.).
Infrastructure verte	Réseau constitué entre autres de zones naturelles et semi-naturelles faisant l'objet d'une planification stratégique. Ce réseau est conçu et géré aux fins de la production d'une gamme de services écosystémiques et intègre des espaces verts ou aquatiques et d'autres éléments physiques des zones terrestres (UICN France, 2018).
Phytotechnologie	Utilisation de plantes pour résoudre des problèmes environnementaux.
Relocalisation stratégique	Déplacement de bâtiments résidentiels ou commerciaux pour éviter les aléas.
Végétalisation	Rendre le couvert végétal sur un territoire dénudé par l'intervention humaine.
<b>Termes liés aux aléas</b>	
Cônes alluviaux	Amas de sédiments entraînés par un cours d'eau accumulé à la base d'une pente abrupte.
Embâcles	Accumulation de morceaux de glaces sur un cours d'eau, bloqués par des obstacles naturels ou humains.
Érosion	Transformation de la couche terrestre face au passage des eaux.
Résilience	Capacité de surmonter et de s'adapter aux aléas.
Submersion	Lorsque les rives d'un plan d'eau ou d'un cours d'eau se retrouvent sous le niveau de l'eau.
Surverse	Dispositif pour l'évacuation par débordement d'un bassin ou d'une cuve.
Avulsion	Changement soudain du tracé du cours d'eau souvent associé par un épisode de pluie torrentielle.

## Termes environnementaux

Berge ou rive	Territoire longeant un cours d'eau.
Biodiversité	Diversité des espèces vivantes sur un territoire.
Cours d'eau	Masse d'eau accumulée dans une dépression longitudinale et qui s'écoule dans une direction perceptible.
Domaine hydrique	Territoire recouvert d'une masse d'eau appartenant à une entité publique.
Fossé	Bande de terrain affaissée ou creusée permettant l'écoulement des eaux.
Marais	Étendue d'eau envahie en grande partie de végétation.
Plaine inondable	Basses terres pouvant être inondées de façon récurrente, que ce soit par l'effet des marées ou d'aléas hydriques.
Services écosystémiques	Bénéfices offerts aux communautés par les écosystèmes.
Talus	Terrain en forte pente souvent créé par des travaux de terrassement et pouvant border un fossé.
Tourbe	Matière spongieuse engendrée par la décomposition de matières végétales.
Tourbière	Marécage acide où se forme la tourbe.

# LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

<b>ACA</b>	Analyse coûts-avantages
<b>ACP</b>	Assemblée consultative de priorisation
<b>AD</b>	Aire de diffusion, soit une subdivision territoriale du Recensement de Statistique Canada et la plus petite unité géographique dont les données sont divulguées
<b>CC-HHH</b>	Chaîne de modélisation changements climatiques / hydrologie / hydraulique/hydrogéomorphologique
<b>COBARIC</b>	Comité de bassin de la rivière Chaudière
<b>COGESAF</b>	Conseil de gouvernance de l'eau des bassins versants de la rivière Saint-François
<b>CLS</b>	Comité local de suivi
<b>INRS</b>	Institut national de recherche scientifique
<b>InVEST</b>	Logiciel de modélisation des impacts aux services écosystémiques (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs)
<b>m<sup>3</sup>/s</b>	Mètres cubes par seconde, notamment utilisé pour quantifier les débits d'eau
<b>MELCC</b>	Ministère de l'Environnement et de la Lutte aux changements climatiques
<b>MDDEFP</b>	Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (maintenant MELCC)
<b>MTQ</b>	Ministère des Transports du Québec
<b>SWAT</b>	Modèle hydrologique spatialisé (Soil Water Assessment Tool)
<b>MRC</b>	Municipalité régionale de comté
<b>PRMH</b>	Plan régional sur les milieux humides et hydriques
<b>ROBVQ</b>	Regroupement des organismes de bassins versants du Québec
<b>Scénario MHH_eff</b>	Scénario d'adaptation avec corridor riverain
<b>Scénario PRA</b>	Scénario d'adaptation des pratiques agricoles
<b>Scénario SQ</b>	Scénario d'adaptation de statu quo
<b>Scénario MHH_acc</b>	Scénario d'adaptation sans perte nette de milieux humides



<b>Scénario IMM_coll</b>	Scénario d'adaptation utilisant l'immunisation à l'aide de digues
<b>Scénario IMM_ind</b>	Scénario d'adaptation utilisant l'immunisation des bâtiments
<b>VAN</b>	Valeur actuelle nette



## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1.</b>	Adaptation de la norme internationale ISO 31000 - gestion du risque (ISO, 2018)	6
<b>Figure 2.</b>	Synthèse du design général de l'étude	11
<b>Figure 3.</b>	Processus de mobilisation dans le cadre d'une ACA, succession des rencontres et contenu	26
<b>Figure 4.</b>	Organisation et contenu des différents ateliers de l'ACP dans le cadre du projet d'ACA	28
<b>Figure 5.</b>	Résumé du processus d'analyse de risque multi-aléas basé sur une chaîne de modélisation hydrologique-hydraulique et hydrogéomorphologique	30
<b>Figure 6.</b>	Modèles InVEST utilisés pour établir l'état de référence de l'environnement, paramètres d'entrée et sources de données	55
<b>Figure 7.</b>	Catégories et exemples de mesures d'adaptation (GIEC, 2014)	56
<b>Figure 8.</b>	Exemple de processus de co-construction des scénarios d'adaptation	57
<b>Figure 9.</b>	Mécanique générale du traitement des secteurs d'impacts	73
<b>Figure 10.</b>	Illustration d'une courbe probabilité-dommage	74
<b>Figure 11.</b>	Courbe de profondeur d'eau-dommages pour une résidence à un étage avec sous-sol fini	79
<b>Figure 12.</b>	Courbe de profondeur d'eau-durée d'évacuation des résidents	81
<b>Figure 13.</b>	Comparaison des coûts et avantages actualisés (RCP 4.5), étude de cas de Compton	93



# LISTE DES TABLEAUX

---

<b>Tableau 1.</b>	Liste synthétique des impacts utilisés pour les ACA inondations et risques fluviaux .....	7
<b>Tableau 2.</b>	Probabilités de dépassement annuel choisies pour les deux études de cas .....	33
<b>Tableau 3.</b>	Appui à l'identification des méthodes de modélisation de l'aléa pouvant être employées dans le cadre d'une ACA.....	41
<b>Tableau 4.</b>	Exemple de dénombrement et valorisation des actifs et activités à risque .....	46
<b>Tableau 5.</b>	Liste des indicateurs permettant le calcul des indices de sensibilité et de capacité à faire face.....	47
<b>Tableau 6.</b>	Matrice de risque multi-aléas .....	49
<b>Tableau 7.</b>	Liste d'impacts par secteur, par aléa fluvial .....	52
<b>Tableau 8.</b>	Coûts unitaires des mesures et coûts d'opportunité, tirés des deux études de cas .....	65
<b>Tableau 9.</b>	Nomenclature et pictogramme des scénarios d'adaptation des études de cas	68
<b>Tableau 10.</b>	Résumé des impacts anticipés de chacun des scénarios par rapport au scénario de référence.....	71
<b>Tableau 11.</b>	Méthodes de quantification et paramètres de la monétisation des coûts liés aux inondations, par type d'impact.....	76
<b>Tableau 12.</b>	Source des courbes de profondeur d'eau-dommages et documents méthodologiques.....	80
<b>Tableau 13.</b>	Exemple de pondération de la perte de rendement et du coût de nettoyage agricole .....	83
<b>Tableau 14.</b>	Exemple de calcul de dommages pondérés, par culture en rotation..	84
<b>Tableau 15.</b>	Valeur monétaire estimée par type de coûts associés au impacts psycho-sociaux par sinistré .....	85
<b>Tableau 16.</b>	Valeur estimée pour le nettoyage des débris des quartiers résidentiels.. .....	85

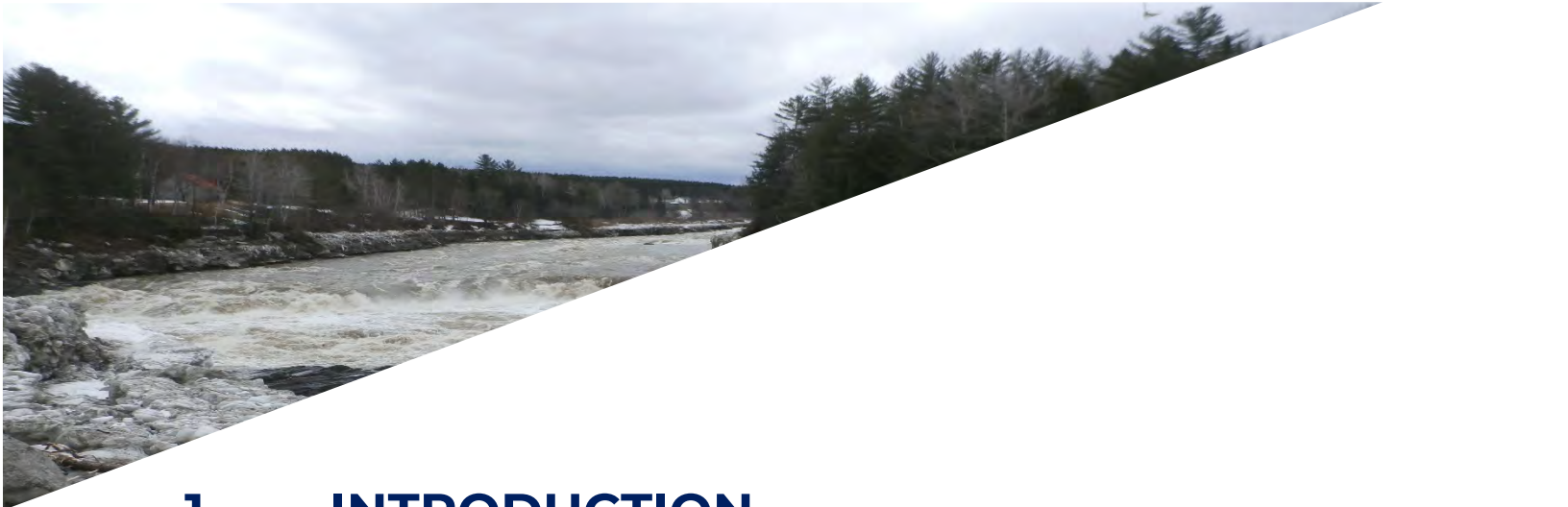
<b>Tableau 17.</b>	Méthode de quantification et paramètres pour la monétisation des coûts liés à l'érosion .....	86
<b>Tableau 18.</b>	Méthode de quantification et paramètres pour la monétisation des services écosystémiques.....	89
<b>Tableau 19.</b>	Valeur actuelle des coûts et avantages de STA-DG, par rapport au scénario de référence (\$ 2019) .....	92
<b>Tableau 20.</b>	Paramètres des analyses de sensibilité et valeurs à tester des études de cas .....	94
<b>Tableau 21.</b>	Analyse de redistribution entre les acteurs, étude de cas de la rivière Chaudière .....	96
<b>Tableau 22.</b>	Analyses des risques et enjeux résiduels, étude de cas de la rivière Chaudière .....	97



# LISTE DES ANNEXES

---

<b>ANNEXE A</b> – COMPLÉMENTS AU CHAPITRE 3 : MOBILISATION DES PARTIES PRENANTES .....	<b>115</b>
<b>ANNEXE B</b> – COMPLÉMENTS AU CHAPITRE 5 : SCÉNARISATION DES STRATÉGIES D'ADAPTATION.....	<b>118</b>
<b>ANNEXE C</b> – COMPLÉMENTS AU CHAPITRE 6 : RÉALISATION DES ANALYSES COÛTS-AVANTAGES .....	<b>124</b>
<b>ANNEXE D</b> – APPROCHE ACTUARIELLE APPLIQUÉE AU CALCUL DES DOMMAGES STRUCTURELS AUX RÉSIDENCES, ÉTUDE DE CAS DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE CHAUDIÈRE .....	<b>126</b>
<b>ANNEXE E</b> – PROGRAMMES UTILISÉS DANS LA MODÉLISATION DES ALÉAS FUTURS (CHAPITRE 4) .....	<b>135</b>



# 1. INTRODUCTION

---

## 1.1 MISE EN CONTEXTE GÉNÉRALE

*Les analyses coûts-avantages (ACA) pour soutenir des décisions complexes.* Au Québec, les inondations fluviales et autres aléas associés aux événements hydrométéorologiques constituent une problématique multidimensionnelle complexe (voir section 1.2). Des décisions s'imposent et l'analyse coûts-avantages offre un soutien à la décision qui permet d'intégrer diverses composantes d'impacts positifs ou négatifs sur une base de comparaison monétaire (voir section 1.3). Toutefois, la méthodologie doit être adaptée au contexte des inondations et aléas fluviaux, d'autant plus avec l'évolution potentielle des systèmes fluviaux qui font face aux changements climatiques et à l'évolution de l'occupation du territoire. C'est pourquoi une démarche méthodologique structurée est nécessaire.

*Objectif : Une démarche structurée, des contenus adaptables au contexte local.* Ce guide méthodologique vise ainsi à soutenir la prise de décision en guidant les décideurs et professionnels dans une démarche étape par étape pour réaliser une analyse rigoureuse de différents scénarios d'adaptation. Il a été rédigé en parallèle des projets d'analyse coûts-avantages (ACA) pour la municipalité de Compton, en Estrie ([Boyer-Villemare et al., 2021a](#)), et du bassin versant de la rivière Chaudière, dans la région de Chaudière-Appalaches ([Boyer-Villemare et al., 2021b](#)). La personne souhaitant voir une application concrète de cette méthodologie est invitée à se référer à ces deux rapports. En revanche, ce guide a une visée générale. À noter que chaque contexte a ses particularités. Elles doivent se refléter dans l'ajustement de la matrice d'impacts, ce qui requiert des compétences spécifiques selon la nature des impacts. Le cadre conceptuel du processus est décrit dans une perspective de répliquabilité. Ainsi, l'objectif en filigrane du document est de permettre d'adapter la méthode à des territoires et des problématiques distinctes et variées.

*Un guide innovant pour soutenir une vision intégrée.* Il est construit sur la méthodologie utilisée par Ouranos dans la série d'études de cas en milieu maritime au Québec et dans les provinces atlantiques. Sur ces bases, il a été adapté pour les milieux fluviaux et mis à jour avec la littérature scientifique et diverses novations dans

différents processus de sa réalisation. L'intention derrière ces développements est la prise de décision intégrée et collaborative : divers aléas, diverses catégories d'impacts, diverses stratégies pour réduire les risques ou améliorer la résilience, et les perspectives de divers acteurs à considérer. Les plus grandes avancées portent sur les éléments suivants : l'approche multi-aléas, la chaîne de modélisation changements-climatiques-hydrologique-hydraulique et hydrogéomorphologie, la quantification des impacts écosystémiques, l'intégration de fonctions d'impacts novatrices (ex. impacts psychosociaux), les analyses de distribution entre acteurs et résiduelles, ainsi que le cadre participatif général. Il serait souhaitable que, de façon périodique, ce guide soit révisé pour mieux refléter le développement des outils et des pratiques. De plus, les codes de modélisation géomatique (QGIS *model builders*) et économique (*R packages*) seront disponibles sur demande, tout comme les valeurs de référence pour le logiciel ouvert InVEST, permettant au lecteur d'appliquer plus aisément cette méthode.

*Un travail collaboratif.* Ce guide est le fruit d'un effort conjoint entre Ouranos, le Regroupement des organismes de bassins versants du Québec (ROBVQ), des partenaires du Ministère de l'Environnement et de la Lutte aux Changements climatiques (MELCC), de Ressources naturelles Canada, de différents organismes de bassins versants (OBV) locaux et de chercheurs de l'UQAM, de l'université Laval, de l'université de Sherbrooke.

## **1.2 LES RISQUES FLUVIAUX : UNE PROBLÉMATIQUE MULTIDIMENSIONNELLE ET DES DÉCISIONS COMPLEXES**

*Une problématique d'actualité au Québec.* Les inondations surviennent à diverses récurrences et selon des mécanismes variés. En 2017 et en 2019, les Québécois ont été témoins de l'ampleur que peuvent prendre les conséquences d'inondations. Ces niveaux d'eau extrêmes seront appelés à se produire de plus en plus souvent dans les décennies à venir. Il devient primordial de développer une compréhension exhaustive des mécanismes et des différentes solutions pour y faire face.

*Une dynamique multiple et complexe.* Plusieurs types d'inondations peuvent voir le jour : des inondations en eau libre, parfois en raison d'embâcles de glace ou de crues éclair, ou encore causées par une combinaison d'aléas (par exemple, les cônes alluviaux, l'érosion des berges et les avulsions soudaines de chenaux). Les rivières constituent un système dynamique qui présente une connexion entre l'amont et l'aval. Comment l'eau s'écoule-t-elle des terres en altitude vers l'océan ? Comment cet écoulement est-il influencé par la géomorphologie et les constructions humaines ? Cette dynamique varie selon le régime hydroclimatique, particulièrement en contexte de changements climatiques.

*Des dommages et conséquences variées.* Du côté de la société, les inondations entraînent des dommages importants aux biens et menacent la sécurité et l'intégrité des individus. Elles causent aussi leur lot de conséquences psychosociales sur les communautés, sur leurs activités et sur les écosystèmes. L'évaluation des impacts des changements climatiques sur ces grands regroupements constitue en soi un exercice complexe, mais nécessaire pour une prise de décision rigoureuse.

*Des choix à adapter au contexte local* Avec les années, un éventail de mesures d'adaptation a été développé. On peut situer ces mesures sur un spectre allant des mesures dites grises (infrastructures rigides) vers les mesures dites vertes (faisant appel aux écosystèmes). Alors que les premières retiennent souvent l'adhésion des décideurs et citoyens, il devient de plus en plus évident que les secondes peuvent être tout aussi efficaces. Dans cet ordre d'idées, des mesures récentes reflètent ce changement de paradigme, notamment avec les modifications réglementaires en plaine inondable (par exemple, la révision de la Politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables (MELCC, 2021a)) et l'émergence de solutions employant les milieux humides ou les espaces d'inondabilité. Le choix d'une solution (ou la combinaison de plusieurs) pour éviter ou atténuer les impacts soulève toutefois une multiplicité d'enjeux et de conséquences à intégrer dans l'équation. De façon générale, les meilleures solutions sont celles qui combinent la force de différentes mesures, adaptées à une étude de cas précise, exploitant les spécificités locales. De là, ces solutions doivent être développées en partenariat avec des acteurs divers issus du milieu.

*Entre décision collective et enjeux de distribution entre les acteurs.* Un des enjeux cruciaux dans le choix de mesures d'adaptation porte sur les contraintes liées au partage des coûts. D'une part, les coûts de réalisation des solutions d'adaptation sont élevés et dépassent la capacité individuelle, voire celle des communautés locales, de payer. D'autre part, les acteurs sont nombreux (municipal, provincial, fédéral, propriétaires privés, organisations de conservation, associations, etc.). Respectant ces contraintes, si le coût de la mesure est compensé par une réduction au moins équivalente des coûts pour les collectivités<sup>1</sup>, il est justifié de s'engager dans une action collective. Cette action collective combine les ressources et compétences des acteurs pour mener à bien une action qu'aucun n'aurait entreprise individuellement. L'adaptation des communautés aux risques d'inondations requiert une logique d'action collective, en raison de l'ampleur des coûts de réalisation et des gains anticipés pour la société.

*Besoin d'intégrer les enjeux sociaux et environnementaux.* Au-delà de l'efficacité technique et purement financière, les interventions entraînent des conséquences dans les sphères environnementales et sociales. Il devient nécessaire de développer, d'adapter, d'utiliser ou de mesurer ces conséquences dans l'analyse. Particulièrement,

---

<sup>1</sup> Ceci correspond à la définition de l'efficacité économique dans la théorie économique.



une décision holistique devrait mesurer les impacts des solutions sur les écosystèmes et les services que ceux-ci rendent aux collectivités. Une partie de ce guide présentera notamment une méthodologie à cet effet (section 5.1.3 et 6.2.3). Autrement, du côté des coûts pour la collectivité, les mesures entraînent une redistribution des gains et des pertes. Par exemple, laisser un espace d'inondabilité, comme une bande riveraine dans les secteurs à risque, revient à retirer à certains la possibilité d'utiliser leur terrain bordant un cours d'eau comme ils le souhaiteraient, faisant poser plus lourdement le fardeau de la solution sur ces individus. Ainsi, des compensations suffisantes doivent être prévues pour que les gagnants compensent les perdants. Les solutions doivent être équitables pour être viables.

*Notions d'équité.* L'équité, tel qu'entendue ici, peut prendre deux branches : l'équité intragénérationnelle de l'adaptation, soit la manière dont les mesures d'adaptation n'ont pas les mêmes effets pour tous les acteurs à une période donnée. Ensuite, l'équité intergénérationnelle est tout aussi importante. Si tous les bénéfices d'une solution sont récoltés à très court terme et que les conséquences surviennent à moyen ou long terme, ce n'est pas nécessairement optimal. Ceci est d'autant plus vrai en contexte de changements climatiques. L'équité intergénérationnelle nécessite des arrimages temporels dans les modélisations. Les solutions à mettre en place doivent prendre en compte toute cette dynamique de causes et de conséquences multidimensionnelles. Par exemple, une solution pourrait avoir un effet intéressant à court terme, mais se révéler dévastatrice à long terme. Une autre pourrait réduire les dommages aux biens, mais se répercuter de façon drastique sur le bien-être des individus. Une solution optimale est un jeu d'équilibre entre toutes ces facettes, une balle sur laquelle sont posées des dizaines de poutres et qui doivent toutes rester en place simultanément. Ce guide méthodologique et les rapports construits en parallèle cherchent à trouver cet équilibre.

**En somme, la problématique des inondations et risques fluviaux entraîne des décisions multidimensionnelles et complexes.**

### **1.3 PRINCIPES ET CONCEPTS DE L'ANALYSE COÛTS-AVANTAGES (ACA) PARTICIPATIVE POUR SOUTENIR LA PRISE DE DÉCISION FACE AUX RISQUES FLUVIAUX**

Cette section décrit les principes et concepts fondamentaux derrière la démarche originale proposée.

*Une démarche ancrée dans les meilleures pratiques :* La méthodologie proposée s'appuie entre autres sur l'analyse coûts-avantages (ACA). Elle consiste à comparer l'ensemble des avantages et des coûts de différentes options sur une base commune, exprimée en valeur monétaire. Pour ce faire, il est nécessaire de convertir ces coûts et avantages non monétaires en valeur marchande. L'ACA est couramment utilisée par

les firmes de génie-conseil, les gouvernements et les décideurs. En effet, les ressources méthodologiques disponibles sont multiples, par exemple le guide d'analyse coûts-avantages : propositions de réglementations (Secrétariat du Conseil du Trésor du Canada, 2007), *General Guidance for Cost-Benefit Analysis* du CPB Netherlands Bureau for Economic Policy Analysis (Romijn et Renes, 2013), le manuel *Flood and coastal erosion risk management- A manual for Economic Appraisal* (Penning Rowsell et al., 2013) et le rapport technique *Adapting to rising coastal flood risk in the EU under climate change* de la Commission Européenne ( Vousdoukas M. et al., 2020) pour n'en nommer que quelques-uns.

Ouranos a réalisé une série d'études dans l'est du Canada sur les solutions d'adaptation à l'érosion et la submersion côtière en s'appuyant sur la méthode d'analyse coûts-avantages ([Circé et al., 2016a](#)). Cette série d'études a permis de développer un cadre méthodologique qui intègre l'impact des changements climatiques dans l'évaluation des décisions d'adaptation. Depuis 2015, plusieurs initiatives internationales, telles que l'*Évaluation des écosystèmes pour le millénaire*, ont également permis de développer des cadres permettant de quantifier monétairement les impacts socio-environnementaux des usages du territoire. L'étude de l'adaptation aux inondations fluviales peut également être appréhendée par des analyses coûts-avantages. Entre autres, le projet [Room for the river](#) et l'étude de Kind et al. (2017) ont eu recours à des ACA pour estimer les impacts de diverses stratégies d'adaptation.

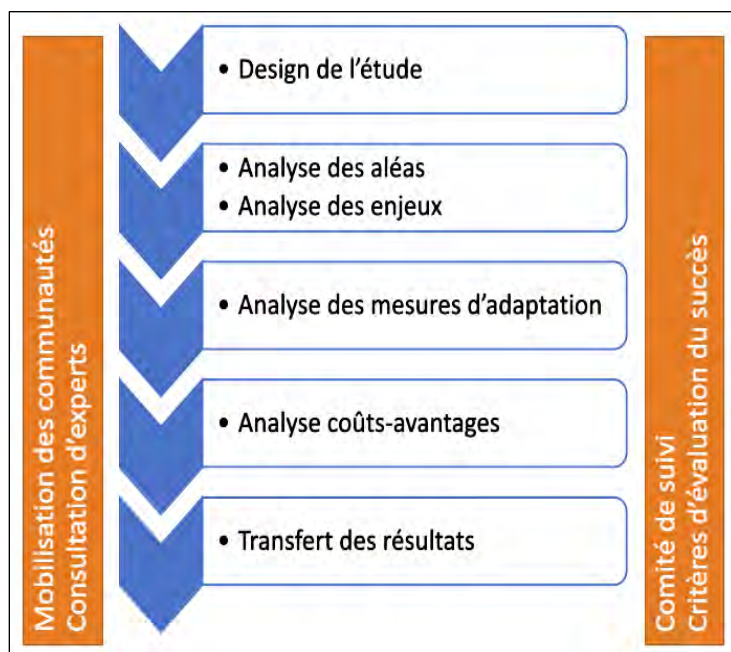
*Une démarche flexible.* La démarche proposée s'inscrit en convergence entre l'analyse économique dite traditionnelle et la démarche de réduction du risque. Généralement, les ACA permettent de comparer différents scénarios. En revanche, rien n'est dit sur la nature de ce qui est comparé, à l'exception que les éléments doivent être mis sur une base commune pour permettre leur classification. Conséquemment, l'objectif est de cerner exhaustivement les différents coûts et avantages de chaque mesure pour pouvoir les comparer. Cela souligne la flexibilité de cette évaluation économique.

*Une démarche participative pour s'adapter au contexte local.* Ici entre en ligne de compte l'importance de l'identification des parties prenantes au projet. Il est nécessaire de s'assurer que les coûts et avantages intégrés à l'analyse sont adéquats et le plus exhaustifs possible. De là l'importance du processus de mobilisation des parties prenantes, décrit dans le chapitre 4. La mobilisation des acteurs locaux n'est pas qu'un coût administratif du projet. C'est avant tout un gage de pertinence, un mécanisme de validation de la qualité, de flexibilité dans les décisions, autant qu'un atout majeur pour identifier le plus tôt possible les enjeux liés à aux perceptions, à l'acceptabilité et à la communication, qui influencent le projet et ses retombées.

*Une démarche multidisciplinaire : le défi de la mise en commun des expertises.* Telle qu'il sera décrit dans les sections suivantes, la méthodologie peut rapidement gagner en complexité. Un élément qui accentue grandement cette complexité est le besoin d'arrimer, dans un seul et même projet, différents champs de compétences distincts : la climatologie, l'hydrologie, la géomorphologie, l'économie, des sciences sociales. Chaque discipline a une importance cruciale dans la capacité à réaliser ce type d'étude, mais le pont entre chaque n'est pas toujours aisé. Ainsi, le rôle de coordination des expertises est essentiel dans un tel projet.

*Une démarche basée sur la gestion des risques.* L'analyse de risque sous-tend la démarche. La **Figure 1** rapporte l'adaptation faite de la norme internationale de gestion du risque (ISO, 2018), notamment sur la co-construction des différentes étapes des projets. L'analyse de risque développée ici se base sur les notions d'aléa et de vulnérabilité. La première fait référence à des événements météorologiques extrêmes comportant un facteur de risque et aux communautés exposées à ces aléas. La seconde se réfère à la vulnérabilité de ces communautés vis-à-vis de ces aléas.

- *L'évaluation de risques* : Après avoir cerné la zone d'étude, la première étape vise à quantifier les aléas en anticipant l'impact des changements climatiques et d'occupation du sol, puis à dénombrer les actifs et activités à risque, selon leur probabilité et la magnitude des conséquences anticipées. Cela permet de prioriser les principaux coûts à éviter et construire un scénario de référence (avec ou sans intervention).



**Figure 1.** Adaptation de la norme internationale ISO 31000 - gestion du risque (ISO, 2018)

- *L'évaluation intégrée des impacts.* À l'aide de la modélisation des aléas en climat futur, un premier scénario de référence est construit, suivant le cours actuel des choses. Si aucune modification majeure n'est faite quant à l'utilisation du territoire et à l'organisation des communautés face aux aléas, quels sont les coûts auxquels les communautés devront faire face pour une année typique exposée aux aléas fluviaux ? Ceux-ci sont divers :
  - Dommages à l'environnement bâti
  - Gestion des urgences
  - Incidences sur les activités et fonctions socio-économiques
  - Impacts environnementaux
  - Impacts psycho-sociaux

La liste complète des impacts utilisés est présentée dans le **Tableau 1**.

**Tableau 1.** Liste synthétique des impacts utilisés pour les ACA inondations et risques fluviaux

Thématique d'impact	Impacts spécifiques
Coûts liés à l'aléa	Gestion des urgences; Nettoyage des débris; Pertes de terrains ou de terres (érosion, avulsion); Dommages aux bâtiments et infrastructures; Évacuation et hébergement temporaire; Dommages aux cultures; Pertes commerciales (production, ventes, stock, revenus locatifs, etc.); Interruptions ou ralentissements routiers; Impacts socio-sanitaires et psychosociaux.
Coûts de la mesure	Coûts de conception et réalisation; Coûts d'entretien; Coûts d'opportunité
Bénéfices environnementaux (services écosystémiques)	Habitats fauniques; Qualité de l'eau; Séquestration du carbone; Pollinisation; Paysage.
Bénéfices connexes	Récolte en bandes riveraines Usage des milieux naturels

- *La co-construction des scénarios d'adaptation*. Les solutions envisagées pour éviter ces coûts reposent sur un objectif de réduction des risques, que ce soit par contrôle des aléas, réduction de la vulnérabilité ou amélioration de la capacité d'adaptation. Les scénarios d'adaptation peuvent reposer sur une combinaison de mesures d'adaptation. Pour les solutions matérielles ou d'aménagement, elles sont conçues tant du point de vue technique que de leur localisation. Autant les experts techniques que les participants locaux peuvent contribuer à la définition et la sélection de ces scénarios d'adaptation. Chacune des mesures occasionnera des coûts de mise en place (coûts de construction de digues ou d'infrastructures, coûts d'opportunité venant de la délocalisation ou de la modification des pratiques autorisées sur un territoire, etc.).
- *L'évaluation économique de l'ensemble des coûts et avantages des scénarios en comparaison avec le scénario de référence* Cette étape requiert de répéter la mécanique de l'évaluation d'impacts pour chacun des scénarios, puis de comparer leur performance économique d'abord avec le scénario de référence, puis de comparer entre eux les scénarios pour dégager le plus avantageux. Chacun des scénarios occasionne une réduction plus ou moins grande de la récurrence d'aléas ou de leur impact. Cette réduction se transpose en coûts évités (ou bénéfiques) dans l'analyse économique. Finalement, ils occasionnent également une variation plus ou moins grande des bénéfices environnementaux par rapport à l'état de référence, selon le type de mesures choisies.

*Des décisions sur le long terme grâce au principe d'actualisation* : Au cœur de l'ACA se trouve la comparaison des flux de coûts et d'avantages qui surviennent tout au long de l'horizon temporel étudié. Il est possible de rapporter ces flux en valeurs dites « actuelles » grâce à l'actualisation des flux. Cette conversion s'explique par le fait que les montants d'argent n'ont pas la même valeur à travers le temps. Pour capturer cette décroissance de la valeur à travers le temps, les coûts sont tous rapportés en valeurs actuelles nettes (VAN), permettant de comparer tous les scénarios entre eux sur cette base commune actualisée. Un taux décroissant par palier à 4% (0,04) pour la période de 2020 à 2040 et de 2% (0,02) pour la période de 2041 à 2070 a été employé. Ainsi, la décroissance de la valeur est plus prononcée au début de la période (Weitzman 1994; 1998).

*Deux indicateurs économiques pour soutenir la prise de décision*. L'actualisation des flux au moment présent permet ensuite de calculer les deux indicateurs qui serviront à déterminer le scénario à privilégier : la VAN du scénario d'adaptation par rapport au scénario de référence et le ratio coûts-avantages (Ratio AC).  $i_{sa}$   $i_{sq}$  Lorsque la VAN du scénario d'adaptation par rapport au scénario de référence et le Ratio A/C permettent de cibler un scénario avantageux, celui-ci est directement rapporté dans les recommandations. Lorsque les deux indicateurs entrent en contradiction (par exemple, le ratio A/C privilégie un scénario différent de la VAN), le résultat de la VAN

sera considéré en priorité. Finalement, cette classification des différents scénarios étudiés, en fonction de leurs rendements anticipés, est couplée d'une analyse plus fine quant aux tenants et aboutissants de chacun. Conséquemment, les résultats seront décortiqués, permettant une prise de décision éclairée.

## 1.4 AVANTAGES, LIMITES ET BONIFICATIONS DE L'ACA

*L'avantage de la comparaison sur une base unique* La grande force de l'analyse coûts-avantages est de permettre de comparer plusieurs types de projets et d'options selon une multiplicité d'enjeux. Notamment, il est possible d'inclure les services écosystémiques (par exemple, la séquestration du carbone, la pollinisation des productions agricoles, les loisirs et la purification de l'eau) dans l'analyse. La notion d'équité intergénérationnelle et de temporalité se prête parfaitement à l'exercice. Finalement, différentes perspectives peuvent se côtoyer dans l'analyse : niveau de gouvernement, effets de juridictions, etc.

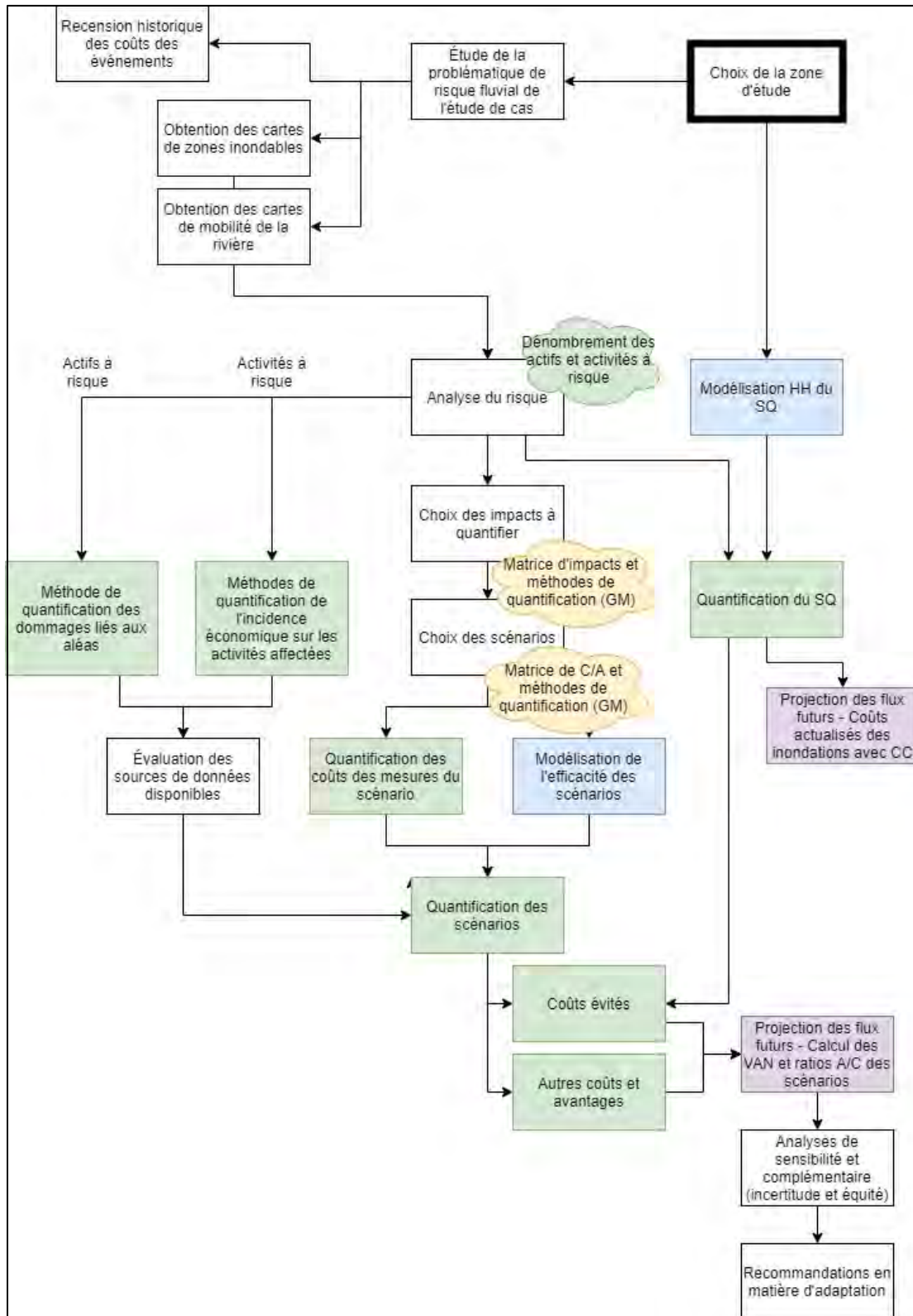
*La limite des intangibles.* Toutefois, il est plus ardu d'y inclure les intangibles et les conséquences subjectives ou complexes à chiffrer (bien-être, détresse, etc.). Par exemple, si le dénominateur commun sur lequel les conséquences et avantages sont comparés est l'argent, il peut sembler hasardeux de monétiser des variations de stress. Certaines techniques le permettent et la littérature recensée pour ces projets sera présentée.

*La limite de l'acceptabilité.* De plus, les ACA peuvent soulever des enjeux d'acceptabilité sociale des solutions. En effet, les mesures entraînent presque systématiquement des gagnants et des perdants. Personne ne veut subir les effets négatifs des mesures, mais tous souhaitent en récolter les bénéfiques. C'est le syndrome Pas dans ma cour (*NIMBY problem*) ou encore le dilemme du volontaire. Ainsi, en mettant en lumière l'existence d'une solution collectivement avantageuse mais qui comporte des effets locaux néfastes (NIMBY), les ACA soulèvent des enjeux d'acceptabilité sociale sans nécessairement se prononcer sur les mécanismes locaux de compensation.

*La bonification par la démarche itérative et collaborative.* À la vue de ces limites, ce guide propose une ACA bonifiée. La démarche se base sur un système adaptatif et collaboratif. Il s'inscrit dans une logique d'action collective pour régler la problématique de manière durable. Toutes les phases du projet d'intervention sont réalisées avec les parties prenantes dans l'objectif de broser un portrait réaliste de la situation et des solutions. Ainsi, les solutions sont beaucoup plus susceptibles d'être endossées par les communautés. Cette réalisation se fait à l'aide de processus délibératifs et participatifs, désamorçant les critiques que peuvent subir les ACA plus traditionnelles. De plus, la méthodologie développée ici permet de cibler les gagnants et les perdants et un niveau de compensation optimal pour la pleine réalisation des retombées souhaitées.

## 1.5 RÉPRÉSENTATION DU FLUX DE TRAVAIL

La **Figure 2** représente de façon plus détaillée cette procédure. En commençant en haut à droite dans le choix de la zone d'études, on scinde déjà la méthodologie en deux segments. Le premier, de nature plus hydrologique, hydrique et climatique vise à modéliser les dynamiques fluviales du scénario de référence (SQ). On cherche à développer une image future des aléas, suivant le cours actuel des choses. Un second, de nature plus économique, permet de cibler les actifs et activités actuellement à risque de subir les conséquences des aléas. Ces deux intrants permettent de quantifier le SQ. Les deux chemins peuvent être réalisés en parallèle, bien qu'il est préférable que la modélisation hydrologique-hydraulique (HH) soit réalisée *a priori*. L'analyse se concentre ensuite sur la modélisation et la quantification des différents scénarios d'adaptation, pour permettre de les comparer.



**Figure 2.** Synthèse du design général de l'étude



## 1.6 TABLE DES MATIÈRES GÉNÉRIQUE

En résumé, l'ensemble du projet se résume en cinq grandes phases. Elles constituent le squelette de la démarche, abordées dans chacun des chapitres de ce guide. En voici la représentation sous forme de table des matières générique :

1. Introduction
  - a. La problématique
  - b. L'objectif
  - c. Les partenaires
  - d. Le contenu du document
2. Design de l'étude (voir chapitre 2)
  - a. Délimiter géographiquement la zone d'étude et l'horizon temporel visé.
  - b. Répertorier les bases de données climatiques, hydrologiques, géospatiales, géomorphologiques et économiques nécessaires et vérifier leur disponibilité.
  - c. Décrire le milieu physique, l'utilisation du sol et le milieu humain de la zone d'étude, à partir des bases de données disponibles et des connaissances locales.
3. Mobilisation des parties prenantes (voir chapitre 3)
  - a. Rôles, composition et relation entre les groupes.
  - b. Planification des activités.
4. Analyse de risque basée sur une approche multi-aléas (voir chapitre 4)
  - a. Identification des risques par l'analyse des aléas.
  - b. Analyse des risques par le dénombrement des actifs et activités exposés et leur vulnérabilité.
  - c. Évaluation du risque par la matrice multirisque.
5. Co-construction des scénarios (voir chapitre 5)
  - a. Définir le scénario de référence et ses impacts.
  - b. Définir l'état de référence de l'environnement.
  - c. Identifier les scénarios d'adaptation aux aléas fluviaux, en combinant des mesures visant une réduction des risques et impacts du scénario de référence.
  - d. Quantifier le coût de mise en œuvre des scénarios.
  - e. Modéliser l'effet de chaque scénario sur les aléas.
6. Analyse coûts-avantages (ACA) et analyses complémentaires (voir chapitre 6)
  - a. Calculer les flux annuels de coûts et avantages du scénario de référence.
  - b. Calculer les flux annuels des coûts et avantages de chaque scénario.
  - c. Calculer la valeur actuelle nette de chaque scénario, par rapport au scénario de référence.
  - d. Réaliser certaines analyses complémentaires (ex. analyse de sensibilité, analyse de redistribution, analyse qualitative des enjeux résiduels).

- e. Selon les résultats de l'ACA, énoncer une ou plusieurs recommandations.
7. Discussion et conclusion (voir chapitre 7)
  - a. Interpréter les leçons de l'analyse de risque.
  - b. Interpréter les leçons de l'analyse économique.
  - c. Identifier les limites et sources d'incertitudes.
  - d. Résumer les conclusions générales.

## **1.7 CONTENU DU GUIDE**

Chacun des chapitres de ce guide couvre les grandes étapes de l'étude, en expliquant les contenus et leur méthodologie, en exposant les choix et leurs options, et en fournissant certains exemples issus des rapports régionaux.

- Le design général de l'étude est présenté dans le chapitre 2.
- Le chapitre 3 détaille la méthodologie employée pour la mobilisation des parties prenantes à l'étude de cas.
- L'analyse de risque se trouve au chapitre 4
- La co-construction des scénarios d'adaptation suit au chapitre 5.
- Le chapitre 6 permet de détailler la méthodologie propre à la réalisation des analyses coûts-avantages.
- Le chapitre 7 aborde la discussion et conclusion des résultats.

Enfin, le transfert des connaissances (chapitre 8) et une conclusion (chapitre 9) clôturent le document.



## 2. INTRODUCTION ET DESIGN DE L'ÉTUDE

L'introduction vise à décrire le contexte de l'étude, l'objectif, les partenaires et annoncer le contenu de l'étude.

- La problématique
  - En un paragraphe, exposer le contexte de l'étude, quelle(s) problématique(s) historiques ou exceptionnelles justifient les efforts déployés dans cette étude.
- L'objectif
  - En une phrase, exposer le but principal de cette étude, ex. de comparer des options sur une base économique pour répondre à la problématique, dans une région donnée.
- Les partenaires
  - Exposer les principaux collaborateurs et bailleurs de fonds qui contribuer à mener ce projet.
- La méthodologie générale
  - Résumer la méthode, ex. l'approche d'analyse coûts-avantages basée sur la gestion des risques dans un contexte de changements climatiques, selon une approche participative.
- Le contenu du document
  - Annoncer chacun des chapitres.

Ensuite, le design de l'étude décrit dans cette section vise une mise en contexte. Il permettra aux lecteurs et aux parties prenantes de bien comprendre les dynamiques menant au risque d'aléas ainsi que les contraintes du projet (temps, espace, indicateurs économiques). De façon générale, il s'agit d'un premier tour de roue de la problématique et de ses conséquences permettant de mettre en contexte les modélisations et estimations développées dans le cadre du projet.

## 2.1 CARACTÉRISATION

Le premier jalon d'un projet d'ACA en risques climatiques est de bien cerner la zone d'étude. Cette caractérisation a deux vocations générales :

- 1- Bien délimiter le territoire à l'étude. Ainsi, les différentes équipes et parties prenantes au projet seront à même de cibler adéquatement les problématiques et les solutions.
- 2- Offrir une vue d'ensemble des différents paramètres pouvant jouer un rôle important dans l'étude. Par exemple, il est crucial de caractériser la géomorphologie influençant les dynamiques hydriques du territoire, de recenser les activités et communautés humaines s'y trouvant et de souligner l'historique des aléas vécus dans le passé.

### 2.1.1 Localisation

La première question à aborder est indubitable le lieu. Où se trouve le territoire à risque d'aléas ? Quelles en sont les limites ? Est-ce que le territoire est composé d'une seule entité politique (municipalité) ou de nombreuses (municipalités, municipalités régionales de comté (MRC), régions administratives, provinces, etc.) ? Il est à noter qu'un plus grand nombre d'entités politiques multiplie la complexité du projet, notamment sur la diversité des parties prenantes et de la difficulté d'acceptabilité et d'application des scénarios préconisés. Cette phase de caractérisation permet aussi de cibler les groupes qui devront être inclus dans la mobilisation des parties prenantes (chapitre 4).

Dans la même veine, il importe de bien décrire la dimension physique du territoire ciblé. Si le projet cible un segment d'une rivière ou l'ensemble d'un bassin versant, les dynamiques menant aux aléas, les mesures d'adaptation et l'interaction entre chacune d'elles seront fondamentalement différentes. En ciblant une municipalité, la lentille est beaucoup plus précise et les hypothèses sont potentiellement moins grandes, mais la capacité d'action sur la réduction des risques d'aléas est potentiellement plus limitée. Le carré de sable dans lequel le projet sera construit doit être bien défini.

Le territoire à l'étude étant bien défini, il est possible de spécifier la zone fluviale qui devra faire l'objet d'une modélisation. En effet, pour estimer l'impact des inondations sur les communautés dans les décennies à venir, il est incontournable de commencer par modéliser ces inondations futures. L'obtention de données hydriques sur cette zone est primordiale : sans données, la modélisation ne peut avoir lieu. Ces données peuvent provenir de sources diverses, notamment de stations hydrométriques ou de données colligées par des organisations ou chaires de recherche.

Avec le territoire et la zone de modélisation fluviale ainsi déterminés, l'étape suivante est d'ouvrir les horizons et d'élargir la lunette. La zone d'étude pourrait, voire devrait, s'étendre au-delà de la stricte zone de modélisation fluviale. De nombreux impacts indirects des inondations auront lieu à l'extérieur de cette zone. Parmi d'autres, ces impacts indirects pourraient être sur le réseau routier, intimement lié aux activités économiques du territoire à l'étude, de même que les conséquences sur les écosystèmes et les services qu'ils rendent aux activités humaines. Y a-t-il lieu d'élargir la zone de prise de décision ?

## **2.1.2 Milieu physique**

Suivant une bonne spécification du milieu géographique faisant partie de l'étude, la caractérisation du milieu physique ou géomorphologique doit être présentée. Un cours d'eau est le résultat de l'écoulement de masse d'eau de l'amont vers l'aval. Entre la source et l'embouchure du cours d'eau, bon nombre de caractéristiques influenceront cet écoulement : le type de sol et la pente du cours d'eau, mais aussi ceux de ses tributaires et des territoires avoisinants le cours d'eau. Par exemple, un cours d'eau avec un faible dénivelé entouré de montagnes escarpées sera plus sujet aux inondations, puisque toute la masse d'eau contenue dans ces montagnes ruissèlerait vers le cours d'eau lors de précipitation ou de crues printanières. Ces effets d'entonnoirs sont très souvent la source des inondations. Finalement, certains sols sont plus poreux ou alors que d'autres sont perméables, accélérant le ruissellement des territoires avoisinants vers la rivière.

Toutes ces caractéristiques physiques du milieu à l'étude permettent aux équipes de projet, aux lecteurs et aux parties prenantes de bien comprendre toutes les mécaniques des aléas dans la zone d'étude. Chaque engrenage peut être source de risque ou, à l'inverse, d'inspiration pour les mesures permettant d'atténuer les risques. Cette caractérisation permet de comprendre dans quel contexte physique se trouvent les communautés.

Différents rapports du ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, du ministère des Ressources naturelles, publiés par les municipalités ou les différents organismes partenaires du Regroupement des organismes de bassins versants du Québec sont des exemples de sources où peuvent être puisées ces informations.

### **2.1.3 Utilisation du sol**

L'utilisation du sol est la caractéristique principale d'une parcelle de territoire étudiée. Elle peut prendre plusieurs formes (forêt mature, arbustes, milieux humides et hydrique, points d'eau, constructions humaines, etc.). Toutes ces possibilités d'utilisation du sol influencent l'écoulement de l'eau sur le territoire, tel que décrit plus haut, mais pousseront l'analyse un cran plus loin.

Effectivement, si la caractérisation du milieu physique se basait notamment sur des rapports déjà existants, la caractérisation de l'utilisation du sol fera appel à des données géospatiales intégrés à des logiciels d'analyses de ce type de données (ArcGIS, QGIS, R, Python, etc.). Ces données permettront de décrire le territoire à l'étude, mais seront particulièrement importantes dans la modélisation des aléas (chapitre 5.2) et l'estimation des bénéfices du scénario de référence et des scénarios d'adaptation sur les services écosystémiques (chapitres 6.1.3 et 7.2.3)

### **2.1.4 Milieux humains et population d'intérêt**

Les emplois et revenus des citoyens sont grandement liés à l'usage du sol. Ainsi, les économies et activités peuvent directement subir les conséquences des aléas climatiques. Avant de faire un dénombrement plus ample des différents actifs et activités à risque, une caractérisation générale du milieu humain permet de mettre cartes sur table quant aux répercussions potentielles des aléas. Une économie locale grandement basée sur un secteur fortement ébranlé par les aléas, par exemple l'agriculture ou l'exploitation des ressources naturelles, aura des impacts importants sur l'économie locale. Les différents secteurs économiques ne subiront pas les aléas de la même manière et ne sont pas aussi prompts à l'adaptation les uns que les autres. Les mesures d'adaptation devront tenir compte de ces spécificités.

Autrement, les caractéristiques démographiques de la population, l'état du réseau routier et des infrastructures publiques, de même que l'état des bâtiments résidentiels et commerciaux, peuvent aussi être abordés ici. De façon générale, si la description du milieu physique et de l'utilisation du sol permet de bien comprendre le contexte dans lequel évolue les communautés humaines, il convient maintenant d'avoir un portrait juste de ces communautés.

La [banque de données des statistiques officielles sur le Québec de l'Institut de la statistique du Québec](#) permet de broser un portrait exhaustif des milieux humains compris sur le territoire d'étude.

## 2.1.5 Historique des problématiques liées à la rivière

À ce stade-ci, le projet a permis de comprendre quelle est la dynamique physique et les communautés qui se trouvent dans une zone d'étude déterminée. La suite logique est d'avoir un portrait historique des aléas liés au cours d'eau. Est-ce que les inondations sont fréquentes ? Quelle en est la principale cause (crues printanières, embâcles, etc.) ? Comment évolue les aléas à travers le temps : sont-elles de plus en plus fréquentes ou, au contraire, semblent-elles s'atténuer avec les années ? Est-ce qu'une mesure d'adaptation passée, par exemple la construction d'un barrage ou la mise sur pieds de digues, semble avoir un effet sur la fréquence des aléas ?

Pour broser ce portrait historique, [le Centre d'expertise hydrique du Québec](#) permet d'accéder aux débits historiques des différentes stations hydrométriques, partout sur le territoire québécois. Il est possible de cibler les événements extrêmes grâce à cette base de données. De façon complémentaire, le ministère de la Sécurité publique publie l'[historique des événements de sécurité civile](#) où sont répertoriées, entre autres, les inondations auxquelles sont jointes les niveaux de sévérité et la localisation précise. Cette base de données, de laquelle il est possible d'extraire les municipalités à l'étude, permettent de voir clairement la fréquence des aléas passés et leur évolution.

## 2.2 HORIZON TEMPOREL

La photo actuelle et passée de l'état des lieux étant bien décortiquée, la question qui vient clore le design de l'étude est le choix de l'horizon temporel modélisé. Est-ce que l'étude devra broser le portrait des 10 prochaines années ou bien du demi-siècle à venir ? Est-ce qu'il existera une séquence d'horizons distincts ? Par exemple, il est possible qu'il y ait un horizon de court ou moyen termes, complété d'un autre de long terme. La modélisation de ce dernier sera plus sujette à l'incertitude, mais pourrait comprendre l'impact des changements climatiques dans un horizon plus lointain, appelés à s'accroître à cause d'un effet multiplicateur d'interactions entre différentes causes des changements climatiques.

Dans la même veine, il est possible qu'il y ait différents horizons d'actualisation des valeurs monétaires futures, tel que décrit dans le chapitre 2.2. Si différents horizons temporels sont employés pour la modélisation hydrologique et hydrique et pour l'actualisation des valeurs monétaires futures intégrées aux calculs des VAN, il est important de faire concorder ces horizons temporels pour une harmonisation des modélisations. Par exemple, si la modélisation hydrique a comme horizon temporel 2026 – 2040 et 2041 – 2055, les horizons économiques devraient être les mêmes.

## 2.3 PARAMÈTRES ÉCONOMIQUES

### 2.3.1 Taux d'actualisation

La méthode utilisée pour agréger les avantages et les coûts liés à un scénario d'adaptation donné sur l'horizon temporel considéré est l'actualisation. Elle permet de ramener les valeurs considérées pour chacune des années sur une même base à l'aide d'un facteur d'actualisation, selon la formule ci-dessous :

$$VAN = \sum_{t=0}^{T=50} \frac{Montant_t}{(1+\tau)^t} \quad (1)$$

Où :

*VAN* : Valeur actuelle nette

*Montant* = flux monétaire (somme des avantages et coûts) à l'année *t*

*t* : période à laquelle le flux monétaire est observé

$\tau$  : taux d'actualisation

Le taux d'actualisation représente le coût d'opportunité des fonds engagés tout au long de l'horizon considéré. Un taux d'actualisation plus élevé signifie que la valorisation des coûts et avantages futurs est moindre.

Dans la présente étude, un taux d'actualisation régressif a été choisi : 4 % pour les premiers 30 ans, suivi de 2 % pour les derniers 20 ans. Il s'agit d'une approche recommandée par plusieurs auteurs (Montmarquette et Scott, 2007; Cropper, 2012; Gollier, 2011; Arrow et al., 2014), pour compte des générations futures et des enjeux environnementaux, depuis les travaux de Weitzman (1994; 1998). Puisque ce paramètre influence les résultats de l'ACA, une analyse de sensibilité (section 6.5.1) est fortement recommandée sur ce paramètre.

### 2.3.2 Unité monétaire

Une autre hypothèse à formuler lors d'une ACA est l'unité monétaire choisie, notamment l'année de référence sur laquelle sera basée l'évaluation économique. Par exemple, l'unité monétaire pourrait être le dollar canadien de 2015. Ce choix est fonction du territoire à l'étude, mais aussi de la disponibilité des données économiques pour cette année de référence, notamment les valeurs foncières. Le choix pourrait aussi prendre en compte d'éviter certaines années où la valeur de la monnaie a subi des chocs importants.



### 2.3.3 Indicateurs économiques

Quant aux résultats de l'ACA, ils sont présentés à l'aide de la « valeur actualisée nette », soit la VAN présentée à l'équation (1). Cette formule permet ensuite de calculer les deux indicateurs qui serviront à déterminer le scénario à privilégier : la VAN du scénario d'adaptation par rapport au scénario de référence et le ratio coûts-avantages (Ratio A/C). Ceux-ci prennent la forme de

$$VAN_{sa-sq} = \sum_{t=0}^{T=50} \frac{(Montant_{t,sa} - Montant_{t,sq})}{(1 + \tau)^t}$$
$$Ratio A/C = \frac{VAN(avantages)}{VAN(coûts)}$$

où  $Montant_{t,sa}$  est le flux monétaire à l'année  $t$  des coûts et avantages du scénario d'adaptation analysé et  $Montant_{t,sq}$  est le flux monétaire à l'année  $t$  des coûts et avantages du scénario de référence (SQ; scénario de statu quo choisi comme référence pour les fins des études de cas de ce projet, voir section 5.1).

La VAN a l'avantage d'indiquer directement la perte ou le gain économique lié à chaque option en plus de l'ampleur de cet élément, par rapport au scénario de référence. En effet, une VAN positive désigne un projet rentable et plus avantageux que le statu quo.

Le ratio avantages-coûts (« ratio AC ») est aussi utilisé, lorsque cela est opportun, afin de présenter les résultats en terme relatif. Un ratio A/C supérieur à 1 indique que le scénario d'adaptation est rentable et plus avantageux que le statu quo. En cas de divergence de classement entre la VAN et le ratio A/C, la VAN est cependant privilégiée afin de dégager le scénario le plus avantageux.

La méthodologie détaillée pour le calcul des indicateurs économiques est présentée au chapitre 0.

**En résumé, la phase d'introduction et de design de l'étude permet de délimiter le territoire d'intérêt et de caractériser les problématiques fluviales et les enjeux physiques et humains associés. Cette phase permet également de choisir certaines hypothèses économiques de base, telle que l'horizon temporel et le taux d'actualisation, à partir desquels les indicateurs économiques seront calculés.**



## 3. MOBILISATION DES PARTIES PRENANTES

---

### 3.1 CONTEXTE

À l'instar de toute prise de décision dans le domaine environnemental, les démarches d'adaptation et de réduction des risques liés aux changements climatiques sont des procédures complexes. Elles font intervenir de très nombreux acteurs ainsi que différents domaines d'expertise. Le déploiement conjoint d'expertises scientifiques, politiques, environnementales et économiques peut s'avérer un véritable défi, notamment dû au cloisonnement des champs d'étude, mais aussi aux difficultés de s'arrimer aux véritables enjeux et réalités des territoires et de leurs communautés.

Il est crucial de combiner les processus de l'analyse économique aux approches participatives, notamment en accordant plus de temps à la consultation des acteurs et à la collection d'informations contextuelles sur l'environnement et les systèmes complexes qu'il abrite (NOAA, 2015; Álvarez-Farizo et Hanley, 2006). En outre, la démarche possède différents détracteurs (voir Massé et coll. 2018) et parmi les critiques les plus observées sont celles de la vision purement utilitariste et contingentée des décisions environnementales (Hanley, 2001). Là où une compensation environnementale peut paraître la meilleure solution par les experts impliqués, les acteurs véritablement impactés par cette décision pourraient, quant à eux, la trouver insuffisante. Pour ce type d'enjeux multidisciplinaires, la difficulté majeure est de trouver l'équilibre entre les connaissances techniques produites dans le cadre de l'ACA et celles générées par la participation des parties prenantes (élus, décideurs, aménagistes, usagers, etc.) dans le processus délibératif (Damart et Roy, 2009).

Les priorités dans les choix de méthodologie et les recommandations qui en émanent doivent être perçues par tous comme étant légitimes. Les actions doivent être prises en suivant des choix rationnels guidés par la nature même des enjeux et des potentialités effectives, réglementaires, économiques ou de mise en œuvre. Il est nécessaire de permettre aux usagers de participer à la planification dans un souci d'objectivité démocratique et de politique locale inclusive et participative, en bonne connaissance des avis d'experts. Ce besoin sera d'autant présent si le processus doit

mener au développement d'un cadre réglementaire impliquant transferts de coûts ou d'externalités.

En ce sens, la tenue de rencontres ou d'ateliers est l'assurance d'un grand nombre de retombées complémentaires et nécessaires pour assurer la meilleure portée d'une ACA (Carolus et al., 2018). En premier lieu, c'est une meilleure compréhension des problématiques et enjeux de l'étude associée qui est permise au travers d'interactions directes avec les spécialistes impliqués. De la même manière, ces rencontres permettront la transmission et l'appropriation des résultats de l'analyse économique produits. Ce transfert doit être assuré de manière intelligible et mettre l'accent sur les répercussions individuelles et collectives associées à la mise en place des mesures identifiées. Il doit être appuyé par un argumentaire logique arrimé aux éléments fournis par l'approche participative. C'est entre parties prenantes que le processus assurera la génération d'opportunités de réactions et d'interaction permettant à chacun de rebondir sur les éléments discutés et ainsi d'assurer la complémentarité et l'exhaustivité des arguments et points de vue dans l'étude de cas. Par extension, le savoir empirique des usagers impliqués dans la démarche doit être capté. Ainsi, l'étude de cas peut valoriser et intégrer les éléments tangibles et intangibles, globaux ou locaux. Par exemple, cette implication se manifeste par l'identification des espaces où les impacts des aléas se retrouvent, l'intensité ou la description des conséquences. Finalement, dans le cadre d'un processus délibératif, les ateliers de co-constructions permettent à l'ACA de s'assurer que le poids des décisions individuelles dans le choix d'étude ou de mise en œuvre des solutions est équivalent entre toutes les parties prenantes (Dobrow, 2010).

## **3.2 OBJECTIFS**

L'objectif principal est la mise en place d'un processus de mobilisation, permettant l'identification de différentes mesures pour coconstruire et assurer l'adhésion aux scénarios qui seront étudiés dans le cadre de la chaîne de modélisation constitutive de la méthode d'ACA.

De façon exhaustive, le processus d'implication des acteurs dans le cadre de l'analyse d'ACA :

- assure la meilleure compréhension et connaissance de la problématique, du risque, de ses causes, de ses conséquences et des solutions d'adaptation, en connaissance des enjeux techniques associés à leur mise en œuvre sur le territoire ;
- facilite le processus de transfert de connaissances des experts impliqués vers les acteurs du milieu, et vice-versa, dans la production des livrables intermédiaires et finaux de l'étude ;

- contribue à l'identification des postes d'impacts tangibles et intangibles devant être monétisés dans le cadre de l'analyse économique ainsi qu'à la caractérisation de leurs composantes et modalités de quantification (ventilation entre les acteurs, externalités, etc.) ;
- légitime et justifie les solutions et stratégies d'adaptation étudiées ainsi que les résultats de l'analyse coûts-avantages dans le fond (design de l'étude, grille d'impacts, etc.) comme dans sa forme (choix des indicateurs et paramètres, dimensionnement des mesures, scénarios, etc.) ; et
- apporte les informations complémentaires nécessaires pour l'identification des préoccupations résiduelles, les freins de mise en œuvre ainsi que les solutions pouvant exister pour déployer les solutions les plus prometteuses d'après le reste de l'analyse (efficacité hydraulique, VAN positive, etc.).

### 3.3 APPROCHE GÉNÉRALE

Dans le cadre de la présente étude, la mobilisation et l'animation ont fait l'objet de recherches orientant le processus de concertation, de co-construction et de priorisation autour d'activités de cartographie participative, d'entretiens semi-dirigés et de jury citoyen (Sow et Roques, 2019). L'ensemble de ces approches peuvent être mis en œuvre et d'autres formules envisagées pour mettre en place une ACA. Le choix spécifique des outils à déployer dépendra de plusieurs facteurs tels que l'étendue du territoire d'étude, la nature des acteurs à impliquer ou encore la possibilité de tenue d'atelier de travaux pratiques et la disponibilité de l'ensemble des parties prenantes (investissement en temps, engagements, ...).

La mobilisation des communautés se déroule tout au long de l'étude et sans discontinuité. Elle est d'ailleurs la première étape du projet et en assure le lancement. Dans un premier temps, l'équipe de projet doit s'assurer de s'entourer de l'ensemble des mandats, expertises, connaissances et compétences clés (approche pluridisciplinaire et multiéchelle) pour la meilleure tenue du projet ainsi que pour assurer son exhaustivité et la meilleure représentativité des spécificités du territoire d'étude.

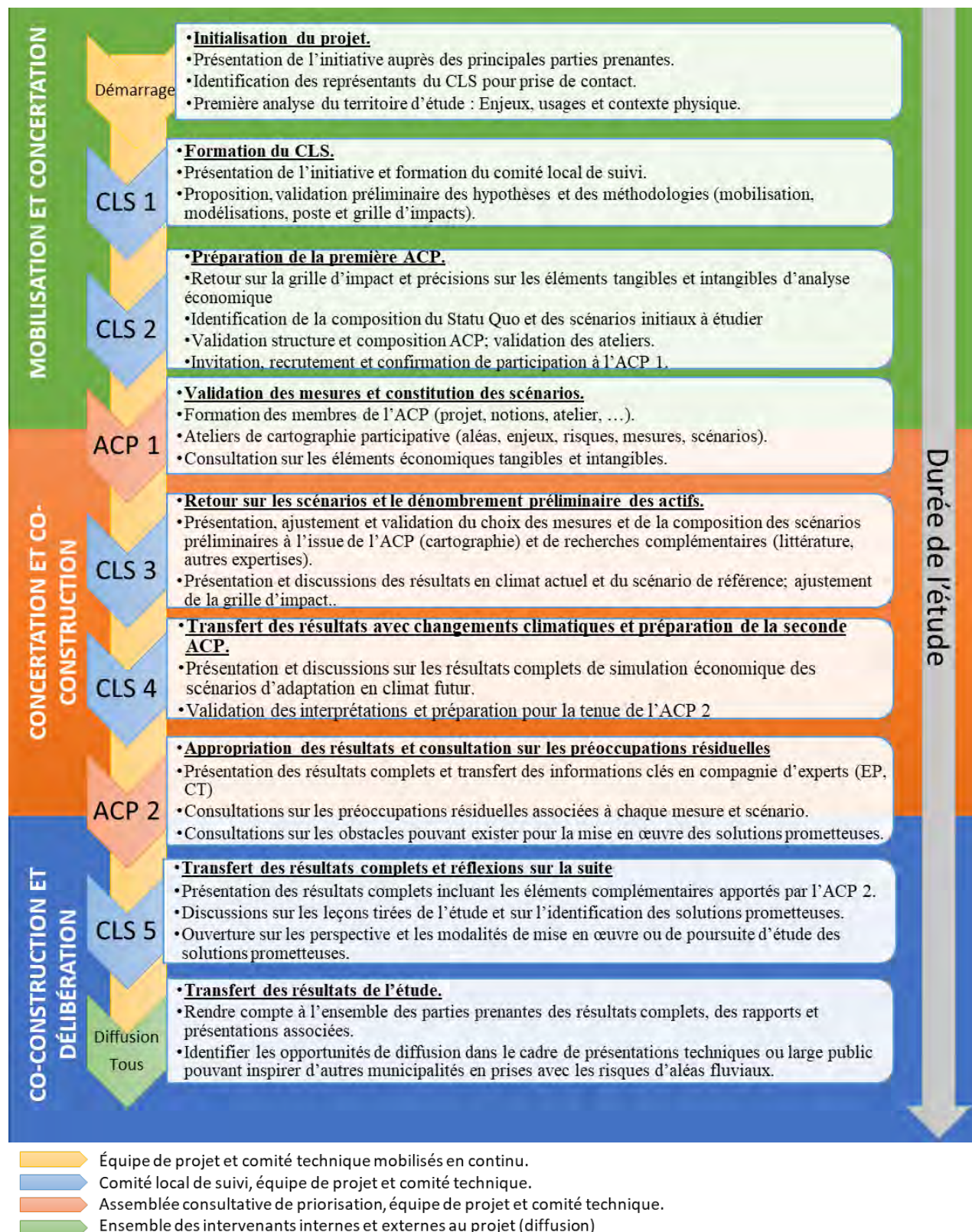
La mobilisation prend plusieurs formes, caractérisées par différents espaces d'échanges et différents types d'ateliers. Les échelles, géographiques et administratives, ainsi que les degrés d'expertises et de responsabilité peuvent être divers. Un maximum de cinq structures impliquées dans la consultation, la co-construction, la production et l'appropriation des résultats est conseillé. Le **Tableau A.1**, situé en annexe, fournit une liste des cinq espaces d'échanges devant être envisagés au niveau de l'administration et de la coordination du projet, mais aussi au niveau de la communauté ciblée ainsi que les expertises minimales à attendre de chacun de ces espaces. Les structures peuvent être caractérisées de la façon suivante :

- **L'équipe de projet (EP)** assure et coordonne la production des résultats, elle représente l'interface entre le bailleur de fonds et l'ensemble des parties prenantes du projet.
- **Le comité de suivi (CS)** s'assure de la pertinence et du maintien des grandes orientations du projet. Il peut inclure des représentants des ministères provinciaux ainsi que des chercheurs et apporte un soutien technique à l'équipe de projet en cas de difficultés méthodologiques.
- **Le comité technique (CT)** est composé d'expertises complémentaires à l'EP. Il peut être directement inclus dans celui-ci, ne formant ainsi qu'un seul groupe. Le CT est composé des expertises nécessaires pour la mobilisation des communautés (ex. OBV), la mise en œuvre des modélisations hydroclimatique et économique ainsi que pour assurer la validité scientifique de l'étude.
- **Le comité local de suivi (CLS)** possède un rôle central dans le processus de mobilisation, il a la charge d'assurer la continuité entre l'équipe de projet, le développement de l'analyse et l'ensemble des réalités terrain (acteurs, besoins, enjeux, etc.). Il doit être composé d'un nombre de membres réduit représentant à la fois groupes d'acteurs impactés par les aléas fluviaux, mais aussi les initiatives et structures impliquées dans la résolution des problématiques associées (municipalité, municipalité régionale de comté, bureaux de projets, Rés-Alliance, pour ne nommer qu'eux). Dépendamment de la taille du territoire étudié, ces représentants pourraient être issus de différents ministères régionaux.
- **L'Assemblée consultative de priorisation (ACP)** représente le milieu directement impacté par les aléas. Il permet l'identification des solutions pouvant être socialement acceptables répondant aux mieux aux considérations associées à chacun des usages du territoire. Le choix de la composition d'une ACP se fait sur la base de critères comme celui de la représentation égalitaire des usages et des grands ensembles socio-économiques et peut être ajusté en fonction de l'échelle du territoire d'intervention. Ainsi, sur le territoire d'un bassin versant, l'ACP pourra être composée d'élus ou d'urbanistes, alors qu'à l'échelle municipale, des agriculteurs et résidents peuvent y siéger.

### 3.4 ENCHAÎNEMENT SUGGÉRÉ DES ATELIERS

La **Figure 3** propose une structure type du processus de mobilisation. Une séance de lancement doit être assurée en début de projet. Celle-ci permet de présenter l'initiative, notamment ses objectifs, ses activités, les résultats attendus, ses échéances et les rôles des différentes équipes. La méthodologie générale doit être présentée et commentée, en s'assurant de la participation du maximum d'individus (EP, CT, CLS partiel ou complet). Cette rencontre sera l'occasion de clarifier et de formaliser les canaux de communication entre parties prenantes et de mettre en œuvre une démarche de caractérisation des attentes et des engagements qui devra être poursuivie tout au long du projet (voir les modèles du SENAT à l'annexe A, **tableaux A.2** et **A.3**).

L'enchaînement des rencontres et ateliers proposés est bonifié de l'identification des jalons devant être atteints (livrables intermédiaires), afin de s'assurer de détenir l'ensemble des pièces pour une étude complète. Celle-ci ne doit pas être influencée par certains passages critiques qui pourraient survenir. Lorsque nécessaire, l'EP pourra augmenter le nombre de rassemblements du CLS, notamment pour dégager pour transmettre les informations pertinentes et préparer le terrain en vue des ACP.



**Figure 3.** Processus de mobilisation dans le cadre d'une ACA, succession des rencontres et contenu

### **3.5 ATELIERS D'ASSEMBLÉES CONSULTATIVES DE PRIORISATION (ACP)**

Préalablement au premier atelier d'ACP, le recrutement, la mobilisation et l'invitation des membres de l'ACP doivent se faire avec l'appui de certaines parties prenantes et particulièrement du CLS. Une identification préliminaire des groupes d'acteurs et d'usages, ainsi que de leurs membres représentatifs (union de producteurs, regroupement d'entreprises, associations, etc.) situés dans les zones d'impacts ciblées ou pouvant être indirectement impactée pourra être assurée avant le premier CLS. Pour ce faire, les bases de données disponibles peuvent être une bonne source d'inspiration : registre immobilier, registre cadastral, registre des cultures assurées, etc. Il est aussi fortement suggéré, si l'information existe, de se baser sur les diagnostics et les analyses de réseau social afin de s'assurer de bien représenter les enjeux et problématiques, les groupes d'intérêts, les niveaux d'implication (sécurité civile, intervenants, etc.) et les relations que ceux-ci pourraient entretenir.

Deux ateliers au minimum devront être envisagés avec les membres de l'ACP. Le premier de ces ateliers cible spécifiquement l'identification des lieux de manifestation de l'aléa et la localisation de ses impacts. Au cours du premier atelier, l'EP devra avoir collecté les informations nécessaires pour caractériser et localiser les endroits le plus susceptibles de déployer certaines mesures de réduction ou de mitigation de l'aléa. Le principal extrant de ce premier atelier est l'identification d'au minimum un scénario consensuel.

Le second atelier de l'ACP sera l'occasion de présenter les résultats de l'analyse économique. Il s'agira d'un moment de dialogue au cours duquel l'EP devra être en mesure d'identifier les préoccupations résiduelles face aux résultats ainsi que les obstacles potentiels de la mise en œuvre des mesures les plus prometteuses. Il est attendu qu'en fin de processus, des solutions soient proposées pour limiter l'influence de ces obstacles. Une priorisation des mesures les plus convaincantes et acceptables par les participants favorise l'acceptabilité et l'implémentation des recommandations.



ATELIER 1 – 1 journée		ATELIER 2 – 1 journée	
Phase	Activités	Phase	Activités
<b>Ouverture et préparation à l'ensemble de l'ACP.</b>	1- Présentation de l'ensemble de l'initiative, des étapes, des acteurs, de la portée. 2- Explication du rôle et du contenu de l'ensemble de l'ACP.	<b>Ouverture et présentation des résultats de l'ACA.</b>	1- Retour sur l'ensemble du processus de production des résultats, explication des notions de base (dénombrement des actifs, tangibles, intangibles, VAN, ...) 2- Présentation des résultats complets de l'ACA pour chacune des solutions d'adaptation.
<b>Cartographie participative d'identification des aléas et impacts.</b>	3- Formation sur les notions de problématique, d'aléa, de vulnérabilité, des impacts et de risques. Définition du rôle des MHH et des objectifs de la cartographie participative. 4- Atelier de cartographie participative – Identification des points de manifestation de l'aléa et de ses impacts.	<b>Identification des préoccupations résiduelles et obstacles à la mise en œuvre.</b>	3- Plénière et discussions avec les experts pour réponses aux interrogations face aux résultats 4- Entretien semi-dirigé pour l'identification des préoccupations résiduelles et des obstacles à la mise en œuvre
<b>Cartographie participative de localisation des mesures et de caractérisation des scénarios acceptables.</b>	5- Formation sur les catégories de solutions d'adaptation et présentation de la liste préliminaire. Définition des objectifs de la cartographie participative 6- Atelier de cartographie participative - Préoccupations et co-construction des solutions	<b>Travaux de priorisation des mesures et des scénarios.</b>	5- Ouverture sur les solutions pouvant exister pour réduire ces préoccupations et obstacles 6- Formation à l'exercice de pondération des critères pour l'exercice d'AMCS 7 - Analyse multicritères sociale (AMCS) Échange sur les préoccupations vis-à-vis des solutions
<b>Résultats :</b>	1. Manifestation de l'aléa et impacts cartographiés 2. 3-4 scénarios concertés de solutions d'adaptation à analyser 3. Impacts cartographiés des solutions 4. Liste locale des impacts indirects	<b>Résultats :</b>	1. Estimation de la valeur d'un élément intangible 2. Analyse multicritères 3. Liste des limites et pistes d'amélioration 4. Liste des préoccupations résiduelles

**Figure 4.** Organisation et contenu des différents ateliers de l'ACP dans le cadre du projet d'ACA

**En résumé, l'une des conditions de réussite d'une analyse participative repose sur l'implication active de l'ensemble des acteurs ciblés sur le territoire d'étude lors des activités du comité technique, du comité local de suivi et de l'assemblée consultative. Ces contributions maintiennent la confiance et sont bénéfiques à bien des égards. Elles contribueront certainement lors de la mise en œuvre des solutions d'adaptation.**

Bien évidemment, ces structures et enchaînements sont des suggestions qui sont faites à la lumière des études de cas liées à ce guide méthodologique. La personne qui souhaite réaliser un tel projet est invitée à s'approprier le matériel et à l'adapter à son contexte. L'idée principale est de viser une mobilisation diversifiée qui participe à chaque grand jalon du projet et d'optimiser l'apport de chaque structure.



## 4. PROCESSUS D'ANALYSE DE RISQUE

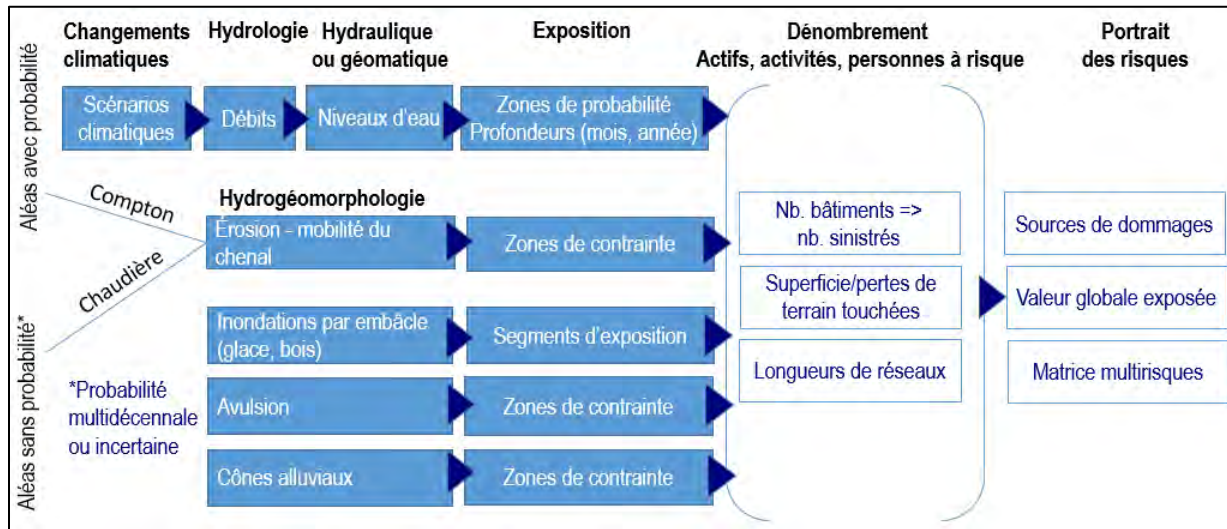
---

Pour sélectionner des scénarios d'adaptation efficaces et optimaux, la démarche se base sur la priorisation des risques à réduire, s'appuyant sur l'identification, l'analyse et l'évaluation des risques. La section 4.1 présente la méthodologie basée sur l'approche multi-aléa. La section 4.2 aborde l'analyse des aléas, notamment la modélisation des inondations en climat futur menée par les partenaires de l'Université de Sherbrooke (Trudel et Gobji, 2020). La section 4.3 examine l'exposition des actifs, activités et personnes à risque dans la zone d'étude, suivi d'une appréciation de la vulnérabilité (section 4.4). La section 4.5 conclut sur une appréciation multirisque des enjeux liés aux aléas fluviaux.

### 4.1 MÉTHODOLOGIE : L'APPROCHE MULTI-ALÉAS

L'analyse de risque se base sur une approche multi-aléa (exposition à de multiples aléas qui évoluent dans le temps) avec changements climatiques lorsque possible. Elle vise à identifier les conséquences prioritaires à réduire. Elle provient de la contrainte des ressources limitées à investir en adaptation et gestion de risque. Elle favorise des choix qui rapportent les plus grands dommages évités, pour chaque dollar investi.

Les connaissances sur les aléas identifiés (section 2.1.5) varient et cela en limite la comparaison. Ainsi, les aléas assez fréquents et pour lesquels les connaissances sont avancées peuvent être traités de manière probabiliste avec ou sans changements climatiques, alors que les aléas fluviaux récents ou aux connaissances limitées sont généralement traités de manière qualitative, dans une analyse de risque résiduel (voir section 6.5.3). Tel qu'illustré à la **Figure 5**, l'analyse de risque s'appuie sur une chaîne de modélisation hydrologique-hydraulique et hydrogéomorphologique, pour dénombrer les actifs, activités et personnes à risque (section 4.3) et pour réaliser un portrait des risques (section 4.4).



**Figure 5.** Résumé du processus d'analyse de risque multi-aléas basé sur une chaîne de modélisation hydrologique-hydraulique et hydrogéomorphologique

## 4.2 ANALYSE DES ALÉAS

### 4.2.1 Analyse des inondations en climat futur

L'analyse des inondations en climat futur est l'une des pierres angulaires de la validité et de la représentativité scientifiques des résultats produits dans le cadre de ce type de projets. Elle vise à identifier et caractériser les événements générateurs d'impacts et repose ici sur trois types de modélisation :

- La modélisation climatique pour produire les informations sur la pluviométrie et les tendances météorologiques locales ;
- La modélisation hydrologique pour générer une information sur le débit résultant de la définition du portrait climatique ; et
- La modélisation hydraulique pour convertir l'information débitométrique en cartographie de l'extension des inondations et de la profondeur de submersion.

Toutes ces modélisations reposent sur une méthodologie éprouvée. D'abord, la structure du modèle doit être montée et une série de paramètres y est à ajouter, dépendant de la nature des éléments à simuler. Par la suite, le modèle doit être calibré, c'est-à-dire ajuster la paramétrisation pour faire correspondre les résultats du modèle aux données mesurées. Cette calibration est faite de manière itérative à l'aide de données observées (rétrospectivement). Elle peut être faite en deux temps : régime permanent et régime transitoire pour la reproduction événementielle. La dernière étape consiste à simuler prospectivement des conditions qui diffèrent de celles observées et qui sont considérées représentatives des événements futurs dans l'horizon temporel étudié.

Dans ce chapitre, une brève revue de la théorie et de l'état de l'art pour chacune de ces catégories de modélisation est rapportée. Par la suite, les outils existants et utilisés dans le cadre du présent développement méthodologique sont détaillés. La méthode est ensuite décrite en mettant l'accent sur les données d'intrant et d'extrants pour assurer la continuité entre les modélisations et la production des résultats utiles à l'analyse économique.

#### 4.2.1.1 Modélisation climatique

##### *Théorie et état de l'art*

La modélisation climatique produit numériquement le climat du passé ainsi que celui attendu sur des horizons de temps futurs en fonction des émissions de gaz à effet de serre plausibles selon le développement socio-économique à venir. Les modèles de circulation générale (MCG – GIEC ; Hayhoe et al., 2017) simulent sur tout le globe les diverses composantes du système climatique, dont l'atmosphère, en incluant les processus physiques tels la circulation océanique et atmosphérique, la convection, ou la formation de la précipitation. Ils fournissent une information à grande échelle, selon leur résolution de quelques centaines de kilomètres. Conséquemment, ils servent de pilotes aux modèles régionaux du climat (MRC) de plus fine résolution, qui reproduisent avec plus de détails les processus physiques sur les territoires régionaux ayant des caractéristiques de fine échelle tel le relief ou le contraste terre-mer. Les MRC permettent ainsi de fournir de l'information de l'ordre d'une dizaine de kilomètres ou plus sur les variables météorologiques telles la précipitation, les températures, le vent et autres selon trois principaux facteurs :

1. **Le modèle de circulation globale** sélectionné comme pilote et définissant les conditions aux limites ;
2. **Le modèle de climat régional qui simule** les informations produites ; et
3. **Le profil représentatif d'évolution de concentration RCP** (Representative Concentration Pathway) qui a été suivi pour faire les simulations du futur (projections). Ces scénarios comprennent les émissions de gaz à effet de serre et particules aérosols ainsi que l'utilisation des terres et sont exprimés en fonction du forçage radiatif (perturbation du bilan radiatif terrestre) résultant en 2100. Plusieurs profils d'évolution existent, allant d'un forçage faible (RCP 2.6) à un forçage plus élevé (RCP 8.5). Ces scénarios sont utilisés par la communauté scientifique comme une base commune et permettent les comparaisons des résultats de modélisation climatique.

##### *Outils*

Il existe de nombreux modèles climatiques, globaux ou régionaux. Les informations des simulations climatiques résultantes de modèles globaux ou de plusieurs combinaisons de modèles, pour différents scénarios d'émission RCP sont disponibles sur le [Earth System Grid Federation](#) du programme de recherche sur le climat

mondial (WCRP). Les informations fournies sur la Plateforme d'Ouranos [https://pavics.ouranos.ca/index\\_fr.html](https://pavics.ouranos.ca/index_fr.html) (PAVICS), disponibles en libre-service, constituent une source fiable de données post-traitées, mais correspondent aux besoins d'utilisateurs ayant des compétences de programmation. Les usagers désirant des informations déjà traitées sur leur région (Québec) pour des variables de base peuvent y accéder sur [le site du portrait climatique du Québec](#) d'Ouranos. Les figures et données fournies par ce site couvrent deux horizons de temps et deux scénarios de forçage radiatif, ce qui suit les recommandations pour mener à bien une ACA. Toutefois, leur résolution spatiale et temporelle peut n'être pas assez précise pour certains besoins en modélisation hydrologique. Dans ce cas, il est suggéré de s'adresser à [scenarios@ouranos.ca](mailto:scenarios@ouranos.ca) pour un accompagnement.

### *Méthode, intrants et extrants*

Le nombre et les caractéristiques des simulations climatiques devant être utilisées dans le cadre d'une ACA sont fonctions de nombreux paramètres, à commencer par le nombre d'horizons temporels étudiés. Ceux-ci doivent correspondre aux horizons de temps ciblés par l'analyse socioéconomique : ils correspondent à une période couverte par les séries de données (trois décennies sont recommandées comme durée minimale). Ces horizons seront comparés à un horizon de référence, soit un climat en passé récent.

La seconde caractéristique permettant de sélectionner le nombre et la nature des simulations climatiques à utiliser dans le cadre de l'analyse est reliée à la nature des scénarios RCP, soit des forçages radiatifs plus ou moins élevés. La représentation statistique du nombre d'échantillons issus de ces scénarios peut nécessiter l'extraction de plusieurs résultats pour un même RCP. En outre, une bonne couverture de l'ensemble des résultats demande l'utilisation de plusieurs simulations climatiques pour un même RCP. Un nombre suffisant de simulations permet de calculer différents percentiles pour chaque horizon, période de retour et scénario RCP. De plus, le temps de traitement et l'espace nécessaire pour produire l'ensemble des données post-traitées et les simulations hydrologiques peuvent déterminer le nombre de simulations à extraire. Idéalement, il est attendu que les informations climatiques soient extraites au format matriciel pour ne pas avoir à interpoler les valeurs ponctuelles ultérieurement dans le modèle hydrologique et ainsi apporter un biais supplémentaire sur l'information.

Selon l'état des informations climatiques disponibles au moment de cette étude, les simulations régionales [Cordex-NA](#) (résolution spatiale 25 ou 50 km, plusieurs MRC pilotés par différents MCG) ont été sélectionnées, car il s'agit d'un jeu de données qui offre un bon compromis entre la précision au sol et la vitesse de traitement : plus précis que des simulations globales (ex. CMIP5, dont les modèles ont une résolution spatiale d'environ 250 km, et dont certaines données sont à une résolution temporelle insuffisante), mais moins lourd à traiter que CLIMEX (résolution spatiale 12 km,

résolution temporelle horaire), lequel n'offre le choix qu'un seul MRC piloté par un seul MCG. Pour faire un choix éclairé, l'utilisateur est aussi invité à surveiller les nouveaux développements qui seront disponibles, par exemple CMIP6, qui mènera à la mise à jour des simulations régionales.

#### 4.2.1.2 Modélisation des débits

##### *Théorie et état de l'art*

Le débit mesurable dans les cours d'eau correspond à la réponse d'un bassin versant suite à un événement climatique (pluie, neige, température, ...). La modélisation hydrologique permet de convertir l'information climatique en valeur de débit instantané mesurable en tout point du bassin versant. Ces outils intégrés résolvent l'équation du bilan hydrologique (échanges entre les différents réservoirs) et ont pour objectif de reproduire le plus fidèlement possible la réponse des bassins versants en répartissant dans le temps et dans l'espace les transferts (ruissellement, infiltration, recharge, évaporation, etc.) ayant cours sur le bassin versant.

Dans le cadre de l'ACA, la modélisation des débits de crue pour différentes probabilités de dépassement annuel (i.e., période de retour), puis des étendues et profondeurs d'eau associées (voir section 4.2.1.3), est cruciale afin de calculer les dommages annuels moyens associés à l'aléa (section 6.2.1). Pour les deux études de cas, sept probabilités de dépassement annuel ont été utilisées, tel que présenté au **Tableau 2**.

**Tableau 2.** Probabilités de dépassement annuel choisies pour les deux études de cas

Probabilité de dépassement annuel	Période de retour
50 %	0 – 2 ans
20 %	0 – 5 ans
10 %	0 – 10 ans
5 %	0 – 20 ans
2 %	0 – 50 ans
1 %	0 – 100 ans
0,35 %	0 – 350 ans

Il existe de nombreux types de modèles hydrologiques. Ils peuvent être notamment empiriques ou à base physique. Les seconds sont parmi les plus utilisés aux fins d'application terrain car ils sont en mesure de simuler l'ensemble des processus de génération du débit, mais aussi de transfert de l'amont vers l'aval des cours d'eau. Les processus de production de débit sont généralement représentés par des processus dits *hortoniens* considérant qu'une fois la capacité d'infiltration du terrain atteinte, la portion de l'impluvium qui n'est pas intercepté ou infiltré est automatiquement convertie en ruissellement. Les relations entre part intercepté et part infiltrée (*sub-*

surface ou souterrain) dépendront de plusieurs paramètres. En outre, une description fine du territoire physique et des caractéristiques hydrologiques de celui-ci est l'assurance de reproduire au mieux les processus de production du débit. Ces bilans peuvent être calculés à l'échelle du pixel dans le cas d'un modèle distribué ou à l'échelle d'unité hydrologique uniforme dans le cas de modèles semi distribués. L'agrégation des résultats issus de chacun de ces bilans se fait par transfert amont/aval d'une entité à l'autre. Ce transfert sera influencé par les caractéristiques physiques du milieu (pente, encaissement, etc.), mais aussi par les infrastructures humaines ou naturelles (barrage, lacs, milieux humides, etc.) pouvant se retrouver sur la trajectoire de l'eau. Ces infrastructures sont alors représentées par une série d'équations représentatives de leur comportement hydrologiques.

### *Outils*

La littérature regorge d'outils de modélisation hydrologique. Dans la catégorie des modèles à base physique, les principaux sont [SWAT](#) et [HEC HMS](#) respectivement développés par l'USDA Agricultural Research Service et l'U.S. Army Corps of Engineers. Chacun de ces modèles repose sur des équations très similaires. Différents modules complémentaires (MH, eaux souterraines, échanges, sédiments, etc.) visant à reproduire de manière plus précise et détaillée les processus de production ou de transfert existent pour chacun d'eux. Au Québec, c'est le logiciel [Hydrotel](#) qui est utilisé par le MELCC pour la modélisation hydrologique prévisionnelle ou comme intrant dans le cadre de la [cartographie de zones inondables](#). L'outil SWAT a été utilisé dans le cadre des études de cas liés à ce guide méthodologique, notamment pour sa capacité à reproduire les effets des milieux humides sur l'hydrologie. C'est un outil simple de prise en main, bien référencé et documenté. Il a fait ses preuves et possède une communauté d'utilisateurs suffisamment déployée.

### *Méthode, intrants et extrants.*

#### *Méthode 1. Extraction depuis l'Atlas hydroclimatique du Québec*

Afin de ne pas avoir à effectuer de simulations hydrologiques spécifiques sur le territoire d'étude et de déployer rapidement la méthode proposée ici, il est possible d'extraire les informations sur les débits en climat futur aux points de prédiction de l'outil sur le site de l'[Atlas hydroclimatique du Québec méridional](#). Les données sources et plus d'indications sur les conditions de leur production y sont accessibles.

#### *Méthode 2. Modélisation hydrologique à l'échelle du bassin versant.*

Généralement, un logiciel de modélisation hydrologique spatialisé fonctionne à l'aide d'un premier outil exploitant les interfaces de logiciels utilisés en géomatique (ArcGis) permettant de prétraiter les informations spatiales (construction du chainage hydrologique, paramétrisation des entités, etc.). Ensuite, les fichiers (données climatiques, débitmètre lors de la calibration, etc.) sont liés entre eux pour lancer les simulations, calibrer le modèle et effectuer des modélisations prédictives au travers

d'une seconde interface spécialisée. L'information peut alors être visualisée et extraite pour chaque exutoire des bassins versants constitutif de l'arborescence hydrographique ainsi que pour chaque infrastructure pouvant exister sur le territoire. L'importance de la définition judicieuse de la taille des sous-bassins versants et, par extension, de la localisation de leurs exutoires est ainsi primordiale, plus particulièrement si les extrants de cette modélisation ont pour vocation d'être utilisés comme intrants à la modélisation hydraulique (conditions aux limites). Les fichiers produits peuvent ensuite être statistiquement analysés.

Le montage du modèle passe par une analyse géomatique classique des territoires physiques et des bassins versants. L'information matricielle sur l'altitude sera convertie en ligne de direction de l'écoulement et d'accumulation pour en extraire le réseau hydrographique. Ce travail permet la génération des sous-bassins versants dont la taille dépendra de la résolution souhaitée (influençant le temps de calcul) ou permise en fonction respectivement des besoins pour les analyses ultérieures et de données disponibles. La couverture (végétale, anthropique, etc.) du territoire, son utilisation, la pédologie ou encore la pente et la direction d'écoulement sont ensuite agrégées à l'aide de tables de correspondances (ex. *curve number* - *CN*) afin d'attribuer les paramètres représentatifs des caractéristiques hydrologiques de chaque parcelle de territoire. La typologie de ces parcelles peut nécessiter différentes équations pour reproduire la réponse à l'évènement climatique. Plus la taille de la parcelle est réduite, plus la résolution de la simulation est fine. Les données débitométriques et climatiques aux stations couvrant la période de référence<sup>2</sup> sont utilisées comme données d'intrant pour la calibration itérative du modèle. La paramétrisation des caractéristiques hydrologiques des parcelles et l'ajustement des valeurs du bilan hydrologique des sous-bassins versants est assuré de manière à reproduire de manière satisfaisante la temporalité et l'intensité des évènements de crue passés sur le territoire étudié. Finalement, les données climatologiques issues des outils de modélisations climatologiques peuvent être utilisées comme intrant pour chacune des simulations en climat futur.

Le traitement statistique des données de débit à chaque sous bassin-versant permet d'extraire l'information sur les débits (moyens, maximums, annuels ou saisonniers) résultants de chacun des scénarios climatiques pour les horizons et forçages radiatifs considérés. Pour les besoins de l'étude, des analyses de distributions et fréquentielles doivent être effectuées (Gobji et Trudel, 2019, Leconte et Bizhanimanzar, 2020). Elles définissent les valeurs de débits correspondant à des périodes de retour (inverse de la fréquence d'apparition) ciblées pour chacun des horizons et des scénarios de forçage radiatif considérés.

---

<sup>2</sup> Il est possible qu'un prétraitement de remplissage des lacunes soit nécessaire.



### 4.2.1.3 Cartographie des submersions

#### *Théorie et état de l'art*

La cartographie de la submersion et de l'extension des zones inondées se fait à l'aide d'outils visant à convertir les informations sur les débits en hauteur d'eau correspondante. La modélisation hydraulique est une représentation mathématique du comportement de l'eau au sein du chenal d'écoulement qui permet, en tout point, de calculer le niveau d'eau en fonction du débit présent dans le lit mineur<sup>3</sup>. Généralement, les équations de référence résolues sont dérivées de celles de [Saint Venant](#), ainsi que celle de conservation de la masse ou de la quantité de mouvement.

Dépendamment de leur extension spatiale, de la complexité des équations utilisées et de l'échelle de résolution de celles-ci, les modèles hydrauliques sont complexes à mettre sur pieds. Ils nécessitent de fortes puissances et un important temps de calcul. Généralement, le développement d'un modèle hydraulique est ainsi circonscrit à une portion comprise entre deux points de mesure représentant les conditions aux limites amont et aval. Les équations sont résolues dans différents espaces, d'abord en une dimension (parallèle à l'écoulement, dans le chenal) puis en deux dimensions (perpendiculaire à l'écoulement, dans la plaine inondable), soient des modèles couplés 1D/2D.

Au Québec, la DEHA (MELCC) a produit dans le cadre du projet de loi 67 un *Guide méthodologique visant à baliser la cartographie des zones inondables pour l'application réglementaire*. Ce guide fournit de plus amples informations méthodologiques et techniques pour la production de cartes d'étendue et de profondeur de submersion. Dans la perspective d'une mise en oeuvre de cartographie réglementaire des zones inondables au Québec, ce guide fait référence et les chapitres suivants devront ainsi être lus et interprétés complémentaires au guide provincial.

#### *Outils*

##### Méthode 1 : Modélisation 1D/2D complète

La méthode communément employée est celle de la modélisation hydraulique complète 1D/2D. Celle-ci se fait à l'aide d'outils d'ingénierie. Le River Analysis System ([HEC-RAS](#) - Hydrologic Engineering Center's) est l'un des plus communément utilisés. Dans le cadre de l'[INFO-Crue](#), il est utilisé pour la cartographie des zones inondables dans les secteurs où une bonne résolution est attendue. Les outils de modélisation hydraulique fine ont été utilisés dans le cadre du projet de la rivière Coaticook (Gobji et Trudel, 2019).

---

<sup>3</sup> En considérant la relation entre la hauteur et le débit comme linéaire

## Méthode 2 : Hydraulique inverse

La seconde méthode est issue de l'approche d'évaluation préliminaire du risque d'inondation (ÉPRI) développée en France et adaptée au Québec dans le cadre de l'INFO-Crue. Cette méthode est une approche de modélisation hydraulique large échelle dite inverse basée sur l'utilisation combinée d'outils SIG et du modèle hydraulique Lisflood (Bates et De Roo, 2000) et, comparativement aux données mesurées sur le terrain, fournit des résultats acceptables avec une erreur quadratique moyenne de 20 à 30 cm. Elle possède de multiples avantages dont le principal est celui de ne pas nécessiter de donnée bathymétrique pour caractériser la section d'écoulement du lit mineur (lit traversé par le débit plein bord, estimé à une récurrence 2 ans). L'utilisation d'un coefficient de rugosité constant pour le chenal central est l'un des autres avantages majeurs de la méthode, évitant de nombreuses itérations et du temps de calcul. Suivant cette méthodologie, les données lidar se voient attribuer une altitude lissée au niveau du chenal principal, selon si la largeur du cours d'eau est inférieure ou supérieure à la résolution du modèle numérique de terrain (MNT). Épaulé par le débit transitant par les chenaux au moment de la prise de point lidar, il est finalement possible de corriger ce dernier et d'estimer l'altitude du lit mineur (lit virtuel calculé par la méthode inverse hydraulique - Choné et al., 2020). Les données débitométriques, en tout point du chenal modélisé, peuvent ensuite être attribuées proportionnellement à l'aire drainée (débit spécifique) à l'aide des informations fournies par le modèle hydrologique déployé. L'outil fonctionne ensuite comme un outil de modélisation hydraulique standard et les équations résolues sont similaires.

## Méthode 3 : Modélisation géomatique dérivée des méthodes hydrauliques

Cette troisième méthode est issue d'un développement porté par le ROBVQ avec les nombreuses contributions de l'Université Concordia, de la DEH et du consortium Ouranos. Elle consiste à réexploiter les informations matricielles produites par la méthode 1 ou 2 pour définir les matrices d'altitudes correspondantes à des débits obtenus dans d'autres conditions que celles utilisées pour obtenir les matrices d'origine. L'hypothèse retenue est ainsi de considérer les relations entre valeurs de débit et altitude du niveau d'eau comme linéaire à l'échelle de tronçons ne présentant pas de variations hydrométriques et hydrologiques trop importantes. Cette hypothèse fait donc abstraction des phénomènes d'hystérésis<sup>4</sup> et, à l'instar de la méthode hydraulique inverse (méthode 2), ne rend ainsi pas vraiment compte des zones de refoulements. Ces dernières ont déjà été lissées lors de la production des cartes INFO-Crue, on suppose ainsi l'erreur générée comme négligeable. Cette méthode a été utilisée pour l'étude de cas du bassin versant de la rivière Chaudière, de plus amples détails se retrouvent donc à l'annexe D du rapport régional ([Boyer-Villemaire et al., 2021b](#)).

---

<sup>4</sup> Soit le retard de l'effet sur la cause.

## Méthode, intrants et extrants

### Méthode 1 : Modélisation 1D/2D

La première étape de développement d'un modèle hydraulique 1D/2D est celle de l'acquisition des données débitométriques, de niveau d'eau, mais surtout de la bathymétrie le long du bief étudié. En outre, il est important de posséder les informations suffisamment précises sur les profondeurs et la forme de sections d'écoulement représentatives. Les informations sur la plaine inondable doivent être extraites directement du lidar. La calibration de modèles hydrauliques se fait à deux niveaux, celle du chenal (1D) et celle de la plaine inondable (2D). Ce sont les conditions aux limites (potentiel imposé et flux imposé) qui sont utilisées pour ces calibrations. Elles proviennent notamment de l'information existante sur l'extension spatiale et l'altitude de l'eau atteinte durant certains événements.

La calibration en régime permanent, puis transitoire, visant à faire coïncider les débits et niveaux simulés avec ceux mesurés sur le terrain (minimalement, un débit en amont et un niveau en aval) se fera par ajustement des paramètres hydrauliques en tous points du chenal, notamment celui du coefficient de rugosité Manning Strickler (K). La calibration dans la plaine inondable sera similaire avec l'attribution cette caractéristique hydraulique du territoire impactant sur le comportement de l'eau et ses débordements.

Une fois les résultats de calibration satisfaisants, les extrants de la modélisation hydrologique, en amont et en aval de la section d'intérêt pour la modélisation hydraulique, sont utilisés comme intrants à l'estimation des superficies inondées correspondantes aux débits futurs en période de changement climatique. Le travail de simulation hydraulique pourra être fait en utilisant les statistiques de répartition des débits correspondants aux différents scénarios de RCP issus de la modélisation hydraulique.

Les matrices de submersions, obtenues par différenciation du niveau d'eau avec la topographie, sont utilisées. Dans le cas d'une étude des aléas d'érosion, la simulation des vitesses d'écoulement peut être une information supplémentaire nécessaire.

### Méthode 2 : Hydraulique inverse

Nous invitons le lecteur à lire le rapport produit par l'Université de Concordia dans le cadre de l'INFO-Crue pour plus d'indications sur la méthodologie et les données d'intrants nécessaires à l'application de la méthode de modélisation large échelle (Choné et al., 2020).

### Méthode 3 : Modélisation géomatique dérivée des méthodes hydrauliques

Les données sources nécessaires à la production des cartes de submersion sont d'abord les valeurs de débit journalier maximal moyen de chacune des simulations extraites à l'exutoire de chacun des sous-bassins versants présents au centre du

chenal d'intérêt (après les confluences avec ses affluents). Le chenal et la plaine inondable du cours d'eau simulé sont fragmentés en zones dont l'étendue latérale contient l'ensemble de la plaine inondable et contenant, minimalement, un point d'exutoire du modèle hydrologique. Les outils utilisés pour son développement sont le ModelBuilder d'ArcGis afin de pouvoir exploiter certaines fonctions de l'extension Spatial Analyst, en ajoutant certains scripts développés en Python. Les ModelBuilders ainsi que les scripts python pour la mise en place de cette méthodologie sont fournis à l'annexe E.

Le second jeu de données nécessaire au déploiement de la méthode est un ensemble de données géospatiales matricielles incluant celles du débit et de l'altitude de l'eau dans les plaines inondables du cours d'eau simulé. Il est important que ce portefeuille de matrices borne bien les valeurs maximales et minimales de débit provenant des simulations hydrologiques, en tout point d'exutoire. Les informations débitométriques au centre du chenal doivent être extraites par géotraitement SIG à chacun des exutoires retenus (**Figure E.1**). Les données matricielles pour chaque simulation, ainsi que celles sur le lidar et les zones d'accumulation de flux sont ensuite découpées pour l'ensemble des secteurs de prédictifs et stockées dans des données géospatiales spécifiques (**Figure E.2** et **Figure E.3**).

L'ensemble des informations par point doit ensuite subir un prétraitement sur chiffrier. Ce traitement doit fournir :

- Les percentiles souhaités pour analyser la sensibilité des scénarios climatiques par horizon de temps, période de récurrence, scénario RCP et scénario d'aménagement du territoire. Ceci conduit à une réduction du nombre de simulations entre les modèle hydrologique et hydraulique.
- Pour chaque point et chaque simulation, les valeurs de débits directement supérieurs et inférieurs issues des couches matricielles d'altitude d'origine ainsi que le nom du fichier de couches.
- Un fichier texte mis en forme intégration dans le modèle de génération des couches de submersions (Voir Script Python de la 2<sup>e</sup> étape, à l'annexe E).

Pour chaque secteur présent le long du chenal étudié, la relation suivante est utilisée :

$$Av = \frac{(As - Ai) * Qv}{(Qs - Qi)} + (As - \frac{(As - Ab) * Qi}{(Qs - Qi)})$$

Où  $Qv$  est la valeur de débit pour laquelle la couche d'altitude est souhaitée,  $Qs$  la valeur de débit supérieure issue des matrices source,  $Qi$ , la valeur directement inférieure,  $Av$  la couche d'altitude modélisée,  $As$  la couche d'altitude supérieure et  $Ai$  la couche d'altitude inférieure.

L'ensemble des traitements (**Figure E.4**) est assuré à l'aide de la calculatrice raster et, dans le cas des allocations euclidiennes par distances hydrologiques, de la fonction de calcul de bassin versant (en assurant les conversions de données entières à rebelles et

vice versa). Le rééchantillonnage de certaines couches intermédiaires peut être nécessaire pour faire correspondre les résolutions de couches raster ou alléger les calculs. L'information topographique (lidar) permettra de définir la valeur de submersion en effectuant le différentiel avec les matrices d'altitude simulée.

Les couches résultantes doivent ensuite être nettoyées (voir Script Python de la 6<sup>e</sup> étape, à l'annexe E) en supprimant les îlots isolés et les dépressions non remplies dont la surface dépassait un certain seuil. L'utilisation d'une méthode similaire aux allocations euclidiennes est mise en œuvre pour faire correspondre l'altitude des limites des zones submergées avec celles du lidar.

Finalement, l'ensemble des secteurs simulé et correspondant à chacune des simulations pourra être fusionné afin de ne former qu'une seule couche matricielle continue. Cette fusion pourra aussi inclure le chenal principal pour remplir tous les trous existants. L'étendue des couches de submersion peut ensuite être vectorisée (**Figure E.5**) afin d'assurer le dénombrement des actifs pour chacune des simulations étudiées.

#### 4.2.1.4 Choix et arrimage des méthodes

Aux fins de mise en œuvre d'une ACA, le choix des méthodes et outils de modélisation à employer est primordial pour assurer la meilleure qualité des résultats. Ce choix est une fonction directe de nombreux paramètres. Il dépendra dans un premier temps de l'aléa étudié, des cibles de l'étude et de la catégorie des solutions qui seront étudiées (affectant l'aléa, la vulnérabilité; l'aménagement du territoire ou les pratiques par exemple). Dans un second temps, ce sont les informations existantes pour la mise en œuvre des modèles, la résolution (temporelle et spatiale) des résultats souhaités et les ressources disponibles (temps, informatique, financier) qui guideront le choix. Ce choix devra être effectué en amont de l'analyse économique afin de structurer au mieux les étapes de travail et d'anticiper les délais de production des différents extraits intermédiaires nécessaires à la poursuite de la chaîne de modélisation.

Le tableau suivant propose une grille de lecture pour accompagner le lecteur dans l'identification des meilleures méthodes à déployer en fonction des cibles, de l'échelle et des solutions analysées.

**Tableau 3.** Appui à l'identification des méthodes de modélisation de l'aléa pouvant être employées dans le cadre d'une ACA

Cible	Échelle	Solution analysée	Modélisation hydrologique recommandée	Modélisation hydraulique recommandée	Modélisation géomorphologique recommandée
Événementiel	BV	Structurelle grise (immunisation/régulation)	Pluie/débit ou Atlas	1D/2D	Modélisation des flux (hydraulique)
		Structurelle verte (emprise)	Pluie/débit	1D/2D ou large échelle	Modélisation des flux (hydrologique / statique)
		Aménagement / réglementaire	Pluie/débit	1D/2D ou large échelle	Modélisation des flux (hydrologique / statique)
	Bief	Structurelle grise (immunisation/régulation)	Pluie/débit ou Atlas	1D/2D	Modélisation des flux (hydraulique) ou espace de mobilité ou non probabiliste
		Structurelle verte (emprise)	Pluie/débit	1D/2D ou large échelle	Modélisation des flux (hydrologique / statique) ou espace de mobilité ou non probabiliste
		Aménagement / réglementaire	Pluie/débit	1D/2D ou large échelle	Modélisation des flux (hydrologique / statique) ou espace de mobilité ou non probabiliste
Récurrence (niveaux maximaux)	BV	Structurelle grise (immunisation/régulation)	Pluie/débit ou Atlas si non influençant le débit	1D/2D	Espace de mobilité ou modélisation des flux (hydraulique) ou non probabiliste
		Structurelle verte (emprise)	Pluie/débit	Large échelle ou 1D/2D	Espace de mobilité ou modélisation des flux (hydrologique / statique) ou non probabiliste
		Aménagement / réglementaire	Pluie/débit	Large échelle ou 1D/2D	Espace de mobilité ou modélisation des flux (hydrologique / statique) ou non probabiliste
	Bief	Structurelle grise (immunisation/régulation)	Atlas	1D/2D ou large échelle	Espace de mobilité ou non probabiliste
		Structurelle verte (emprise)	Atlas ou Pluie/débit	1D/2D ou large échelle	Espace de mobilité ou non probabiliste
		Aménagement / réglementaire	Atlas ou Pluie/débit	1D/2D ou large échelle	Espace de mobilité ou non probabiliste

## 4.2.2 Analyse de l'érosion des berges

Un autre facteur important des aléas fluviaux est l'érosion des berges. Selon le niveau de connaissance acquis sur cet aléa, trois méthodes d'analyse ont été identifiées.

### 4.2.2.1 Taux d'érosion et zone de mobilité

Du point de vue d'une analyse économique qui projette les dommages sur une base annuelle, le calcul du taux annuel d'érosion des berges constitue la méthode la plus précise afin de quantifier et monétiser les impacts liés à cet aléa dans une analyse coûts-avantages. La méthodologie de projection de l'érosion à l'aide d'un taux annuel moyen de déplacement est détaillée dans le rapport de Circé et al. (2016c) pour le domaine maritime. Dans le cadre des études de cas en domaine fluvial, les taux d'érosion n'étaient cependant pas disponibles. La méthode basée sur l'analyse hydrogéomorphologique de l'évolution des rivières se base sur une rétrospective historique (cartographie multidate) et des analyses de terrain à haute résolution

(transects de la bathymétrie, dépôts de surface, Lidar) pour anticiper le comportement des segments homogènes de rivières (ex. Demers et al., 2017). Ainsi, certains MRC possèdent une cartographie anticipant des zones de mobilité sur 50 ans (forte probabilité de déplacement), qui pourrait être découpée rétrospectivement à l'année près. Toutefois, la modélisation de l'impact des changements climatiques sur ces taux reste incertaine. Ainsi, pour inclure les impacts d'érosion, une méthode rapide a été utilisée dans l'analyse économique, basé sur les coûts de remplacement d'enrochements.

#### 4.2.2.2 Enrochement

Au-delà de la dynamique naturelle, les mesures de protection en place jouent un rôle crucial dans la quantification des dommages d'érosion. La cartographie de l'enrochement actuel des berges permet ainsi de cibler les zones où l'érosion est dommageable et entraîne une intervention humaine pour limiter le recul des berges. Accompagnée d'une cartographie de la zone de mobilité, de photos aériennes et d'ateliers de cartographie participative, il est possible de projeter les efforts d'enrochements futurs par photointerprétation des zones actives non protégées, et ainsi tenir compte de l'aléa d'érosion comme réellement probable et dommageable sur un horizon de temps donné. Pour l'étude de cas de Compton de ce projet, la cartographie des enrochements, appuyé par la zone de mobilité, a donc permis de quantifier l'aléa d'érosion des berges. La méthodologie de cartographie des zones d'enrochement est détaillée dans le rapport de Demers et al. (2017).

#### 4.2.3 Analyse des aléas fluviaux non probabilistes

Bien que certains aléas fluviaux soient cartographiés ou documentés par les acteurs locaux, leur probabilité d'occurrence demeure parfois incertaine ou inconnue. Leur potentiel à être modélisés est donc limité. Les risques associés à ces aléas peuvent donc être identifiés et évalués, mais de façon statique, c'est-à-dire, sans modélisation en climat futur, ni probabilité d'occurrence associée. Pour l'étude de cas du bassin versant de la rivière Chaudière, il s'agit par exemple des aléas d'érosion des berges, de submersion en eau libre des affluents de la Chaudière et de submersion par embâcles; et des aléas de cônes alluviaux et d'avulsion pour l'étude de cas de Compton. Étant donné l'analyse limitée de ces types d'aléas, ils ne peuvent être inclus au volet économique de l'analyse coûts-avantages des options d'adaptation. En effet, des flux futurs de coûts ou d'avantages probables associés aux aléas sont nécessaires. Une analyse qualitative des risques résiduels est cependant suggérée, afin de vérifier la concordance des scénarios recommandés avec la présence de ces aléas (7.5.3), pour réduire les effets adverses.

## 4.3 ANALYSE DES RISQUES

L'analyse des aléas (section 4.2) permet d'identifier les risques à l'aide de la cartographie des contraintes sur le territoire à l'étude ou de la cartographie des aléas en climat futur. Pour analyser les risques, la méthodologie consiste à dénombrer (4.3.1), puis à quantifier la valeur des actifs et activités exposés à chacun des aléas cartographiés (4.3.2). Cela permet de comptabiliser les dommages potentiels dans les zones de manifestation des aléas et ainsi prioriser la réduction des risques attendue des scénarios d'adaptation, par secteur socioéconomique. Pour les aléas dont la zone de contrainte et la cartographie en climat futur sont disponibles – soit la submersion en eau libre du chenal principal pour les études de cas de ce projet - il est suggéré d'effectuer d'abord le dénombrement à partir de la zone de contraintes afin d'avoir une base commune de comparaison avec les autres aléas fluviaux, puis à partir de la cartographie en climat futur afin d'identifier les sources divergences. Un exemple de tableau des résultats du dénombrement est présenté au **Tableau 4**. L'analyse des risques peut ensuite être complétée par une analyse de vulnérabilité aux aléas fluviaux (4.3.3), se basant sur les indices répertoriés par l'[\*Atlas de la vulnérabilité aux aléas hydroclimatiques de la population québécoise\*](#).

### 4.3.1 Dénombrement

Le dénombrement provient d'une superposition des données spatiales de recensement des actifs et activités avec les différentes zones d'aléas identifiées, à l'aide d'un système d'information géographique (SIG). Étant donné le recoupement de plusieurs aléas, une zone multi-aléas peut être créée par leur superposition. Les actifs incluent premièrement les bâtiments et terrains exposés selon leur utilisation : agricole, résidentiel, commercial, industriel, institutionnel, municipal, vacants. Les variables dénombrées sont les nombres (bâtiments, lots) et la superficie (hectares). Les infrastructures routières provinciales et municipales, les sites d'activités récréotouristiques et les actifs patrimoniaux sont aussi dénombrés. Les données analysées proviennent de sources officielles, telles que les organismes de bassins versants, les municipalités, les MRC, le Ministère de l'environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) et le Ministère de Sécurité Publique (MSP). Pour les personnes à risque, le nombre d'habitant par ménage du Recensement le plus récent (2016) est utilisé pour les bâtiments résidentiels. Les données de dénombrement à partir des unités de recensement de Statistique Canada doivent cependant être interprétées avec précaution, puisque ces unités sont parfois vastes et ne sont pas assurément représentatives d'un secteur précis comme la zone inondable.



### 4.3.2 Valorisation économique

La valeur des terres agricoles et non agricoles peut être estimée par le produit d'une valeur économique avec la proportion exacte de la superficie exposée par rapport à la superficie totale :

- La valeur des superficies de terres agricoles à risque peut être estimée par *la superficie à risque (ha) \* valeur moyenne régionale des terres agricoles* selon le [bulletin Transac-TERRES](#) publié par la FADQ. Un écart-type peut être ajouté à la moyenne régionale si la productivité des terres à l'étude est susceptible d'être nettement supérieure à celles de la région administrative. De plus, cette donnée exclut la valeur des bâtiments sur les terres agricoles. Cela produit une sous-estimation (approche conservatrice) des actifs à risque du secteur agricole.
- La valeur des superficies des terrains non agricoles à risque peut être estimée par la *Superficie du terrain à risque (ha) \* (superficie totale du terrain (ha) / Valeur foncière terrain (\$))*. Lorsque le bâtiment principal du terrain est à risque, la *valeur foncière de l'immeuble (terrain + bâtiment)* est préférée. Les valeurs foncières sont présentes au rôle d'unités d'évaluation foncière, disponible auprès des municipalités et MRC.

À noter que les bâtiments sur terrains agricoles, les infrastructures routières, les sites récréotouristiques, et les actifs patrimoniaux n'ont pu être valorisés dans les études de cas de ce projet, en raison des données incomplètes. Les pistes à explorer sont les suivantes :

- En secteur agricole, dans le cadastre, distinguer les bâtiments résidentiels des bâtiments de ferme situés sur un même lot, afin d'appliquer des fonctions de dommages différentes à ces bâtiments;
- Pour les dommages directs aux infrastructures routières, il s'agirait de construire une courbe de profondeur d'eau-dommages à partir de données historiques, afin d'estimer la relation entre la profondeur de submersion sur les routes et le coût de réparation aux infrastructures routières;
- Pour les perturbations à la mobilité sur le territoire, une des clés réside dans la durée des inondations : idéalement, modéliser la distribution des durées, ou adopter des hypothèses sur la durée moyenne améliorerait le potentiel de quantification avec l'utilisation de données d'enquête origine-destination pour classifier les types de déplacement affectés par les inondations (ex. navettage vs. activité commerciale);
- Pour les sites récréotouristiques de type récréation primaire, il s'agirait d'identifier les sites à tarification d'accès et se baser sur des données d'achalandage pour évaluer les pertes ; pour les sites de récréation secondaire,

il s'agirait de faire une enquête terrain pour quantifier la valeur d'accès au site par la méthode des coûts de transport (Brahic et Terreaux, 2009);

- Pour les bâtiments patrimoniaux, selon la nature du bâtiment, il s'agirait d'ajouter un facteur de pondération à la hausse à l'évaluation foncière, par exemple basé sur des données de transaction immobilières ou gouvernementales, selon les comparatifs disponibles à proximité et selon les propriétaires du bien.

**Tableau 4.** Exemple de dénombrement et valorisation des actifs et activités à risque

	Submersion	Érosion	...	Zone multi-aléas	Total
<b>Superficie totale (hectares)</b>					
<b>Valeur totale</b>					
<b>Agricole</b>					
<b>Nombre de terrains</b>					
<b>Superficie des terres agricoles (ha)</b>					
<b>Superficies en culture (ha)</b>					
<b>Valeur – Secteur agricole</b>					
<b>Résidentiel</b>					
<b>Nombre de terrains</b>					
<b>Nombre de bâtiments</b>					
<b>Nombre de personnes à risque</b>					
<b>Valeur – Secteur résidentiel</b>					
<b>Commercial &amp; industriel</b>					
<b>Nombre de terrains</b>					
<b>Nombre de bâtiments</b>					
<b>Valeur – Secteur C &amp; I</b>					
<b>...</b>					
<b>Nombre de terrains</b>					
<b>Nombre de bâtiments</b>					
<b>Valeur – Secteur ...</b>					
<b>Infrastructures routières</b>					
<b>Routes Municipales (mètres)</b>					
<b>Ponts Municipaux</b>					
<b>Routes Provinciales (mètres)</b>					
<b>Ponts Provinciaux</b>					
<b>Récréotourisme et Patrimoine</b>					
<b>Site récréotouristiques</b>					
<b>Nombre d'actifs patrimoniaux</b>					

### 4.3.3 Vulnérabilité aux impacts

Chaque communauté est différente quant à sa vulnérabilité de subir les conséquences d'aléas climatiques. L'analyse de la vulnérabilité aux aléas fluviaux se base sur les indices répertoriés par l'[Atlas de la vulnérabilité aux aléas hydroclimatiques de la population québécoise](#) (Barette et al.) pour les aires de diffusion statistiques (FID) qui couvrent le territoire à l'étude. La vulnérabilité se définit selon l'Atlas comme une fonction de la sensibilité des aires de diffusion socioéconomiques et de leur capacité à faire face aux aléas. Autrement dit : si une FID est frappée par un événement climatique extrême, sera-t-elle plus ou moins affectée (sensibilité des individus) et est-ce que la communauté pourra y remédier de façon plus ou moins efficace (capacité à faire face).

Les indicateurs pris en compte dans le calcul de la sensibilité et de la capacité à faire face sont présentés dans le **Tableau 5**. L'Atlas offrant une carte interactive très intuitive et exhaustive, elle permet à tous de consulter ces deux indices et leurs déterminants pour la grande majorité des FID du Québec. À l'aide de ces indices, l'Atlas compile un indice de vulnérabilité, aussi rapporté dans sa cartographie. Toutes les données peuvent être extraites de l'Atlas.

**Tableau 5.** Liste des indicateurs permettant le calcul des indices de sensibilité et de capacité à faire face

Indicateurs permettant de construire l'indice de sensibilité	Indicateurs permettant de construire l'indice de capacité à faire face
Proportion de personnes d'âges sensibles (%)	Distance du plus proche établissement de santé (mètres)
Proportion de personnes n'ayant aucun certificat, diplôme ou grade (%)	Distance de la plus proche caserne de pompier (mètres)
Proportion de personnes immigrantes récentes (%)	Distance de la plus proche station de police (mètres)
Proportion de personnes ne connaissant pas une langue officielle (%)	Distance de la plus proche pharmacie (mètres)
Proportion de personnes vivant seules (%)	Distance du plus proche centre hospitalier de soins généraux et spécialisés (mètres)
Proportion de familles monoparentales (%)	Distance du plus proche centre local de services communautaires (mètres)
Proportion de logements loués (%)	Distance du plus proche établissement scolaire (mètres)
Fréquence du faible revenu en 2015 fondé sur la mesure de faible revenu après impôt (%)	
Proportion de locataires consacrant 30 % ou plus du revenu du ménage à l'habitation (%)	
Taux d'inactivité (%)	

Proportion de logements nécessitant des réparations majeures (%)	
Proportion de résidences construites avant 1975 (%)	

SOURCE : BARRETTE ET COLL, ATLAS DE VULNÉRABILITÉ

Dans les études de cas de la rivière Coaticook et du bassin versant de la rivière Chaudière, ces indicateurs n'ont été intégrées que de façon qualitative à l'analyse. Autrement dit, la vulnérabilité (sensibilité et capacité à faire face) n'a pas été mise en relation avec le risque d'aléas. La contrainte de temps de production et les limites de ces indicateurs ont causé ce choix.

Les prochains projets reprenant cette méthodologie pourraient décider d'intégrer quantitativement les composantes de l'indice de vulnérabilité. Par exemple, une inondation sur une FID avec une très faible vulnérabilité (faible sensibilité et/ou forte capacité à faire face) pourrait avoir un poids différent dans les calculs, par rapport à une FID avec une forte vulnérabilité. Cette intégration quantitative pourrait prendre plusieurs formes :

- Une croissance des coûts des inondations lorsque la FID a une faible capacité à faire face. Par exemple, si les pompiers sont à 250 mètres du lieu d'inondation ou s'ils sont à 50 kilomètres, les coûts ne seront pas les mêmes. De la même façon, la relocalisation temporaire des citoyens dans un centre communautaire à 500 mètres de leur domicile n'aura pas la même incidence qu'une relocalisation à 60 kilomètres.
- Une croissance des coûts lorsque la FID a une forte sensibilité. Par exemple, si une population est particulièrement sensible (âge moyen plus élevé, statut plus précaire, etc.), les événements extrêmes se répercuteront de façon plus importante sur les coûts psychosociaux (détresse, consommation d'alcool, etc.).

L'interprétation des analyses quantitatives à partir des indicateurs de vulnérabilité doit cependant être nuancée étant donné les limites des indicateurs. Premièrement, l'échelle géographique des FID est moins appropriée en milieu agricole qu'en milieu urbain, entraînant une grande variabilité à l'intérieur même d'une FID, surtout pour les propriétés riveraines et leurs occupants. Aussi, la distance de certains services comme les pharmacies compte peu pour des événements d'inondation. La pharmacie peut être proche mais inaccessible ou plus loin mais accessible sans trop de problème, selon le niveau d'inondation du réseau routier et l'isolement géographique entraîné. Considérant ces limites et les contraintes de temps d'un projet d'ACA, l'analyse *qualitative* des indicateurs de vulnérabilité peut s'avérer être le choix le plus judicieux.

## 4.4 ÉVALUATION DES RISQUES

À partir du dénombrement des actifs et activités à risque de la section précédente, il est possible d'évaluer et de prioriser les enjeux selon le degré de probabilité et le degré de conséquences à l'aide d'un outil classique en gestion de risque : la matrice de risque (ex. ISO31000:2018).

Un exemple de matrice de risque avec une approche multi-aléas est illustrée au **Tableau 6**. En l'absence de directives provinciales d'aménagement, les seuils de probabilités sont arrimés aux principes de gestion du territoire basé sur l'exposition ayant cours depuis les deux plans du MSP (2018) et du MAMH (2020), incluant les changements climatiques. Les seuils de conséquences sont empiriques et se basent sur la distribution des proportions du dénombrement, en valeur monétaire de préférence; en indicateurs de dénombrement pour les autres (ex. routes). Pour les actifs exposés aux aléas non-probabilistes, les probabilités doivent être considérées, dans la mesure du possible, selon les connaissances établies et les témoignages recueillis. Il est recommandé d'identifier les aléas pour lesquels le manque de connaissances est particulièrement contraignant et d'identifier les pistes de recherche et d'acquisition des connaissances permettant d'y palier dans le futur. Dans l'interprétation, il faut se rappeler que la classification d'ensemble est relative au territoire étudié en raison des seuils de proportion empiriques, et non à des seuils absolus comparables à l'échelle provinciale.

**Tableau 6.** Matrice de risque multi-aléas

Classification	Sévère : >25% actifs exposés Infrastructures essentielles			<b>Zone multi-aléas</b>
	Modérées : 10-25% actifs exposés			
	Mineures : < 10% actifs exposés			
		Faible <1 % ou incertaine (< 1:100)	Moyenne 1-5 % (1:20-1 :100)	Forte >5 % (> 1:20)
Probabilité d'occurrence sur l'horizon temporel analysé				

Cette approche a l'avantage de cerner de manière explicite et assez rapide les principales sources de dommages qui se retrouveront dans la quantification économique du scénario de référence ; et ainsi, assez tôt dans le processus permettre d'élaborer des scénarios efficaces pour réduire les dommages, de manière intentionnelle.

En résumé, la phase d'analyse de risque se base une approche multi-aléas inspirée des standards ISO31000 en gestion de risque. Elle permet d'abord d'analyser les risques fluviaux en climat actuel et futur, selon les connaissances, les cartographies et les modélisations disponibles. Ensuite, il s'agit d'identifier les risques pour différents secteurs socio-économiques au moyen du dénombrement, de la valorisation et de l'évaluation de la vulnérabilité des actifs, activités et personnes à risques. Cette phase se conclut par une évaluation des risques multi-aléas, selon leur degré de probabilité et de conséquences. L'exhaustivité de la démarche permet d'enclencher une construction des scénarios d'adaptation éclairée par une gamme de risques possibles. À temps et ressources limitées, l'analyse de risque permet également de prioriser de façon rigoureuse certains enjeux.



## 5. SCÉNARISATION DES STRATÉGIES D'ADAPTATION

À ce stade-ci, le terrain est balisé. Les étapes précédentes auront permis de caractériser le territoire à l'étude, d'identifier et d'analyser les risques fluviaux inhérents, ainsi que d'évaluer les enjeux selon le degré de probabilité et le degré de conséquences. Ceci permet d'établir pour quels secteurs prioritaires les scénarios d'adaptation devraient réduire en priorité les dommages liés aux zones d'aléas. La première étape consiste d'abord à définir le scénario de référence de l'analyse, à partir duquel les scénarios d'adaptation seront comparés. Ensuite, ce chapitre permet de déterminer dans un processus de co-construction les différents scénarios d'adaptation.

### 5.1 SCÉNARIO DE RÉFÉRENCE

#### 5.1.1 Définition du scénario de référence

Le scénario de référence représente le point de départ de l'ACA. Il est le point de comparaison à partir duquel les coûts et avantages de différents scénarios d'adaptation sont évalués, afin d'établir la rentabilité des scénarios. La quantification économique des dommages qui lui sont associés permet de comprendre le potentiel de coûts à éviter et donc, les bénéfices potentiels des divers scénarios d'adaptation.

Selon Penning-Rowsell (2013), deux scénarios de référence sont couramment utilisés en analyse coûts-avantages de la gestion des risques d'inondation et d'érosion côtière :

- La non-intervention : ne poursuivre aucune mesure et permettre la détérioration des actifs (ex. arrêt de l'émission d'avertissements d'inondation, cessation de l'entretien des digues ou d'entretien des berges, abandon des dispositifs de gestion des incidents d'inondation);
- L'intervention minimale : le minimum d'action pour conserver certaines défenses ou ouvrages de protection et se conformer à la législation.

Pour les deux études de cas de ce projet, la deuxième option de scénario de référence a été retenue. Plus précisément, le scénario de référence correspond à une situation de statu quo où les pratiques de gestion des risques et les programmes d'indemnisation des dommages existants se poursuivent, sans aucune autre intervention majeure.



*Piste de réflexion* : Le scénario de référence de la non-intervention offre cependant une valeur ajoutée en permettant de comparer les scénarios d'adaptation à l'inaction face aux changements climatiques et ses répercussions sur les aléas fluviaux. Le scénario de statu quo où les pratiques actuelles de gestion des risques sont maintenues peut ensuite être évalué comme un scénario d'intervention à part entière et comparé à d'autres scénarios d'adaptation, afin d'évaluer la rentabilité des actions présentement mises en œuvre sur un territoire.

## 5.1.2 Identification des impacts du scénario de référence

Les principaux impacts et secteurs de dommages sous le scénario de référence sont identifiés lors des activités participatives (section 3.5), du dénombrement des actifs et activités à risque (5.3), dans les projets similaires réalisés sur le territoire à l'étude et dans la littérature (ex. Penning-Rowsell et al., 2013; Circé et al., 2016a).

Le **Tableau 7** présente la liste de l'ensemble des impacts identifiés dans le cadre de ce projet, par aléas fluviaux. Il est évidemment possible d'analyser d'autres impacts selon les aléas fluviaux et les risques évalués sur le territoire à l'étude. En complément de l'analyse de risque, l'identification de ses impacts permet d'anticiper les secteurs d'intervention à prioriser lors de la scénarisation des stratégies d'adaptation.

**Tableau 7.** Liste d'impacts par secteur, par aléa fluvial

<b>Coûts liés à la submersion</b>
<b>Gestion des urgences – secteur municipal</b>
Nettoyage des débris résidentiels
Intervention d'urgence (enlèvement d'embâcles et voirie, surveillance)
Soutien aux sinistrés (centre d'aide)
<b>Secteur résidentiel</b>
Dommages aux bâtiments
Évacuation et relocalisation
<b>Secteur agricole</b>
Dommages aux cultures
Nettoyage des débris en champs
<b>Secteur commercial et industriel</b>
Dommages aux bâtiments
Perte de stock
Perte de journées de production
Pertes de vente
Pertes de revenus locatifs
Pertes d'achalandage aux sites récréotouristiques
<b>Secteur public et transport</b>
Dommages aux bâtiments institutionnels
Dommages aux infrastructures de transport

<b>Coûts liés à la submersion</b>
Incidence économique de la fermeture de routes/ chemin de fer
Incidence économique des ralentissements routiers
<b>Impacts psychosociaux</b>
Stress et détresse
Blessures et décès
Dépenses et soins supplémentaires
Pertes de salaires
<b>Coûts liés à l'érosion des berges</b>
<b>Secteur résidentiel</b>
Pertes de terrain ou bâtiments résidentiels
<b>Secteur agricole</b>
Pertes de terres agricoles ou bâtiments agricoles
<b>Coûts liés à l'avulsion</b>
Actifs résidentiels
Actifs agricoles
Autres actifs
<b>Avantages connexes</b>
<b>Services écosystémiques :</b>
Habitats fauniques
Qualité de l'eau – Nutriments (N, P)
Qualité de l'eau – Sédiments
Séquestration du carbone
<b>Usages publics des espaces naturels :</b>
Activités récréotouristiques
<b>Secteur agricole</b>
Récolte des bandes riveraines

### 5.1.3 État de référence de l'environnement

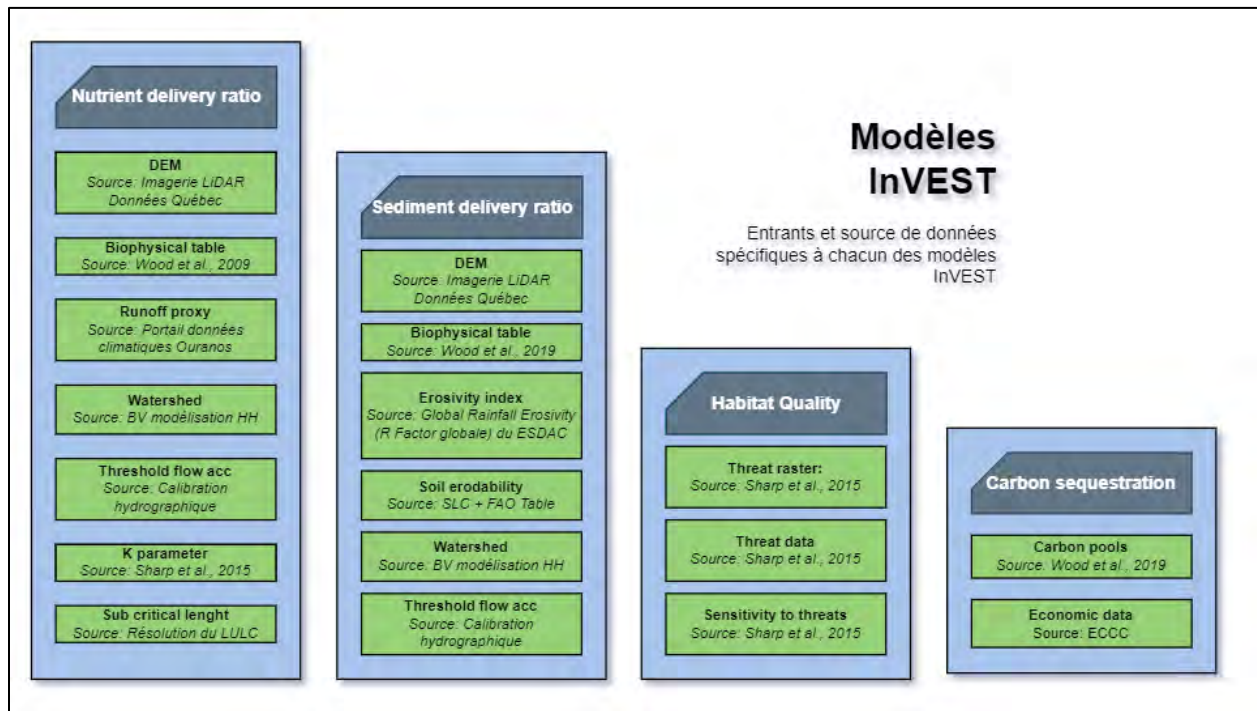
Afin de mesurer et quantifier l'impact environnemental des différents scénarios d'adaptation, l'état de référence (ou état initial) de l'environnement doit d'abord être réalisé pour offrir une base comparative. L'approche adoptée dans ce projet vise à quantifier les bénéfices environnementaux fournis à la société en modélisant les flux de différents services écosystémiques à l'intérieur de la zone d'étude. Évaluer la totalité des avantages fournis par la nature est une entreprise complexe qui surpasse les besoins de ce projet. Ainsi, une évaluation partielle de l'environnement a été réalisée grâce à la suite de modèles InVEST ([Natural Capital Project - InVEST](#)), produite par l'université de Stanford. En accès libre et gratuit, cette gamme d'outils spatialement explicites permet de cartographier et de quantifier jusqu'à 26 services écosystémiques. Sur la base des critères de sensibilité potentielle à l'implantation des

mesures incluses dans les scénarios des études de cas ce projet, quatre modèles ont été retenus :

- Transport des nutriments (Qualité de l'eau)
- Transport des sédiments (Qualité de l'eau)
- Séquestration du carbone
- Qualité de l'habitat.

L'opérationnalisation des modèles InVEST pour la modélisation des services écosystémiques nécessite l'acquisition et le formatage d'une variété de données spécifiques à chacun des modèles. Il importe donc d'utiliser les données accessibles les plus complètes, précises et actuelles comme intrants à la modélisation.

Si plusieurs données nécessaires sont spécifiques à certains modèles (classes pédologiques, modèle numérique de terrain, modèle d'érodabilité, etc.) (**Figure 6**), la suite InVEST utilise comme base de référence un format matriciel de *landuse and landcover* (LULC) pour plusieurs de ses modèles, auquel est jumelée une matrice de valeurs biophysiques établissant les propriétés de chacune des classes d'utilisation du territoire. Pour cette étude de cas, le jeu de données d'utilisation du territoire de 2017 produit par le MELCC combiné aux tableaux issus des travaux de Wood et al. (2019) ont permis de construire la charpente informationnelle aux modèles InVEST. L'information géographique étant donc sensible à la résolution spatiale de l'utilisation du territoire - normalement de 30m x 30m - celle-ci a été éclatée en 10 m x 10 m, afin d'optimiser l'intégration des mesures d'adaptation sous forme vectorielle avec la vitesse de traitement par ordinateur. Pour cette étude de cas, l'ajustement de la résolution a également été effectué pour le modèle numérique de terrain (MNT) conçu avec les relevés LiDAR du MFFP, normalement de 1 m x 1 m.



**Figure 6.** Modèles InVEST utilisés pour établir l'état de référence de l'environnement, paramètres d'entrée et sources de données

Une fois les modèles paramétrés et calibrés, la modélisation des services écosystémiques permet de quantifier (toujours de manière partielle) l'état de référence de l'environnement pour la zone d'étude. À partir de ce scénario de référence, il sera possible de construire les différents scénarios d'adaptation afin de les comparer et évaluer les solutions gagnantes du point de vue environnemental.

## 5.2 COMPOSITION D'UN SCÉNARIO D'ADAPTATION

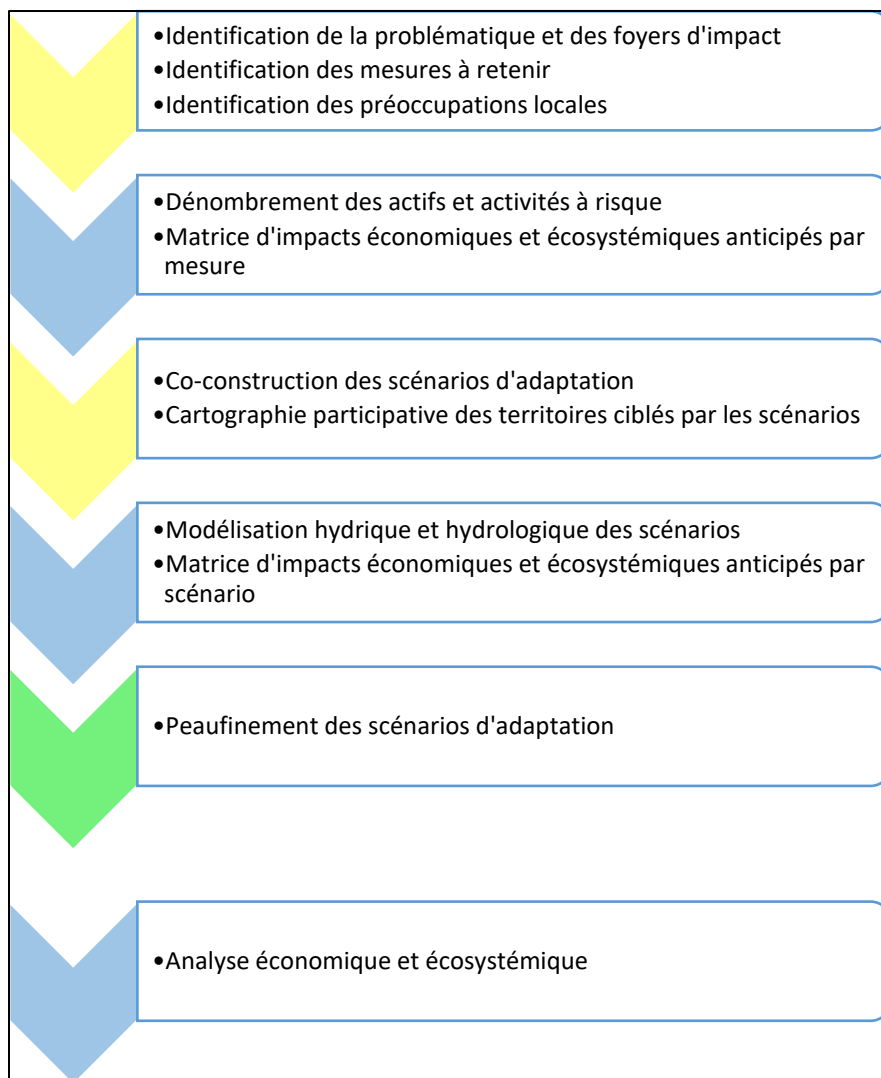
Un scénario d'adaptation aux aléas hydro-climatiques est une mesure ou un ensemble de mesures permettant d'atténuer les conséquences de ces aléas sur les activités et les communautés humaines et sur les écosystèmes. Toutes les mesures peuvent être placées sur un spectre allant des mesures dites « grises » vers les mesures dites « vertes ». Les premières font essentiellement référence à des approches "traditionnelles" à forte composante anthropique/mécanique. Les secondes font appel aux écosystèmes et à la régulation naturelle des milieux à risque pour produire des biens et services écologiques qui contribuent à la résilience climatique. Ce type d'approche est actuellement en émergence car elle présente un intérêt certain en matière de diversités de bénéfiques et est particulièrement intéressante quand on parle de zones inondables. Face à un cours d'eau ayant une récurrence d'inondations très élevée, il est possible de construire des digues (mesure « grise ») sur la rive, protégeant les collectivités des risques d'inondations, ou alors de délocaliser les actifs et activités des territoires les plus à risque en réglementant un

corridor de mobilité du cours d'eau (mesure « verte »). Sur ce spectre se trouvent plusieurs mesures, plus ou moins employées et comportant des coûts plus ou moins grands, de même que différentes capacités à réduire les conséquences des aléas. Une des grandes leçons des études de cas est que le scénario optimal mise généralement sur la combinaison de mesures d'un côté et de l'autre du spectre. La **Figure 7** rapporte sommairement les grandes catégories de mesure, jointes d'exemples et sur un spectre d'adaptation-transformation de la société.

		Catégories	Exemples
Adaptation	Structurelles ou physiques	Ingénierie et environnement bâti	Digue de protection contre les crues, levées et ponceaux, drainage amélioré, abris contre les inondations
		Technologiques	Système de prévision et d'alerte, système d'irrigation intelligent, cartographie et suivi des zones à risque
		Bio-ingénierie ou basées sur les écosystèmes	Restauration des milieux humides et de la plaine inondable, corridor écologique
Transformation	Institutionnelles	Économiques	Incitation financière, assurances, paiements pour services écologiques
		Loi et réglementation	Loi de zonage des terres, loi ou accord sur l'eau, normes et pratiques du bâtiment
		Politiques et programmes	Plans régionaux d'adaptation, gestion basée sur les écosystèmes, programme de diversification économique
Sociales		Éducation	Travail de sensibilisation, services de vulgarisation, recherche participative
		Comportementales	Préparation et planification de l'évacuation, migration, diversification des sources de revenus, changement des pratiques de culture

**Figure 7.** Catégories et exemples de mesures d'adaptation (GIEC, 2014)

La **Figure 8** représente un exemple de processus général de co-construction des scénarios d'adaptation pour une étude de cas. Les flèches jaunes sont liées à des étapes réalisées en rencontres avec les différentes parties prenantes, les bleues font référence à des étapes réalisées par l'équipe de projet et la verte peut être faite par l'une ou l'autre. Les deux dernières étapes peuvent être sujettes à une boucle rétroactive, les scénarios pouvant être revisités, que ce soit par l'équipe de projet ou par les instances consultatives, en prenant connaissance de résultats économiques préliminaires. En effet, certains scénarios qui pouvaient sembler prometteurs peuvent être grandement influencés par certains postes d'impacts spécifiques. À la vue de ces résultats, les scénarios peuvent être modifiés pour refléter l'incidence de ces différents postes d'impacts. Un cas de figure typique serait de combiner certains éléments d'un ou deux scénarios pour construire un scénario hybride optimal, réduisant les coûts de mise en œuvre de scénarios ayant d'importants coûts de mise en place ou d'opportunité ou améliorant le résultat à faible coût. Il est aussi possible de revoir certaines cibles ou hypothèses à ce moment.



**Figure 8.** Exemple de processus de co-construction des scénarios d'adaptation

### 5.3 INVENTAIRE DES MESURES

Pour les études de cas de ce projet, 14 mesures ont été répertoriées et analysées, selon la revue de la littérature, les rencontres avec les spécialistes et professionnels dans les communautés. Les sections 5.3.1 à 5.3.14 brossent le portrait rapide de l'inventaire des mesures possibles et réfèrent au rapport sur l'estimation du coût des mesures (Heinrich et al., 2021) lorsque qu'une fiche synthèse de l'estimation des coûts d'implantation de la mesure y est disponible.

Il est évidemment possible d'analyser d'autres mesures et reprendre la séquence logique d'anticipation des différents impacts décrite dans la section 5.4. Un des éléments à prendre en compte lors du recensement des différentes mesures qui sont sur la table est la réglementation. Est-ce que les mesures entrent en conflit avec

certaines réglementations en place dans la zone d'étude? Par exemple, la présence de bâtiments patrimoniaux ou de milieux protégés peut écartier *de facto* certaines mesures. Il en est de même avec les contraintes externes, qu'elles soient géomorphologiques, liées aux juridictions ou aux champs de compétences ou bien techniques.

### 5.3.1 Dignes

La digue constitue une mesure fréquemment employée face aux aléas fluviaux, notamment parce qu'elle est employée, en urgence, autour des résidences lorsque le risque d'inondation devient trop important.<sup>5</sup> D'une perspective de prévention des aléas, une digue est un ouvrage industriel, par exemple de sable, de terre ou de ciment, qui sépare les communautés des cours d'eau ou des plans d'eau à risque d'inondation. Cette mesure vise à immuniser la collectivité en restreignant l'eau à son emplacement régulier (Biron *et al.*, 2020). La digue doit cerner tous les actifs et activités à risque et doit être entretenue convenablement pour préserver son efficacité face à une pression hydrique extrême. Elle doit aussi être plus élevée que le niveau d'eau de récurrence le plus faible estimé. Sinon elle devra être rehaussée d'urgence lorsque ce niveau sera envisagé. Une fiche synthèse de l'estimation des coûts d'implantation de l'endiguement des berges est disponible dans le rapport sur l'estimation du coût des mesures (Heinrich *et al.*, 2021).

### 5.3.2 Dragage

Le dragage consiste en une excavation du lit de la rivière ou de ses tributaires, permettant une « augmentation de la capacité d'évacuation du chenal lors des crues » (Biron *et al.*, 2020). Autrement dit, la rivière est creusée pour qu'une augmentation du niveau de l'eau lors de crues soit moins élevée, relativement aux rives, actifs et activités à risque. Il s'agit aussi d'une mesure d'immunisation des collectivités en réduisant les coûts de l'aléa. Une fiche synthèse de l'estimation des coûts d'implantation du dragage est disponible dans le rapport sur l'estimation du coût des mesures (Heinrich *et al.*, 2021).

### 5.3.3 Enrochement (avec végétalisation ou phytotechnologie)

Cette mesure est spécifique à la problématique de l'érosion des berges, grugeant graduellement les rives d'une rivière. L'érosion devient particulièrement importante lors de crues plus intenses, donc que le niveau d'eau atteint un seuil plus élevé et le débit augmente considérablement. L'érosion graduelle des berges se répercute en

---

<sup>5</sup> Organisation de la sécurité civile du Québec. *Protection contre les crues*. [En ligne] <https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/urgence-quebec/feuillelet-digue-sacs-de-sable.pdf?1583357466> (page consultée le 15 février 2020)

une perte de territoire pouvant être utilisé par les communautés. L'enrochement renforce les berges et évite cette érosion. Une fiche synthèse de l'estimation des coûts d'implantation de l'enrochement avec végétalisation est disponible dans le rapport sur l'estimation du coût des mesures (Heinrich et al., 2021).

*Piste de réflexion* : Il est à noter que depuis décembre 2020, le *règlement sur l'encadrement des activités en fonction de leur impact sur l'environnement* (REAFIE) stipule que la méthode la plus susceptible de favoriser la végétalisation doit être employée pour la stabilisation de berges., Une grande proportion des enrochements existants sont devenus non-conformes. L'ajout ou la reconstruction dépassant ou cumulant une longueur de 30 m doit faire l'objet d'une autorisation ministérielle. Pour estimer les coûts de remplacement des enrochements, nous avons dû tenir compte de cette modification réglementaire en se basant sur des coûts avec végétalisation ou phytotechnologie.

### **5.3.4 Bassin de rétention**

Le bassin de rétention permet de « stocker temporairement les eaux de pluie et en les relâchant à des débits contrôlés vers les milieux récepteurs » (MELCC, *Guide de gestion des eaux pluviales*, Biron et al., 2020). Cette mesure s'adresse spécifiquement à la réduction des pics d'écoulements en stockant partiellement les crues. Une fiche synthèse de l'estimation des coûts d'implantation d'un bassin de rétention est disponible dans le rapport sur l'estimation du coût des mesures (Heinrich et al., 2021).

### **5.3.5 Bassin de rétention surdimensionné**

Le bassin de rétention surdimensionné a comme vocation de retenir les masses d'eau en amont du secteur à risque, notamment dans les tributaires du chenal principal, de façon à ralentir le débit dans le secteur à risque. Toutefois, comme son nom l'indique, il est de volume beaucoup plus important et s'adresse aux problématiques extrêmes.

### **5.3.6 Gestion des barrages**

Les barrages ont été couramment utilisés dans la réduction des aléas au Québec. Situés en amont du secteur à risque, ils permettent de retenir le débit et pourraient, dans ce cas, être greffés à un bassin de rétention. L'une des mesures qui pourrait être intégrée dans une étude de cas pourrait être d'optimiser la gestion du barrage, notamment en augmentant la masse d'eau qui peut être retenue par le barrage ou en jouant sur le débit qui s'en écoule.



### **5.3.7 Système de prévision et d'alerte**

Les systèmes de prévisions et d'alertes visent exclusivement à la sécurité des individus. Ils peuvent prendre diverses formes (appels téléphoniques, messages texte, courriels, etc.) et activés en fonction des variations importantes des débits ou niveaux d'eau observés aux stations hydrométriques du plan ou cours d'eau. Cette seule mesure ne permet pas d'immuniser davantage les actifs et activités à risque.

### **5.3.8 Relocalisation des propriétés résidentielles, commerciales et/ou institutionnelles**

Sur un territoire à fort risque de subir les conséquences des aléas, par exemple dans la zone de récurrence 0-20 ans (5% de probabilité d'inondations), il est possible de relocaliser les propriétés vers des secteurs à plus faible récurrence d'aléas. Ainsi, on diminue directement les coûts occasionnés par les aléas, que ce soient les coûts des actifs qui subiraient des dommages, les coûts sociosanitaires ou bien les coûts psychosociaux pour les individus. Une fiche synthèse de l'estimation des coûts de la relocalisation des bâtiments est disponible dans le rapport sur l'estimation du coût des mesures (Heinrich et al., 2021).

### **5.3.9 Immunisation individuelle des bâtiments**

Dans une zone de récurrence plus faible, par exemple 0-100 ans (1% de probabilité d'inondation), une avenue moins coûteuse et drastique que la délocalisation pourrait être l'immunisation individuelle des bâtiments. Les propriétaires peuvent conserver leur propriété, mais ils sont appelés à se prémunir contre les coûts engendrés par la submersion. Par exemple, il est possible de rehausser d'un étage les actifs coûteux ou les boîtes électriques, ou encore d'étanchéfier les étages à risque. Une fiche synthèse de l'estimation des coûts d'élévation des bâtiments est disponible dans le rapport sur l'estimation du coût des mesures (Heinrich et al., 2021).

### **5.3.10 Adaptation des pratiques agricoles et aménagements hydro-agricoles**

Certaines pratiques agricoles, notamment le drainage de la superficie de production, peuvent accélérer le ruissellement et, ultimement, alimenter la dynamique menant à des pics de débits et de niveaux d'eau extrêmes. Une mesure qui pourrait jouer sur les aléas serait soit de restreindre ou d'optimiser les pratiques de drainage, encourager les cultures intercalaires ou sur résidus, ou de compenser les effets du drainage par des aménagements hydro-agricoles de rétention (reprofilage de fossés, seuils, fossés avaloirs, petits bassins d'eau claire, etc.) dans les secteurs des tributaires, en amont ou dans la zone à risque. Ainsi, les territoires agricoles, par un portfolio de mesures

adaptées et résilientes, peuvent offrir une contribution à la lutte contre l'accélération du ruissellement et, selon la taille des aménagements, certaines pourraient retrouver leur vocation de milieu humide. Des modalités saisonnières pourraient être envisagées pour ce statut, selon une approche actuellement testée aux abords du lac St-Pierre ([Pôle LSP, en cours](#)). Une fiche synthèse de l'estimation des coûts d'implantation des aménagements hydro-agricoles et de la culture sur résidus est disponible dans le rapport sur l'estimation du coût des mesures (Heinrich et al., 2021).

### **5.3.11 Restriction des cultures permises dans la zone inondable**

Un des coûts importants des inondations est les pertes agricoles qui découlent de la submersion des terres. La perte de certaines cultures (maïs, légumes, etc.) entraîne des coûts importants lorsque la parcelle est inondée, alors que d'autres, notamment les plantes fourragères, occasionnent des pertes moins importantes. Pour réduire les coûts des aléas futurs, il est possible de restreindre les cultures et pratiques agricoles permises en rive, littoral et plaines inondables.

### **5.3.12 Milieux humides**

Les milieux humides ont une grande incidence sur les aléas fluviaux, améliorant grandement la rétention des débits en amont du secteur à risque et dans les tributaires principaux. Ils forment des éponges naturelles et peuvent même conserver des masses d'eau qui, ultimement, peuvent s'y évaporer ou percoler sans se rendre au secteur à risque. Une telle mesure pourrait être davantage considérée lorsque la zone d'étude est plus vaste, permettant d'intégrer dans l'analyse la connectivité entre les différents secteurs. Selon le contexte local, cette mesure se décline selon l'état initial des milieux humides : la conservation, la restauration, voire la création de nouveaux milieux humides. Une fiche synthèse de l'estimation des coûts de restauration des milieux humides est disponible dans le rapport sur l'estimation du coût des mesures (Heinrich et al., 2021).

### **5.3.13 Bandes riveraines**

Les bandes riveraines, de largeur plus ou moins importante, sont des corridors longeant les cours et plans d'eau à risque d'aléas. Elles peuvent absorber une partie du ruissellement, agissant comme un frein au ruissellement et parfois comme zone de débordement en faible pente, elles contribuent à réduire le débit et le niveau d'eau du secteur à risque. Elles peuvent aussi permettre de réduire les coûts d'érosion des berges, retirant les actifs et activités de ces bandes. Les bandes riveraines auront aussi une incidence sur la valeur sociale du territoire, notamment en offrant des lieux récréotouristiques, voire un potentiel de bénéfices connexes si des espèces propices à la récolte sont envisagées.

### 5.3.14 Espace de mobilité ou corridor inondable

L'espace de mobilité est la mesure la plus « verte » dans le spectre gris/vert des options. Il s'agit de retirer les actifs et activités à risque des secteurs où la récurrence des aléas est importante. Ces secteurs pourraient être, par exemple, être convertis en parcs urbains, tout en sachant qu'ils subiront les aléas (submersions, érosions, cônes alluviaux, etc.) de façon récurrente ou en sites à potentiel récréotouristique en milieu naturel pour les milieux agricoles convertis (ex. parc linéaire, route bleue). La largeur dépend du contexte et peut imiter une bande riveraine autant que dépasser la centaine de mètres jusqu'à couvrir l'ensemble de la zone inondable. C'est un choix à optimiser en fonction des usages et actifs, et des récurrences et de la superposition des aléas. Il entraîne des pertes, mais aussi de grandes retombées écosystémiques, tout en constituant, selon la taille des superficies concernées, un potentiel de diversification des revenus régionaux liées à la récréation en milieu naturel. Une fiche synthèse de l'estimation des coûts d'implantation d'une zone de mobilité est disponible dans le rapport sur l'estimation du coût des mesures (Heinrich et al., 2021).

## 5.4 IDENTIFICATION DES RETOMBÉES ANTICIPÉES DES MESURES

Après avoir recensé les mesures d'intérêt, il est conseillé de consulter le tableau des impacts anticipés par mesure, rapporté dans le **Tableau B.1**, situé en annexe B. Il répertorie l'effet de chaque mesure sur chaque poste d'impact, par rapport au scénario de référence. Ce tableau est le fruit de la réflexion entre les équipes de recherche et les différents comités consultatifs et décisionnels. Il est construit à la fois à l'aide d'une revue de la littérature, de l'expérience, de rencontres avec des experts et d'intuition. Sans avoir comme vocation de prédire parfaitement les effets des mesures sur le secteur d'impact, il se veut surtout un outil d'aide à la décision. Il est à noter, que des validations supplémentaires pourraient être effectuées auprès d'autres instances gouvernementales telles que le MAPAQ, le MAMH ou le Règlement sur l'encadrement d'activités en fonction de leur impact sur l'environnement (REAFIE), etc.

## 5.5 CO-CONSTRUCTION D'UN SCÉNARIO D'ADAPTATION

Avec cette vue d'ensemble des différentes retombées des mesures prises individuellement, il est maintenant possible de construire quelques scénarios à analyser. Il s'agit de cibler une mesure pouvant potentiellement être bénéfique pour la zone d'étude, ou bien d'en combiner plusieurs agissant de façon complémentaire. Cette combinaison peut être très ciblée. Par exemple, une bande riveraine longeant tout un cours d'eau, mais tout en permettant certaines productions agricoles dans les secteurs à plus faible récurrence et relocalisant seulement les résidences particulièrement à risque, tout en immunisant celles qui le sont moins. Ces scénarios

permettent de déterminer lequel est le plus efficace pour réduire les coûts des aléas à plus faibles coûts d'implantation et à plus grand bénéfices environnementaux.

Ces scénarios doivent être construits de pair avec les différentes parties prenantes du projet, tel que décrit dans le chapitre 4. Selon l'échelle de prise de décision, les questions sont soulevées lors d'Assemblées consultatives de priorisation (ACP), de Comité local de suivi (CLS) ou de comité technique. Chacune de ces instances est appelée à différents niveaux dans le choix des mesures les plus acceptables et les efficaces sur le territoire. Par exemple, une ACP pourrait prioriser un certain niveau de restauration de milieux humides, dit « acceptable », alors que le comité technique pourrait viser un niveau plus élevé de restauration, dit « efficace ». Un constat ressortant de l'expérience est que le scénario optimal peut se retrouver à cheval entre les besoins de la communauté et l'efficacité technique. Par exemple, un accroissement drastique de la restauration de milieux humides occasionnerait d'importants coûts de relocalisation, pouvant rendre le scénario non rentable. En y greffant plusieurs éléments qui le rendent acceptable aux yeux des communautés, il est possible de réduire de façon importante les coûts de relocalisation sans diminuer de façon trop importante l'efficacité de la mesure à réduire les aléas.

Ces scénarios se construisent de façon itérative avec les différentes instances, notamment pour valider le choix et l'emplacement des mesures : quelle portion du rivage sera ciblée par l'enrochement végétalisé et sur quelle autre appliquer la modification des pratiques agricoles? Quels sont les foyers d'impact les plus importants sur le territoire? Un scénario peut évoluer avec l'avancement du projet, les rétroactions des parties prenantes et les constats préliminaires. Ce processus suit une approche ascendante/descendante.

L'approche ascendante fait référence à l'information, provenant des acteurs du milieu et ensuite utilisée dans l'analyse : ateliers de cartographie des mesures, expertises dans la gestion historique des aléas dans le secteur, etc. Il est reconnu que les populations locales détiennent un savoir crucial pour la construction des scénarios d'adaptation. En effet, elles détiennent une connaissance intuitive des manifestations des différents aléas, de l'ampleur des impacts qu'ils occasionnent dans leur communauté et des arbitrages occasionnés. En revanche, ces savoirs sont souvent fragmentés entre les différentes catégories d'acteurs. Par des ateliers participatifs avec deux niveaux de groupes de mobilisation (pouvoir décisionnel et acteurs touchés), il est possible de réaliser une cartographie des principaux impacts des aléas sur le territoire et de constituer une liste d'impacts plus précise, employée pour mettre sur pieds une grille de performance exhaustive et crédible des différents scénarios. Cette grille couvre à la fois les principaux dommages physiques à anticiper, mais également les impacts en termes sociaux, économiques et environnementaux.

L'approche descendante, quant à elle, permet de transmettre les hypothèses (provenant de la littérature, de contextes similaires ou d'entrevues avec des experts), les

constats, les écueils et les résultats préliminaires pour les valider ou les peaufiner avec les acteurs concernés. Par exemple, certaines hypothèses sur le coût du nettoyage des débris sur les terres agricoles peuvent être nécessaires et méritent d'être validées avec l'expérience des gens du milieu. Autrement, les constats et résultats nourrissent la réflexion des différents acteurs, rendant possible le pont entre l'expérience et l'analyse. Celle-ci en ressort plus crédible et acceptable par les communautés l'ayant façonnée.

## 5.6 ESTIMATION DES COÛTS D'IMPLANTATION DES SCÉNARIOS

Chaque mesure d'adaptation aux aléas fluviaux composant les scénarios nécessite des coûts d'implantation différents, notamment selon le degré d'intervention et l'état du marché des biens ou services nécessaires. Les coûts d'implantation des mesures peuvent être caractérisés en deux regroupements : les coûts des mesures (CM) incluant la conception, de réalisation et l'entretien des mesures et les coûts d'opportunité (CO). Le rapport sur l'estimation du coût des mesures (Heinrich et al., 2021) fournit les balises de l'estimation des coûts d'implantation de quatorze mesures d'adaptation, sous forme de fiches synthèses. La production des fiches synthèses a été réalisée à l'aide d'une revue de littérature et d'entrevues effectuées auprès d'experts de divers champs d'expertise.

Les *coûts des mesures* sont plus intuitifs, faisant respectivement référence aux dépenses qui sont nécessaires pour mener à bien le projet d'adaptation et pour l'entretenir de façon ponctuelle à travers les années. À noter que les coûts de mise en place des mesures dépendent de la structure de marché associée à la mise en place de l'infrastructure naturelle. Or, les coûts de production d'un bien ou d'un service varient grandement. Ces coûts pourraient être affectés à la hausse ou à la baisse dans l'avenir, selon l'évolution des structures de marché, intimement liée aux droits de propriété, qui sont conditionnés par les lois d'aménagement du territoire.

Les *coûts d'opportunités*, concept moins connu, font référence aux possibilités qui ne sont plus accessibles à la suite d'un choix posé. Par exemple, l'implantation de bandes riveraines en milieu agricole implique des coûts directs d'aménagement, mais aussi un coût d'opportunité lié à la renonciation des revenus agricoles futurs sur cette superficie. L'estimation du coût d'opportunité se base donc sur la valeur de l'usage auquel on doit renoncer par le choix posé.

Le **Tableau 8** synthétise les coûts unitaires et les sources utilisés pour l'estimation des coûts d'implantation des mesures analysées dans les deux études de cas de ce projet.

À l'aide des valeurs unitaires des coûts des mesures (CM) et des coûts d'opportunité (CO), de la dimension et localisation des mesures, de la durée de vie utile ainsi que de la fréquence d'entretien et d'un taux actualisation ( $\tau$ ) il est possible d'estimer sur un horizon temporel donné ( $t=0$  à  $T$ ) la valeur actualisée de son coût d'implantation :

$$\text{Valeur actualisée} = \sum_{t=0}^T \frac{CM_t + CO_t}{(1 + \tau)^t}$$

**Tableau 8.** Coûts unitaires des mesures et coûts d'opportunité, tirés des deux études de cas

Étude de cas	Mesures	Coûts unitaires des mesures (CM)	Coûts d'opportunité (CO)	Source et commentaires	
<b>Chaudière et Compton</b>	Restauration de milieux humides et hydriques	Conception : 10 374 \$/ha	Pertes d'usage des terres agricoles : 10 560 – 11 660 \$/ha  Perte d'usage autres terrains : Valeur foncière du terrain ou de l'immeuble	CM : MELCC (2020) et experts du milieu CO : FADQ (2018;2021) et MAMH (2019)	
		Réalisation : 13 832\$/ha			
		Entretien et admin. : 3458 \$/ha aux 10 ans			
		Entretien : 352 \$/ha			
Conversion des usages en milieu à risque (Corridor inondable ou zone de mobilité)	Démolition des lots urbains: 17 500 \$/ lot			CM : Dutemple (2019) CO : FADQ (2018;2021) et MAMH (2019)	
Corridor inondable – restriction des cultures	-	Perte de revenu due à la restriction: moyenne de 4400 \$/ha		CO : Basé sur l'écart de revenus entre les cultures en place et les cultures permises par la restriction, à partir des budgets à l'hectare du CRAAQ <sup>1</sup> et de la BDPPAD <sup>2</sup>	
<b>Chaudière</b>	Bandes riveraines	Conception et réalisation : 1,48 \$/m <sup>2</sup>	Pertes d'usage des terres agricoles : 10 560 – 11 660 \$/ha	CM: Basé sur l'outil de simulation des impacts économiques de pratiques agroforestières (Vézina et al., 2019) CO : FADQ (2018;2021)	
		Entretien : 0,03 \$/m <sup>2</sup> les 5 premières années	Pertes d'usage des terrains urbains: 0 \$		
		Récolte de bois (bénéfices) : 0,166 \$/m <sup>2</sup> aux 5 ans			
	Corridor inondable en milieux urbains	Démolition des lots : 17 500 \$/ lot	Perte d'usage des terrains urbains : Valeur foncière du lot		CM : Dutemple (2019) CO : MAMH (2019)
	Retrait des actifs aux sous-sols	-	-		Mesure à coût nul, testé en analyses de sensibilité
	Relocalisation des résidences	Démolition des lots : 17 500 \$/ lot Achat de nouvelle propriété : Valeur foncière de l'immeuble	-		CM : Dutemple (2019) et MAMH (2019)
	Élévation des commerces	Élévation du premier plancher : 100 000 \$/ commerce	-		CM : MSP (2019)
Digues	Conception et implantation :	-		CM : Adapté de TECSULT (1994)	

Étude de cas	Mesures	Coûts unitaires des mesures (CM)	Coûts d'opportunité (CO)	Source et commentaires
		de 69 800 \$ à 1,142 M \$ /digue Entretien : 10 % annuel		
<b>Compton</b>	Enrochement avec végétalisation	Conception : 20 % des coûts de réalisation	-	Biron et al. (2013)
		Implantation : 500 \$/m.l		
		Entretien : 10 % / 10 ans x 8,4 km; suivi de végétation décroissant sur 5 ans de 12 % à 1 %		
<b>Compton</b>	Dragage	Conception : 10 % de l'implantation		Rieussec (2008)
		Implantation : 72 \$/m <sup>3</sup> (+35 \$/m <sup>3</sup> pour les redevances et mises en dépôt) x 6700 m <sup>3</sup>		
		Durée de vie : 7 ans		
	Bassin de rétention	Conception et réalisation : 76 \$/m <sup>3</sup>	Pertes d'usage des terres agricoles : 10 560 – 11 660 \$/ha  Perte d'usage autres terrains : Valeur foncière du terrain ou de l'immeuble	CM : Desjarlais et Larrivée (2011)  CO : FADQ (2018;2021) et MAMH (2019)
		Entretien : 10 % de l'implantation /an		
		Durée de vie : 15 ans		
Aménagements hydro-agricoles	Conception et réalisation : 1900 \$ / ouvrage	-	CM : CRAAQ (2015a;2015b)	
	Entretien : 30 \$ / ouvrage / an			
	Durée de vie : 10 ans			
Cultures sur résidus		-	-	Mesure à coût nul, testé en analyses de sensibilité

<sup>1</sup> Le centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ), publie périodiquement des modèles de budgets à l'hectare pour différents types de cultures.

<sup>2</sup> La Base de données des parcelles et productions agricoles déclarées (BDPPAD), publiée annuellement par la Financière agricole du Québec, permet de colliger l'historique des cultures par parcelles déclarées sur le territoire à l'étude.

## 5.7 PRÉSENTATION DES SCÉNARIOS

Dans un premier temps, les terminologies employées pour les scénarios des deux études de cas de ce projet sont présentées (**Tableau 9**), alors que les « recettes » complètes ayant permis leur élaboration sont rapportées dans le **Tableau B.2** et le **Tableau B.3** situé en annexe B. Ultimement, une description individuelle à la fois efficace et détaillée des scénarios contient les éléments suivants, synthétisés sur une ou deux pages:

- Synthèse des mesures du scénario (localisation, dimension, intérêt des parties prenantes, etc.);
- Coûts des mesures;
- Efficacité sur les aléas et la réduction des dommages associés ;
- Principaux impacts identifiés.




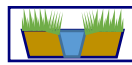



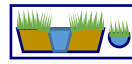



Un exemple tiré du rapport régional de l'étude de cas de Compton est présenté à l'annexe B.

La construction d'une nomenclature appropriée fait partie intégrante du processus de communication des scénarios. Les mesures de la catégorie infrastructure verte et celles impliquant une transformation des usages ont suscité certaines réactions auprès des communautés étudiées. Ainsi, il est important de tenir compte de ces sensibilités autant dans la nomenclature que dans la présentation des scénarios, en termes de portée de mise en œuvre et des limites. . L'ajout de pictogrammes peut s'avérer une stratégie efficace afin de différencier et identifier plus rapidement la composition d'un scénario à travers un rapport ou les diapositives d'une présentation.

Pour les études de cas, les scénarios ayant comme préfixe STA sont des scénarios dits "interventionnistes". Ils préconisent la stabilisation du cours d'eau et la protection des actifs, et donc combinent plusieurs mesures dites structurelles ou rigides. Les scénarios se distinguent par leur origine, celui au suffixe ACC provient du processus d'ACP et est considéré acceptable par le milieu, tandis que celui au suffixe EFF a été construit par le comité technique pour obtenir la plus grande efficacité en termes de réduction des impacts des aléas, indépendamment de leur acceptabilité. En contraste, les trois autres scénarios (au suffixe MOB) proposent de recréer la mobilité du chenal en retirant les actifs et activités à risque, permettant au système hydrologique de retrouver ses caractéristiques originales avec un impact moins élevé sur les activités humaines. Le scénario PRA concerne les pratiques agricoles. Les scénarios au préfixe MHH se fondent sur la capacité des milieux humides et hydriques à réduire les aléas. Ils sont encore une fois séparés selon l'objectif d'efficacité ou d'acceptabilité. Finalement, les scénarios au suffixe IMM visent l'immunisation des bâtiments individuels (IND) ou l'ensemble de la collectivité (COL).



**Tableau 9.** Nomenclature et pictogramme des scénarios d'adaptation des études de cas

Nom abrégé	Nom complet	Pictogramme	Étude de cas
STA-DG	Stabilisation avec dragage		Compton
STA-acc	Stabilisation acceptable		Compton
STA-eff	Stabilisation efficace		Compton
MOB-eff	Mobilité efficace		Compton
MOB-hyb	Mobilité hybride		Compton
PRA	Adaptation des pratiques agricoles		Compton
MHH-acc	Milieus humides et hydriques acceptables		Chaudière
MHH-eff	Milieus humides et hydriques efficaces		Chaudière
IMM-coll	Immunisation collective		Chaudière
IMM-ind + MHH-acc	Immunisation individuelle et Milieux humides et hydriques efficaces		Chaudière
IMM-ind + MHH-dis	Immunisation individuelle et Milieux humides et hydriques distribués		Chaudière

## **5.8 ESTIMATION DE L'EFFICACITÉ DES SCÉNARIOS**

L'estimation concrète de l'efficacité des scénarios se fait selon l'angle d'attaque des mesures : le contrôle de l'aléa ou le contrôle de l'exposition et/ou de la vulnérabilité.

### **5.8.1 Mesures visant un contrôle de l'aléa d'inondation**

Certaines mesures structurelles, telles que le bassin de rétention et le dragage, ou certaines mesures d'aménagements naturels, telles que les milieux humides et hydriques, visent un contrôle de l'aléa d'inondation, c'est-à-dire un contrôle des débits et des étendues d'eau lors des épisodes de crue, afin de réduire l'intensité de l'aléa. Selon le temps et les données disponibles, deux méthodes d'estimation de l'efficacité des mesures sur le contrôle de l'aléa sont disponibles.

La façon la plus précise d'estimer l'efficacité de ces mesures sur l'aléa est d'ajuster les paramètres de modélisation hydrologique-hydraulique afin d'intégrer les changements induits par les mesures, soit par leur dimension, localisation, coefficient de rugosité, etc. Dans le cadre des études de cas de ce projet, cette approche a été préconisée afin d'estimer l'efficacité des scénarios de contrôle des inondations. La méthodologie employée pour modéliser l'impact des scénarios sur le régime hydrique du bassin versant de la rivière Chaudière et du tronçon à l'étude de la rivière Coaticook est détaillée respectivement dans les rapports de Leconte et Bizhanimanzar (2020) et Trudel et Gobji (2020).

Sous contrainte de temps ou de capacité de calcul, il n'est toutefois pas toujours possible de procéder à une modélisation exhaustive de l'impact des scénarios sur le contrôle des aléas. L'estimation peut alors se baser sur une diminution de la proportion des dommages économiques causés par l'aléa. Une revue de littérature et des entretiens avec des experts du milieu sont cependant nécessaires afin d'établir une proportion raisonnable à appliquer, pour chaque impact identifié. Cela affecte néanmoins la robustesse et la qualité de l'estimation de l'efficacité, surtout considérant les conditions futures (avec changements climatiques) du système à l'étude.

### **5.8.2 Scénario visant un contrôle de l'exposition et/ou de la vulnérabilité**

Certaines mesures d'immunisation, telle que l'élévation du premier plancher des bâtiments et l'adaptation des pratiques agricoles, ou certaines mesures de retrait des actifs exposés, telles que la relocalisation ou la réglementation d'un corridor inondable, vise une réduction de l'exposition et ou de vulnérabilité des actifs, activités et personnes exposées aux aléas fluviaux.

La façon la plus précise d'estimer l'efficacité de ces mesures est d'ajuster les paramètres de modélisation économique afin d'intégrer les changements induits par les mesures. Par exemple, la mesure de relocalisation et le corridor inondable auront un impact sur le nombre de bâtiments et d'actifs exposés à l'aléa, l'élévation du premier plancher aura un impact sur la hauteur de submersion atteinte à un bâtiment et l'adaptation des pratiques agricoles aura un impact sur la perte de rendement annuel anticipé. Une revue de littérature et des entretiens avec des experts du milieu sont nécessaires afin d'évaluer la modification à apporter aux paramètres économiques, par mesure et par secteur.

À noter que pour l'aléa d'érosion analysé sur le territoire de Compton, l'estimation de l'efficacité des scénarios face à cet aléa ne concernait pas le contrôle de l'aléa en soit, mais plutôt l'efficacité en termes d'exposition à l'aléa. En l'absence de taux de recul annuel moyen des berges, il n'était effectivement pas possible d'estimer une variation induite par les scénarios sur ce taux. L'efficacité a plutôt été estimée en terme de variation induite par les scénarios sur l'effort d'enrochement nécessaire, et donc, sur l'exposition à l'aléa d'érosion. Cela a mené à l'adoption de l'hypothèse que les enrochements étaient bien conçus et entretenus et donc efficaces à 100% sur la période d'étude.

## 5.9 CRÉATION D'UNE MATRICE DES IMPACTS DES SCÉNARIOS

Avant de passer à la phase de monétisation, avec en main la définition des scénarios, et leur caractérisation en termes d'efficacité anticipée sur les aléas et les actifs, et leurs coûts, il reste à croiser les impacts des mesures combinées afin d'élaborer la matrice des impacts identifiés des scénarios.

Ainsi, l'efficacité des scénarios est estimée dans un premier temps de façon qualitative, en anticipant les impacts des scénarios par rapport au scénario de référence, tel qu'illustré au **Tableau 10**. Cet exercice permettra de répertorier l'ensemble des impacts sujets à la quantification et monétisation lors de l'analyse économique (6.2).

**Tableau 10.** Résumé des impacts anticipés de chacun des scénarios par rapport au scénario de référence

Scénarios		Agricole	Commercial et industriel	Résidentiel	Psycho-social	Municipal	Économique	Environnemental
		Pertes de terres Dommages aux cultures Nettoyage des champs	Dommages aux bâtiments	Pertes de terrains Dommages aux bâtiments Évacuation	Soins et dép., complémentaires Perte de productivité Perte de qualité de vie	Dépenses en gestion des urgences et nettoyage des débris	Perte de productivité due à la fermeture des routes / dommage aux institutions	Séquestration du carbone Qualité de l'eau Biodiversité
Étude de cas de la rivière Chaudière	1. MHH-ACC : Milieux humides et hydriques acceptables	+ OU -	+		+ OU -	+	+	++
	2. MHH-EFF : Milieux humides et hydriques efficaces	-	+	+ OU -		+	+	+++
	3. IMM-COLL : Immunisation collective	+	+	+	+ OU -	+	+	-
	4. MHH-EFF : Milieux humides et hydriques efficaces	+ OU -	+++	+++	+++	++	+	++
	5. MHH-DIS : Milieux humides et hydriques distribués	++	+++	+++	+++	++	+	++
Étude de cas de la rivière Coaticook	1. STA-DG Stabilisation avec dragage	+	+	+	+	+	+	-
	2. STA-ACC Stabilisation avec rétention acceptable	+ et -	+	+	+	+	+	-
	3. STA-EFF Stabilisation avec bassin surdimensionné	+	+	+	+	+ et -	+	-
	4. MOB-EFF Mobilité efficace	-	-	-	-	+ et -	aucun	-
	5. MOB-HYB Mobilité avec corridor multialéa et usage durable	+ et -	-	-	-	+	+ et -	+
	6. PRA Adaptation des pratiques agricoles	-	-	-	-	+	aucun	+
	7. MOB-HYB +PRA Combinaison de MOB-HYB et PRA	+ et -	-	-	-	+	+ et -	+

**En résumé, la phase de scénarisation des stratégies d'adaptation nécessite en premier lieu de définir le scénario de référence, incluant l'état de référence de l'environnement, à partir duquel les scénarios d'adaptation seront comparés. Les scénarios d'adaptation sont composés d'une ou plusieurs mesures aux objectifs variés en termes de réduction des aléas et de leurs impacts, selon le territoire à l'étude. Les scénarios d'adaptation sont élaborés au moyen d'échanges actifs entre les différentes instances décisionnelles et consultatives. Cette rétroaction des acteurs permet, à chaque tour de roue, d'optimiser l'efficacité des scénarios. Une fois la liste des scénarios d'adaptation consolidée, l'estimation des coûts d'implantation, de l'efficacité sur la réduction des impacts anticipés et de l'efficacité sur le contrôle de l'aléa, est réalisée pour chacun d'eux.**

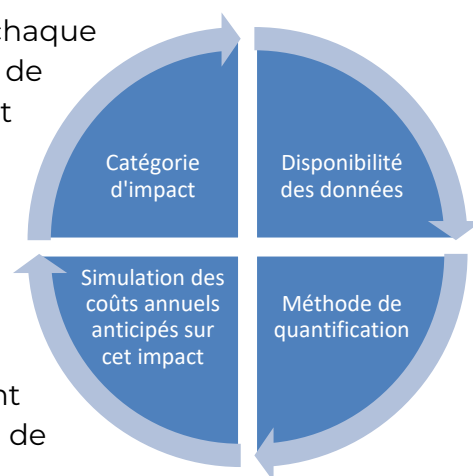


## 6. RÉALISATION DES ANALYSES COÛTS-AVANTAGES

### 6.1 MÉCANIQUE GÉNÉRALE

À ce stade-ci, le territoire à l'étude et l'horizon temporel ont bien été ciblés (chapitre 3) et les parties prenantes ont été mobilisées afin d'appuyer l'analyse de risque (chapitre 4) et la co-construction des scénarios d'adaptation (chapitre 5). Le terrain est donc mûr pour l'analyse coûts-avantages des scénarios d'adaptation afin de faire émerger le(s) scénario(s) à privilégier.

À partir de l'évaluation des impacts anticipés de chaque scénario d'adaptation par rapport au scénario de référence (**Tableau 10**), la mécanique générale peut être résumée comme une boucle qui traitera chaque impact sélectionné, telle que présentée à la **Figure 9**. Idéalement, l'ensemble des impacts anticipés sont quantifiés et monétisés. Réalistement, certains choix s'imposent, fautes de temps, de données ou de méthodes disponibles. Un seuil de significativité basé la valeur relative d'un impact lors du dénombrement des actifs et activités à risque peut être utilisé afin de guider le choix des impacts à écarter. L'expertise économique est alors à privilégier afin de bien établir les seuils de significativité et les choix d'impacts conséquents.



**Figure 9.** Mécanique générale du traitement des secteurs d'impacts

La première étape est d'identifier la catégorie d'impact à quantifier. Dans les études de cas du présent projet, quatre catégories<sup>6</sup> ont été sélectionnés pour la monétisation :

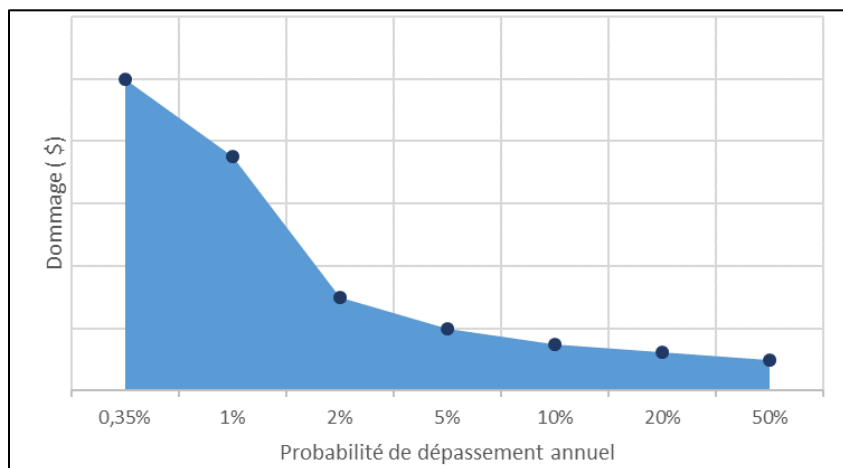
- Coûts liés aux inondations
- Coûts liés à l'érosion
- Bénéfices écosystémiques
- Bénéfices connexes

Chacune des catégories sélectionnées sera monétisée pour le scénario de référence et ensuite les scénarios d'adaptation. Les méthodes de quantification appropriées sont présentées ci-dessous.

## 6.2 MONÉTISATION DES IMPACTS DES SCÉNARIOS

### 6.2.1 Coûts liés aux inondations

La méthode d'évaluation des coûts liés aux inondations est bien connue et peu controversée (Penning-Rowsell et al., 2013). Elle combine une évaluation de l'aléa selon sa probabilité d'occurrence (voir section 4.2.1) et une évaluation des dommages qui seraient causés par ces évènements de différente ampleur, pour chaque type d'impact. La combinaison de ces évaluations permet de tracer une courbe probabilité –dommage illustrée à la **Figure 10**. Notons que sept probabilités sont illustrées, correspondant aux évènements des débits de sept probabilités de dépassement annuel choisies dans le cadre de ce projet (**Tableau 2**).



**Figure 10.** Illustration d'une courbe probabilité-dommage

<sup>6</sup> Il était impossible de monétiser les coûts liés aux autres aléas fluviaux (avulsion, cônes alluviaux) présentés au Tableau 23, en raison des limites des connaissances et de capacité de modélisation de ces aléas. Ils sont néanmoins traités de façon qualitative dans une analyse des risques résiduels (6.5.3). Les conséquences non monétisées de tout aléa devraient ainsi être traitées afin d'optimiser les dollars investis en adaptation ou prévenir la maladaptation.

Le calcul de l'aire sous la courbe probabilité-dommage renvoie à la valeur du dommage annuel moyen (DAM), utilisé comme montant annuel dans le calcul de la VAN pour chaque scénario. La méthode de calcul de l'aire sous la courbe est expliquée à l'annexe B de Circé et al. (2016c). Étant donné les deux horizons temporels choisis dans le cadre de ce projet, un dommage annuel moyen est calculé pour chaque horizon, tel qu'indiqué à l'équation suivante.

$$VAN = \sum_{t=0}^{T=20} \frac{DAM_{H1}}{(1 + 0.04)^t} + \sum_{t=21}^{T=50} \frac{DAM_{H2}}{(1 + 0.02)^t}$$

À noter que l'approche actuarielle fréquence-sévérité peut être employée comme alternative au calcul des DAM. Celle-ci permet de simuler la distribution complète des dommages et ainsi estimer la probabilité que les dommages réalisés soient supérieurs aux dommages moyens. Voir l'annexe D pour un exemple de l'approche actuarielle appliqué au calcul des dommages structurels aux résidences de l'étude de cas du bassin versant de la rivière Chaudière.

Pour chaque type d'impact lié aux inondations, le calcul des montants des dommages associés aux différents évènements -montants à l'axe des y de la **Figure 10** - peut se baser sur différentes méthodes de quantification. Le **Tableau 11** présente les paramètres et méthodes de quantification utilisés pour chaque impact lié aux inondations pour les deux études de cas, tandis que les sections suivantes résument les quatre méthodes de quantification employées, soit les courbes de profondeur d'eau-dommages, les courbes de profondeur d'eau-durée, le calcul du dommage annuel pondéré ou le transfert de valeurs issues de la littérature.



**Tableau 11.** Méthodes de quantification et paramètres de la monétisation des coûts liés aux inondations, par type d'impact

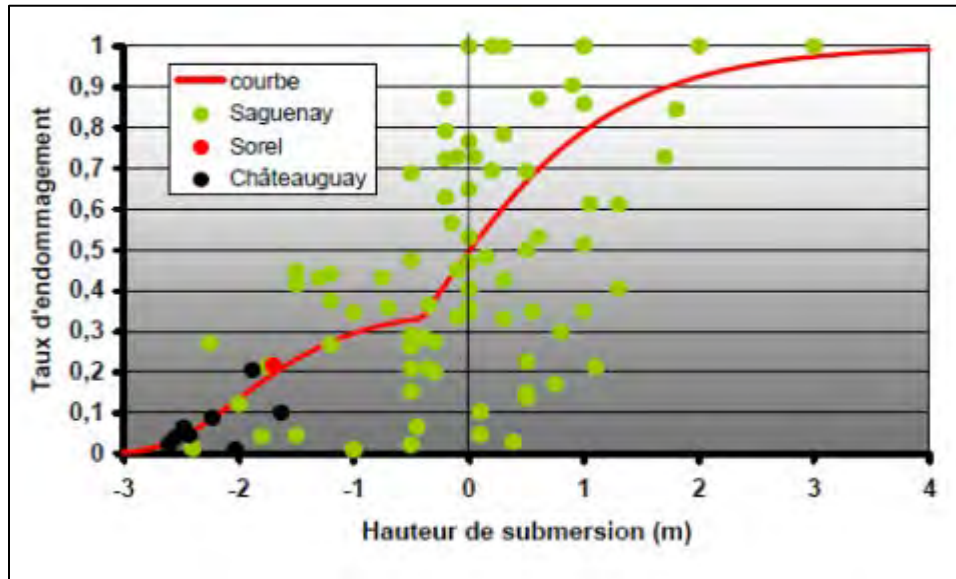
	Impact	Méthode de quantification	Hypothèses	Données	Valeurs	Sources	
Agricole	<i>Dommmage aux cultures</i>	Dommmage annuel pondéré	La perte de rendement varie selon le mois, la superficie et le type de culture	-Probabilité d'inondation mensuelle par horizon climatique	1 à 82 % / 1 à 47 %	Leconte et Bizhanimanzar, 2020 / Trudel et Gobji, 2020	
				-Perte de rendement mensuelle	0 à 100 %		Penning-Rowsell <i>et al.</i> , 2013, adapté par les CLS
				-Modèle de rotation des cultures	0 à 100 %		FADQ, 2018, adapté par les CLS
				-Marge sur coûts variables, par budget / ha	238 à 1000 \$/ha		Budget à l'hectare du CRAAQ, par culture
	<i>Coût de nettoyage de débris en champs</i>	Dommmage annuel pondéré	Le coût varie selon le mois, la superficie et le type de culture	-Probabilité d'inondation mensuelle par horizon clim.	1 à 82 % / 1 à 47 %	Leconte et Bizhanimanzar, 2020 / Trudel et Gobji, 2020	
				-Modèle de rotation des cultures	0 à 100 %		FADQ, 2018, adapté par les CLS
				-Salaire horaire	15 \$/h		Enquête terrain
				-Coût horaire machinerie	30,69 \$/h		CRAAQ, 2014
				-Travail manuel/superficie /mois inondé/culture	0 à 20 h/ha selon le mois, la culture		Enquête terrain
	-Travail machinerie/superficie /mois inondé/culture	0 à 10 h/ha selon le mois, la culture	Enquête terrain				
Comm. & Indust.	<i>Coûts des dommages aux bâtiments par la submersion</i>	Courbes de profondeur d'eau-dommages	La valeur monétaire des dommages subis à la structure des bâtiments et leurs contenus varie selon la profondeur d'eau atteinte dans le bâtiment et selon le type de bâtiment	-Profondeur d'eau au centroïde du lot	0 à 2 m	MAMH, 2019 ; Leconte et Bizhanimanzar, 2020; Trudel et Gobji, 2020	
				- % d'endommagement à la structure selon le type de bâtiment	0 à 100 %		CMI Lac Champlain et Rivière Richelieu, in prep.
				- % d'endommagement au contenu selon le type de bâtiment	0 à 100 %		CMI Lac Champlain et Rivière Richelieu, in prep.

	Impact	Méthode de quantification	Hypothèses	Données	Valeurs	Sources
Résidentiel	<i>Dommages aux résidences par la submersion</i>	Courbes de profondeur d'eau-dommages	La valeur monétaire des dommages subis à la structure des bâtiments et leurs contenus varie selon la profondeur d'eau atteinte dans le bâtiment et selon le type de bâtiment	-Profondeur d'eau au centroïde du lot	0 à 2 m	MAMH, 2019 ; Leconte et Bizhanimanzar, 2020; Trudel et Gobji, 2020
				- % d'endommagement à la structure selon le type de bâtiment	0 à 100 %	Bonnifait, 2005
				- % d'endommagement au contenu selon le type de bâtiment	0 à 100 %	CMI Lac Champlain et Rivière Richelieu, in prep.
	<i>Dépenses engendrées par les évacuations</i>	Courbe de profondeur d'eau-durée	La durée de l'évacuation dépend de la profondeur d'eau dans le bâtiment, laquelle engendre des dépenses d'hébergement et d'entretien	-Profondeur d'eau au centroïde du lot	0 à 2 m	MAMH, 2019 ; Leconte et Bizhanimanzar, 2020; Trudel et Gobji, 2020
				-Courbe de profondeur d'eau-durée d'évacuation	0 à 365 jrs	FEMA, 2009
				- Montant quotidien prévu au programme d'aide financière	20\$/jr, ou 1000\$/mois/résidence si RDC atteint	MSP, 2009
Psychosocial	<i>Dépenses et pertes chez les sinistrés</i>	Transfert de valeurs	La prévalence supplémentaire de certains troubles de santé chez l'adulte exposé aux inondations engendre une perte de productivité et de qualité de vie, des dépenses complémentaires et en soins de santé supplémentaires	-Profondeur d'eau au centroïde du lot	0 à 2 m	MAMH, 2019 ; Leconte et Bizhanimanzar, 2020; Trudel et Gobji, 2020
				-Nombre d'adultes / ménage	1,56 adulte/ménage	Recensement 2016
				-Estimation des coûts monétaires espérés par ménage inondé	16 434 \$/sinistré	CMI Lac Champlain et Rivière Richelieu, in prep.

	Impact	Méthode de quantification	Hypothèses	Données	Valeurs	Sources
Municipal	<i>Dépenses en gestion des urgences</i>	Transfert de valeur	Les dépenses de gestion des urgences représentent une proportion supplémentaire aux dommages résidentiels	-Dommages résidentiels à la structure	(voir plus haut)	(voir plus haut)
				-Facteur multiplicateur	10,70 %	Penning-Rowell et al., 2013
	<i>Dépenses en nettoyage des débris</i>	Transfert de valeur	Les dépenses de nettoyage des débris représentent une proportion supplémentaire aux dommages résidentiels basée sur le volume et les coûts de nettoyage	-Dommages résidentiels à la structure	(voir plus haut)	(voir plus haut)
				-Volume de débris/m <sup>2</sup> de bâtiment inondé	21 à 36 m <sup>2</sup> par bâtiment inondé	CMI Lac Champlain et Rivière Richelieu, in prep.
			-Coûts de nettoyage	14,37 \$/m <sup>2</sup>		
Économie	<i>Dommages aux bâtiments institutionnels par la submersion</i>	Courbes de profondeur d'eau-dommages	La valeur monétaire des dommages subis à la structure des bâtiments et leurs contenus varie selon la profondeur d'eau atteinte dans le bâtiment et selon le type de bâtiment	-Profondeur d'eau au centroïde du lot	0 à 2 m	MAMH, 2019 ; Leconte et Bizhanimanzar, 2020
				- % d'endommagement à la structure selon le type de bâtiment	0 à 100 %	Bonnifait, 2005
				- % d'endommagement au contenu selon le type de bâtiment	0 à 100 %	CMI Lac Champlain et Rivière Richelieu, in prep.)
	<i>Perte de productivité – fermeture de route</i>	Courbe de profondeur d'eau-durée	La fermeture des routes entraîne une perte de productivité pour les automobilistes devant emprunter un trajet alternatif.	-Seuil de profondeur d'eau	300 mm	Pregnoiato, 2017
				-Durée de fermeture	1 journée	
				-Proportion d'automobiliste adoptant un trajet alternatif	100 %	
				-Taux d'occupation moyen	1,23 adulte/véhicule	Adapté de Sambe et al., 2016
			-Valeur horaire du temps	12,80 à 33,60 \$/h		
			-Débit de circulation annuel moyen par mode de transp.	nb. véhicules/h	MTQ, 2019	
			- Temps additionnel du détour	nb. minutes	GoogleMaps	

### 6.2.1.1 Courbe de profondeur d'eau-dommages

Les dommages à la structure et au contenu des bâtiments des secteurs résidentiel, commercial, industriel et institutionnel, sont fonction de la hauteur d'eau atteinte à l'intérieur du bâtiment. Le montant des dommages par événement d'inondation est donc calculé à partir de courbes de profondeur d'eau-dommages propres à chaque type de bâtiment. La **Figure 11** illustre un exemple de courbe profondeur d'eau-dommages pour une résidence à un étage avec sous-sol fini (Bonnifait, 2006).



**Figure 11.** Courbe de profondeur d'eau-dommages pour une résidence à un étage avec sous-sol fini

TIRÉ DE BONNIFAIT, 2005 DANS LECLERC ET AL., 2006.

Afin d'appliquer les courbes de profondeur d'eau-dommages au site d'étude, la cote d'élévation du plancher principal de chaque bâtiment à risque a été estimée en superposant au modèle numérique d'élévation du terrain le centroïde d'unités d'évaluation foncière (MAMH, 2019). Bien qu'il s'agit d'une méthode rapide, l'utilisation du centroïde d'unités d'évaluation foncière est cependant imprécise, d'autres sources de données géospatiales telle qu'AQgéobâti (MERN, 2021) ou *CanadianBuildingFootprints* (microsoft, 2019) pourraient être exploitées. Idéalement, une campagne terrain permettant de mesurer la hauteur du plancher principal par rapport au terrain à l'aide d'un distomètre, telle celle mise en œuvre pour l'analyse coûts-avantages des options d'adaptation en zone côtière à Carleton-sur-mer (2016a), est préférable. L'expérience des inondations de 2017 et 2019 nous porte même à croire que la hauteur des margelles (première entrée de l'eau) est autant, voire plus importante que le premier plancher. Le **Tableau 12** précise la source des courbes utilisées et les documents de méthodologie propre à chaque secteur.

À noter qu'un projet de recherche de l'Université Laval, financé par le ministère de la sécurité publique (MSP), est présentement en cours et vise à développer, entre autres, de nouvelles courbes de profondeur d'eau-dommages et une base de données des bâtiments (structure et occupation), visualisation 3D (Marceau P. et Hume, J., 2019). De nouvelles courbes de profondeur d'eau-dommages pour le secteur résidentiel, principalement des résidences à un étage seulement sont également disponibles depuis peu (Jean et Doyon, 2020).

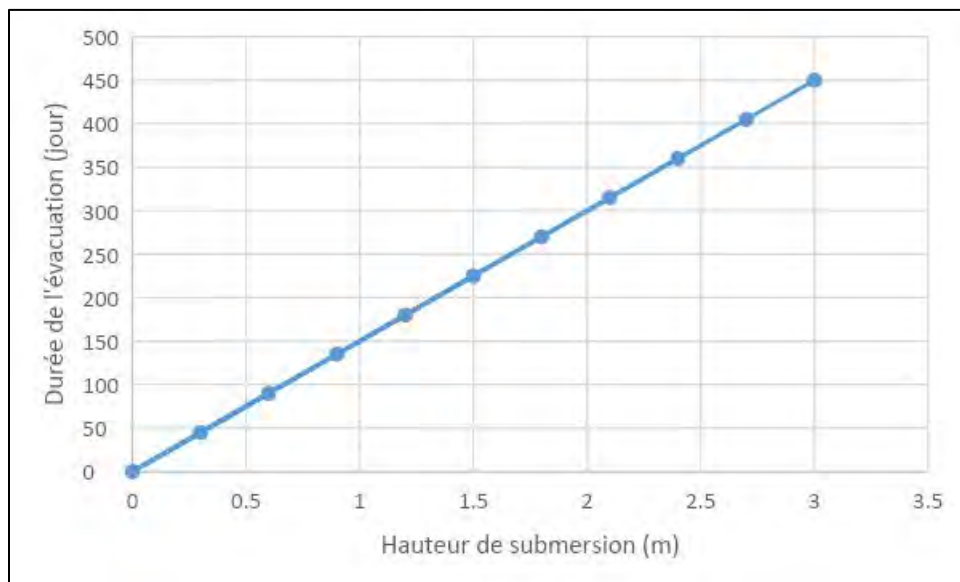
**Tableau 12.** Source des courbes de profondeur d'eau-dommage et documents méthodologiques

Impacts	Courbe de profondeur d'eau-dommages	Document méthodologique
<b>Résidentiel</b>		
Dompage à la structure	Bonnifait, 2005	Annexe B de Circé et al., 2016b
Dompage au contenu	CMI Lac Champlain et Rivière Richelieu, in prep.	
<b>Commercial &amp; Industriel</b>		
Dompage à la structure	CMI Lac Champlain et Rivière Richelieu, in prep.	
Dompage au contenu		
<b>Institutionnel</b>		
Dompage à la structure	Bonnifait, 2005 <sup>1</sup>	Annexe B de Circé et al., 2016b
Dompage au contenu	CMI Lac Champlain et Rivière Richelieu, in prep	

<sup>1</sup> En l'absence de courbes profondeur d'eau-dommages pour les bâtiments institutionnels, la courbe profondeur d'eau-dommage pour les bâtiments résidentiels de 1 étage sans sous-sol a été utilisée. Il s'agit donc d'une estimation minimale des dommages à la structure des bâtiments institutionnels.

### 6.2.1.2 Courbe de profondeur d'eau-durée

Les dépenses engendrées par les évacuations du secteur résidentiel et la perte de productivité due à la fermeture des routes sont fonction de la durée soit d'évacuation ou de la fermeture de route. Le montant des dépenses par événement d'inondation est donc calculé à partir d'une courbe de profondeur d'eau-durée, telle qu'illustrée à la **Figure 12** pour les évacuations.



**Figure 12.** Courbe de profondeur d'eau-durée d'évacuation des résidents  
TIRÉ DE : FEMA (2009).

### Évacuation des résidences

Afin d'appliquer les courbes de profondeur d'eau-dommages au site d'étude, la cote d'élévation du plancher principal de chaque bâtiment à risque a été estimée en superposant au modèle numérique d'élévation du terrain le centroïde d'unités d'évaluation foncière (MAMH, 2019). Bien qu'il s'agit d'une méthode rapide, l'utilisation du centroïde d'unités d'évaluation foncière est cependant imprécise, d'autres sources de données géospatiales telle qu'AQgéobâti (MERN, 2021) ou *CanadianBuildingFootprints* (microsoft, 2019) pourraient être exploitées. Idéalement, une campagne terrain permettant de mesurer la hauteur du plancher principal par rapport au terrain à l'aide d'un distomètre, telle celle mise en œuvre pour l'analyse coûts-avantages des options d'adaptation en zone côtière à Carleton-sur-mer (2016a), est préférable. L'expérience des inondations de 2017 et 2019 nous porte même à croire que la hauteur des margelles (première entrée de l'eau) est autant, voire plus importante que le premier plancher. La valeur monétaire d'une journée d'évacuation est ensuite évaluée à l'aide de la grille d'aide financière du ministère de la Sécurité publique du Québec. La méthodologie complète de valorisation est présentée dans le rapport CMI Lac Champlain et Rivière Richelieu (in prep).

### Perte de productivité due à la fermeture de route

En l'absence de courbes profondeur d'eau-durée de fermeture des routes - ou de modélisation hydrologique de la durée de l'inondation- une hypothèse conservatrice a été utilisée : dès que le seuil de 300 mm d'eau causant la fermeture de la route (Pregolato, 2017) est atteint ou dépassé, la route est fermée pour une durée de 24 heures. Afin d'appliquer le seuil de fermeture de route, la hauteur d'eau sur les routes inondées a été estimée en chaque point espacé de 2 m de long du réseau routier de la géobase AQRéseau+ (2020). En résumé, le calcul de la perte de productivité due à la fermeture de route se fait en 5 étapes :

1. Identifier les routes ( $r$ ) dont la hauteur d'eau atteint ou dépasse le seuil de fermeture (300 mm) et obtenir le débit de circulation annuel moyen par mode de transport ( $D_m$ ), par exemple à l'aide de la base de données des débits de circulation du MTQ (2019);
2. Identifier le trajet alternatif à la route fermée et calculer le nombre d'heures supplémentaires au de parcours alternatif par rapport au trajet habituel ( $\Delta_r$ );
3. Déterminer la proportion de véhicules devant emprunter le trajet alternatif ( $F_m$ ) et le taux d'occupation moyen par véhicule ( $O_m$ ; Sambe et al. (2016) suggère un taux d'occupation de 1,23)
4. Déterminer la valeur horaire du temps des automobilistes ( $V_m$ ; voir Sambe et al., 2016)
5. Le montant de la perte de productivité due à la fermeture de route pour chaque évènement de probabilité de récurrence choisie peut donc être estimé comme suit :

$$P_n = \sum_{r=1}^R (\Delta_{r,n} \times V_{m,r} \times F_{m,r} \times O_{m,r} \times V_m \times D_{r,n}), \text{ où:}$$

$P_n$  : Perte de productivité due à la fermeture des routes par un évènement de probabilité  $n$

$R$  : Nombre de routes fermées dues à l'évènement de probabilité  $n$

$\Delta_{r,n}$  : Temps de parcours supplémentaire pour détourner le tronçon de route  $r$  inondé par un évènement de probabilité  $n$

$V_{m,r}$  : Débit de circulation annuel moyen du mode transport  $m$  sur la route  $r$

$F_{m,r}$  : Fraction des véhicules empruntant le detour, par mode de transport  $m$  sur la route  $r$

$O_{m,r}$  : Taux d'occupation moyen des véhicules par mode de transport  $m$  sur la route  $r$

$V_m$  : Valeur horaire du temps par mode de transport  $m$

$D_{r,p}$  : Durée en heures de la fermeture de route  $r$  par un évènement de probabilité  $n$

### 6.2.1.3 Dommage annuel pondéré

Pour les pertes de rendement et le nettoyage des débris des terres agricoles, les dommages sont davantage fonction du mois d'occurrence de l'inondation que de la hauteur de submersion atteinte dans les champs agricoles. Plutôt que d'utiliser une courbe de profondeur d'eau-dommages comme pour les bâtiments à risque, le montant des dommages agricoles par événement d'inondation est calculé à partir de dommage annuel pondéré, en combinant la probabilité d'occurrence d'un événement extrême durant un mois de l'année et les dommages associés durant ce même mois, par type de culture. En résumé, le calcul se fait en 4 étapes :

1. Déterminer la probabilité d'occurrence des inondations par mois de l'année, soit par la modélisation hydrologique ou par la proportion d'évènements extrêmes historiques (voir **Tableau 13**);
2. Déterminer les dommages appréhendés par type de culture en fonction du mois d'occurrence de l'inondation soit par enquête terrain, revue de littérature, ou bases de données appropriées (ex. historique des indemnités versées par la financières agricoles (perte de rendements) ou par le Ministère de la sécurité publique (nettoyage des débris) (voir **Tableau 13**);
3. Déterminer la distribution des types de cultures et leur rotation sur les terres dans la zone d'étude, soit par enquête terrain, revue de littérature, ou bases de données appropriées (ex. Base de données des parcelles et productions agricoles du Québec) (voir **Tableau 14**);
4. Calculer le dommage annuel pondéré en multipliant la série de probabilité mensuelle par la série de dommages mensuels, par type de culture en rotation selon leur proportion (voir **Tableau 14**).

**Tableau 13.** Exemple de pondération de la perte de rendement et du coût de nettoyage agricole

Mois de l'année :	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Pondération <sup>1</sup>
<b>Probabilité d'inondation (%), source : modélisation hydrologique</b>													
Horizon, RCP	0%	2%	0%	6%	58%	9%	5%	3%	3%	8%	6%	0%	-
<b>Pertes de rendement (%), source : adapté de Penning-Rowell (2013)</b>													
Céréales	0	0	0	30	55	80	100	100	50	0	0	0	50%
Foin	0	0	0	10	55	40	6	4	0	0	0	0	37%
Pâturage	0	0	0	9	7	5	5	4	0	0	0	0	6%
<b>Coûts de nettoyage (\$/ha), source : enquête terrain</b>													
Céréales	-	-	607	607	455	455	455	455	455	455	-	-	428 \$/ha
Foin & pâturage	-	-	528	528	396	396	396	396	396	396	-	-	372 \$/ha

<sup>1</sup> Les pondérations sont calculées en sommant le produit mensuel de la probabilité d'inondation (%) et de la perte de rendement ou du coût de nettoyage.



**Tableau 14.** Exemple de calcul de dommages pondérés, par culture en rotation

Culture	Proportion en rotation	Perte de rendement pondérée	Marge sur coûts variables	Perte de revenus nets pondérée	Coûts de nettoyage pondéré	Dommages agricoles pondérés
	(A)	(B)	(C)	(D = B x C)	(E)	(F = D + E)
<b>Mais-fourrager</b>	13 %	50 %	1000 \$/ ha	504 \$/ ha	146 \$/ha	650 \$/ha
<b>Soya</b>	13 %	50 %	598,5 \$/ha	302 \$/ha	146 \$/ha	448 \$/ha
<b>Avoine</b>	13 %	50 %	311 \$/ha	157 \$/ha	146 \$/ha	303 \$/ha
<b>Foin</b>	6 %	37 %	329 \$/ ha	120 \$/ha	232 \$/ ha	332 \$/ha
<b>Source :</b>	BDPPAD <sup>1</sup>	Voir Tableau 13	CRAAQ <sup>2</sup>	-	Voir Tableau 13	-
<b>Dommages agricoles à l'échelle de la parcelle en rotation : (Somme du produit des cellules de A et F)</b>						380 \$/ ha inondé

<sup>1</sup> La Base de données des parcelles et productions agricoles déclarées (BDPPAD), publiée annuellement par la Financière agricole du Québec, permet de colliger l'historique des cultures par parcelles déclarées sur le territoire à l'étude.

<sup>2</sup> Le centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (CRAAQ), publie périodiquement des modèles de budgets à l'hectare pour différents types de cultures.

Le montant des dommages agricoles par évènement d'inondation s'obtient donc en multipliant le dommage annuel pondéré par la superficie inondée des parcelles agricoles, pour chaque évènement de probabilité de récurrence choisies. Ensuite, il est possible de trouver le coût moyen à l'hectare attendu pour une année typique en utilisant la méthode du dommage annuel moyen (DAM) expliquée à la section 6.2.

#### 6.2.1.4 Transfert de valeur

Pour les dépenses et pertes chez les sinistrés (secteur psychosocial), le nettoyage des débris des quartiers résidentiels (secteur municipal) et le coût de gestion des urgences (secteur municipal), des valeurs unitaires estimées dans la littérature ont été transférées aux études de cas.

#### *Dépenses et pertes chez les sinistrés*

La prévalence supplémentaire de certains troubles de santé physique et psychologique chez les adultes exposés aux inondations engendre des pertes et dépenses supplémentaires pour les sinistrés. Le rapport CMI Lac Champlain et Rivière Richelieu (in prep.) présente une estimation de la valeur de certaines dépenses et pertes supplémentaires pour les sinistrés (**Tableau 15**).

**Tableau 15.** Valeur monétaire estimée par type de coûts associés au impacts psycho-sociaux par sinistré

Type de coûts	Valeur estimée
Dépenses complémentaires (Dépenses en alcool et liées au tabagisme)	147 \$
Soins de santé (Traitements, hospitalisations, médication, etc.)	369 \$
Perte de productivité (Temps rémunéré)	6 036 \$
Qualité de vie	9 881 \$
<b>Total</b>	<b>16 434 \$</b>

SOURCE : CMI LAC CHAMPLAIN ET RIVIÈRE RICHELIEU (IN PREP.)

Le montant des coûts psychosociaux par évènement d'inondation s'obtient donc en multipliant la valeur des coûts estimés du **Tableau 15** par le nombre d'adultes par ménage et le nombre de résidence inondée pour chaque évènement de probabilité de récurrence choisies.

#### *Nettoyage des débris des quartiers résidentiels*

L'inondation de bâtiments résidentiels entraîne des dépenses municipales supplémentaires en termes de nettoyage des débris dans la phase post-sinistre, selon le volume de débris généré. Le rapport CMI Lac Champlain et Rivière Richelieu (in prep.) présente une estimation du volume de débris généré par les bâtiments résidentiels et du coût unitaire de nettoyage des débris (**Tableau 16**).

**Tableau 16.** Valeur estimée pour le nettoyage des débris des quartiers résidentiels

Paramètres du nettoyage des débris	Valeur estimée
Volume de débris des résidences inondée, avec sous-sol	36 m <sup>3</sup>
Volume de débris des résidences inondée, sans sous-sol	21 m <sup>3</sup>
Coût de nettoyage des débris par la municipalité	14,37 \$/m <sup>3</sup>

SOURCE : CMI LAC CHAMPLAIN ET RIVIÈRE RICHELIEU (IN PREP.)

Le montant des coûts de nettoyage des débris par la municipalité par évènement d'inondation s'obtient donc en multipliant les valeurs estimées au **Tableau 16** par le nombre de résidences avec et sans sous-sol pour chaque évènement de probabilité de récurrence choisies.

#### *Coûts de gestion des urgences*

La gestion des urgences pour rétablir l'usage des propriétés et des voies municipales inondées entraînent des dépenses supplémentaires en termes de frais administratif, de voirie et de service d'incendie pour la municipalité. Le manuel de Penning-Rowse (2013) présente un multiplicateur de 10,70 % sur les dommages économiques aux propriétés afin d'estimer le coût de gestion des urgences.

Le montant des coûts de gestion des urgences par événement d'inondation s'obtient donc en appliquant le multiplicateur à la somme des dommages économiques aux propriétés pour chaque événement de probabilité de récurrence choisies. Selon Penning-Rowell (2013), les dommages économiques incluent à la fois les propriétés résidentielles et commerciales. Toutefois, dans le cadre de ce projet, la valeur des dommages économiques aux propriétés a été estimée à partir des dommages à la structure des bâtiments résidentiels uniquement. Il s'agit donc d'une estimation minimale des coûts de gestion des urgences.

## 6.2.2 Coûts liés à l'érosion

Un autre facteur important des aléas fluviaux est l'érosion des berges. À l'aide d'un taux de recul annuel moyen des berges, il est possible d'estimer les coûts annuels liés à l'érosion, tel que présenté dans le rapport de Circé et al. (2016c). Sans taux de recul annuel, il est tout de même possible d'estimer les coûts liés à l'érosion des berges, via la méthode des coûts de remplacement si des structures de protection devaient stabiliser les berges, tel qu'effectué pour l'étude de cas de Compton dans le cadre de ce projet. À partir de la cartographie des enrochements de Demers *et al.* (2017), il a été possible de déterminer les segments actuellement enrochés et les coûts associés. L'analyse des enrochements actuels, combinée à l'analyse de la zone de mobilité sur 50 ans et du niveau d'érosion des berges par photo aériennes, a ensuite permis de projeter les efforts d'enrochements futurs à anticiper. La modélisation de ces coûts a été réalisée selon les paramètres précisés dans le **Tableau 17**.

**Tableau 17.** Méthode de quantification et paramètres pour la monétisation des coûts liés à l'érosion

Impact	Méthode de quantification	Hypothèses	Données	Valeurs	Sources
<b>Pertes de terres par érosion</b>	Coûts de remplacement	Volonté de payer pour stabilisation efficace à 100 %	Longueur d'enrochement	Actuel : 6.9 km Futur : 1.5 km	Demers <i>et al.</i> , 2017
			Coût d'implantation	500 \$ / mètre linéaire	Biron <i>et al.</i> , 2013
			Coût de conception :	20 % de l'implantation	
			Coût d'entretien	Décroissant sur 5 ans pour nouveaux enrochements (12 à 1%), puis 10 % chaque 10 ans	

En l'absence de cartographie de la zone de mobilité ou des enrochements, il n'est pas possible de monétiser les coûts liés à l'érosion des berges, tel que pour l'étude de cas du bassin versant de la rivière Chaudière de ce projet. Ces coûts devraient néanmoins être traités de façon qualitative dans l'analyse complémentaires des risques et enjeux résiduels (section 6.5.3) afin de s'assurer que les dollars investis dans le scénario d'adaptation recommandé soient optimisés. Voir aussi la section 5.3.3 sur la justification des coûts d'enrochement.

### **6.2.3 Bénéfices écosystémiques**

La cartographie et la quantification des impacts écosystémiques a été réalisée à l'aide de la suite de modèles en licence libre (gratuit) Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs (InVEST) développée dans le cadre de l'initiative du Natural Capital Project de l'Université de Stanford (Ecosystem Knowledge Network. *InVEST*). Malgré son importance, le capital naturel est souvent mal compris, rarement inclus dans les processus décisionnels et, dans de nombreux cas, subit une dégradation et un épuisement rapides. Par une approche de quantification, la suite de modèles InVEST permet ainsi d'explorer comment les modifications apportées aux écosystèmes peuvent influencer les différents flux de bénéfices environnementaux à la population. Dans les deux études de cas qui ont été rédigées en parallèle à ce rapport, les modèles de séquestration du carbone, de qualité de l'eau (nutriments et sédiments) et de qualité de l'habitat ont été employés. Le guide d'utilisateur du programme détaille exhaustivement son utilisation.

La méthodologie de la cartographie des impacts écosystémiques est séquencée en trois étapes de travail qui font intervenir des procédés géomatiques et de formatage de données. La première phase consiste à concevoir les différents scénarios d'adaptations dans une formule spatialisée d'utilisation du territoire, afin qu'ils puissent être intégrés et comparés dans les modèles InVEST. Cette étape inclut entre autres la méthodologie d'intégration des mesures d'adaptation dans un jeu de données d'utilisation du territoire ainsi que l'acquisition et le formatage des données relatives aux mesures.

La deuxième phase consiste à paramétrer les modèles, au meilleur des données accessibles, afin de reproduire les conditions environnementales nécessaires à quantification des services écosystémiques. Cette étape nécessite des efforts d'acquisition de données et de formatage selon les critères définis par le programme.

La troisième phase consiste à réaliser la modélisation des scénarios d'adaptation par l'entremise des modèles de services écosystémiques afin de pouvoir comparer leurs impacts environnementaux. Cette dernière séquence nécessite comme toute chaîne de modélisation une étape de calibration de la sortie des modèles afin que le résultat soit le plus représentatif de la réalité. Pour monétiser les services écosystémiques, les valeurs de littérature transférées pour les études de cas de ce projet sont présentées au

**Tableau 18.**

Enfin, pour la monétisation, les valeurs unitaires dépendent du service étudié et sont croisées avec les quantités issues de la modélisation InVEST. Certains comme le coût social du carbone ou la valeur à l'hectare de création d'un habitat terrestre arboré varient peu à l'échelle du sud du Québec. D'autres, comme les coûts de traitement de la qualité de l'eau peuvent varier régionalement, mais en cas d'absence de sources d'information fiables pour la région étudiée, les transferts de coûts peuvent être utilisés. La consultation de ressources telles que Brahic et Terraux (2009) ou Dupras et al. (2013) est fortement conseillée afin de guider le choix d'une méthode d'évaluation économique de la biodiversité ou des biens et services écosystémiques.

**Tableau 18.** Méthode de quantification et paramètres pour la monétisation des services écosystémiques

E n v i r o n n e m e n t	Impact	Méthode de quantification	Hypothèses	Données	Valeurs	Sources
	<i>Séquestration du carbone</i>	Transfert de valeur	Valeur du service = charge de carbone séquestrée annuellement x valeur annuelle du coût social du carbone	-Différence de charge entre scénario de référence et scénarios d'adaptation	Voir rapports régionaux	Ce projet, modélisation par INVEST
				-Coût social du carbone/décennie (extrapolation linéaire)	51 à 105 \$/t (2020 à 2070)	
	<i>Qualité de l'eau</i>	Transfert de valeur	Valeur du service = flux de rétention annuelle (azote, phosphore, sédiment) x la valeur de traitement en usine	-Différence nette de flux annuel d'azote, de phosphore et de sédiments entre le scénario de référence et les scénarios d'adaptation	Voir rapports régionaux	Ce projet, modélisation par INVEST
-Coût de traitement en usine d'azote, phosphore et sédiments				N : 5,77 \$/kg P : 41,52 \$/kg Séd : 18,68 \$/t	Olewiler, 2016	
<i>Biodiversité</i>	Transfert de valeur	Valeur du service = score de qualité de l'habitat x valeur/acre de création d'habitat arboré	-Différence nette du score de la qualité de l'habitat entre le scénario de référence et les scénarios d'adaptation	Voir rapports régionaux	Ce projet, modélisation par INVEST	
			-Valeur par hectare de création d'un habitat terrestre arboré	451,30 \$CAD/ha		Borisova-Kidder, 2006

## 6.2.4 Bénéfices connexes

Les mesures d'adaptation étudiées comportent parfois des bénéfices connexes, par exemple des usages publics d'espaces naturels ou des revenus spécifiques à l'implantation. Dans le cadre de l'étude de cas de la rivière Chaudière, la mesure de bandes riveraines qui figure dans deux scénarios d'adaptation comporte des bénéfices connexes, liés à la récolte de saules hybrides qui seront plantés. La quantification et monétisation de cet impact se fait à l'aide de l'outil de simulation des impacts économiques de pratiques agroforestières (Vézina *et al.*, 2019). Les paramètres suivants ont été utilisés :

- 2 rangées d'arbustes et 4 rangées de saules hybrides, espacées de 2,5 mètres (largeur de 15 m);
- Coûts des végétaux : 4 \$/ arbustes, 0,25 \$/ saules hybrides;
- Distance entre sites d'établissement et travailleurs : 20 km
- Entretien complet, sans protection contre les ravageurs;
- Marge brute de 35 % de la récolte, aux 5 ans, de saules hybrides destinés à la biomasse ou pâte.

## 6.3 CALCUL DES INDICATEURS ÉCONOMIQUES

Deux indicateurs économiques ont été retenus afin de d'établir le scénario d'adaptation le plus favorable parmi ceux étudiés. Il s'agit de la valeur actuelle nette (VAN) du scénario d'adaptation, comparé au scénario de référence, ainsi que du ratio avantages-coûts.

Ayant en main les séries annuelles des coûts des mesures, des coûts liés aux aléas, des bénéfices écosystémiques et des bénéfices connexes, à la fois pour le scénario de référence et pour chaque scénario d'adaptation, la VAN du scénario d'adaptation comparé au scénario de référence se calcule comme suit :

$$VAN = \sum_{t=0}^{T=20} \frac{Montant_{t,sa} - Montant_{t,sq}}{(1 + 0.04)^t} + \sum_{t=21}^{T=50} \frac{Montant_{t,sa} - Montant_{t,sq}}{(1 + 0.02)^t}$$

où  $t$  représente une année donnée jusqu'à l'année  $T$  marquant la fin de la période analysée, soit 2020 à 2040 pour l'horizon 1 et 2041 à 2070 pour l'horizon 2. Un taux d'actualisation décroissant par palier à 4 % pour l'horizon 1 et de 2 % pour l'horizon 2 a été employé. La décroissance de la valeur est donc plus prononcée au début de la période, ce qui est courant dans la littérature, surtout depuis Laibson (1997). Ainsi, le  $Montant_{t,sa}$  représente la somme des coûts et bénéfices à l'année  $t$  pour le scénario d'adaptation, tandis que  $Montant_{t,sq}$  représente la somme des coûts et bénéfices à l'année  $t$  pour le scénario de référence. Une VAN positive comparée au statu quo

indique que le scénario d'adaptation est rentable du point de vue de la collectivité. La VAN la plus élevée parmi les scénarios d'adaptation fait émerger le scénario à privilégier.

Ensuite, le ratio coûts-avantages (RCA) indique le retour sur investissement du scénario, et se calcule comme suit :

$$RCA = \frac{VAN(avantages)}{VAN(coûts)}$$

où  $VAN(avantages)$  représente la valeur actualisée des avantages d'un scénario d'adaptation par rapport au scénario de référence, et  $VAN(coûts)$  représente la valeur actualisée des coûts d'un scénario d'adaptation par rapport au scénario de référence. Un ratio A/C supérieur à 1 indique que le scénario d'adaptation est rentable du point de vue de la collectivité et plus avantageux que le statu quo. En cas de divergence de classement entre la VAN et le ratio A/C, la VAN est cependant privilégiée afin de dégager le scénario le plus avantageux, car le ratio A/C ignore donc la valeur monétaire globale des avantages associés à une alternative.

## 6.4 PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

Les résultats économiques des scénarios sont d'abord présentés individuellement, puis comparés entre eux. Pour la présentation individuelle, il est recommandé d'analyser séparément :

- les bénéfices en terme de coûts évités des différents aléas fluviaux et leur proportion par rapport au scénario de référence (SQ);
- les bénéfices environnementaux et les bénéfices connexes;
- le coût des mesures.

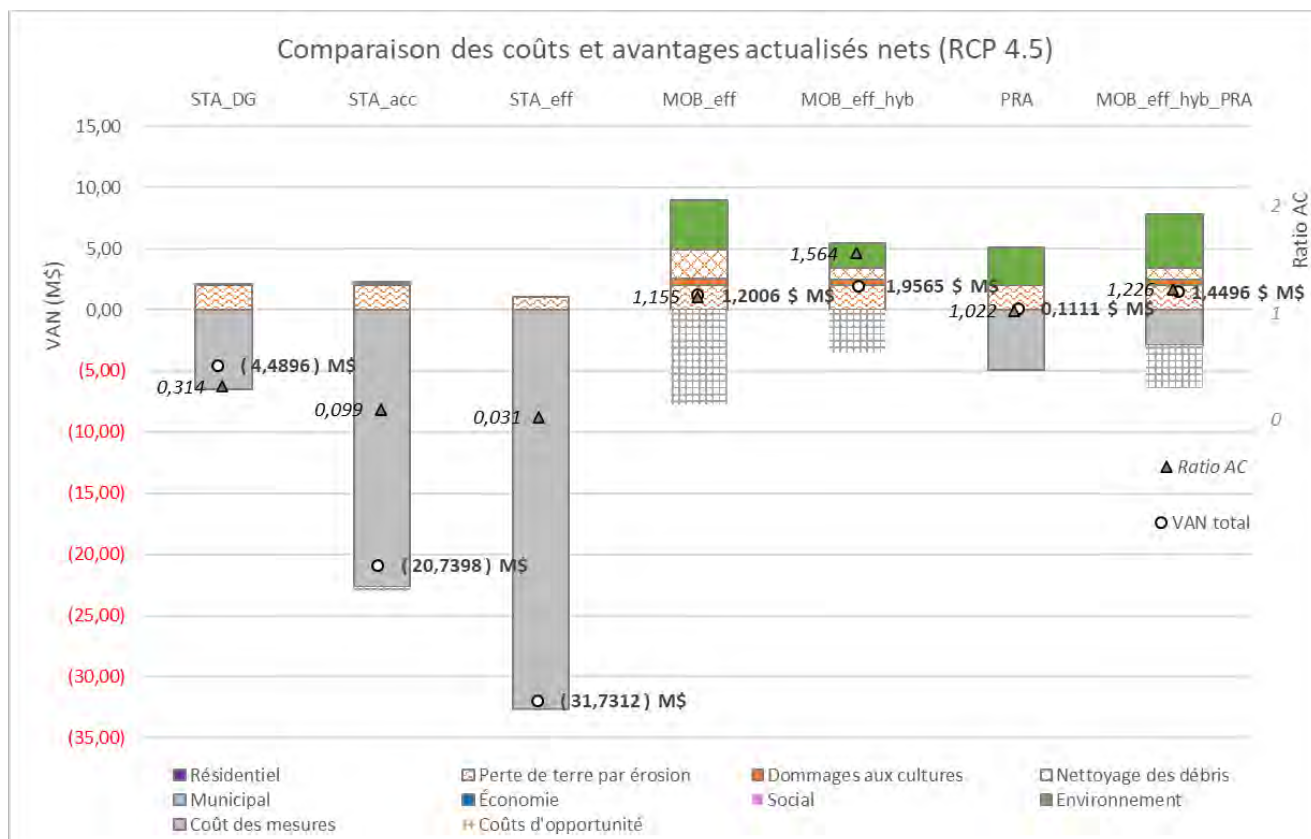
Puis, il s'agit de conclure avec les indicateurs économiques, permettant d'évaluer la rentabilité du scénario par rapport au statu quo. Le **Tableau 19** présente un exemple des résultats économiques d'un scénario de stabilisation avec dragage (STA-DG), tiré de l'étude de cas de Compton. Si le temps le permet, il est également recommandé de représenter visuellement la spatialisation des VAN en cartographiant les valeurs par unité géographique (récurrence des zone inondables, lots, etc.) Le livre *Applied environmental economics : a GIS Approach to Cost-Benefit Analysis* (Bateman et al., 2003) constitue une ressource privilégiée pour la représentation spatiale des VAN issues de l'ACA.



**Tableau 19.** Valeur actuelle des coûts et avantages de STA-DG, par rapport au scénario de l'étude de cas de Compton (\$ 2019)

Catégorie d'impacts	Description	RCP 4.5	RCP 8.5
<i>Coûts évités liés à l'érosion</i>			
<b>A</b>	Pertes de terres agricoles par l'érosion	0 \$	0 \$
<b>R</b>	Pertes de terrain résidentiels par érosion	0 \$	0 \$
Coûts totaux évités par rapport au SQ:		0 \$	0 \$
Proportion des coûts évités du SQ:		0 %	0 %
<i>Coûts évités liés à la submersion</i>			
<b>A</b>	Dommages aux cultures (pertes de revenus)	4 755 \$	3 784 \$
<b>A</b>	Coûts de nettoyage de débris en champs	29 675 \$	24 494 \$
<b>Écon.</b>	Perte de productivité due à la fermeture des routes	- \$	-9 972 \$
Coûts totaux évités par rapport au SQ :		34 430 \$	18 306 \$
Proportion des coûts évités du SQ :		1,2 %	0,4 %
<i>Bénéfices environnementaux</i>			
<b>Env.</b>	Séquestration du carbone	0 \$	0 \$
	Qualité de l'eau : sédiment et nutriments	0 \$	0 \$
	Biodiversité	0 \$	0 \$
<i>Coûts des mesures</i>			
<b>CM</b>	Conception, réalisation, entretien	-4 524 063 \$	-4 524 063 \$
<b>CO</b>	Coûts d'opportunité des restrictions d'usage	0 \$	0 \$
	Coûts d'opportunité des pertes de terrains	0 \$	0 \$
<b>VAN du scénario par rapport au SQ :</b>		<b>-4 489 633 \$</b>	<b>-4 505 757 \$</b>
<b>Ratio coûts-avantages :</b>		<b>0,01 \$</b>	<b>0,004 \$</b>

Enfin, la comparaison des scénarios d'adaptation entre eux permet de formuler une recommandation préliminaire sur le(s) scénario(s) à privilégier, sur la base des indicateurs économiques. La **Figure 13** rapporte les résultats de façon détaillée, à la fois sur les valeurs actuelles nettes des bénéfiques (supérieurs à 0) et des coûts (inférieurs à 0). Ces deux valeurs, pour chaque scénario, mènent au calcul des VAN totales en soustrayant les seconds aux premiers, représentées par les cercles blancs. En complément, les ratios avantages-coûts (ratio AC) sont présentés à l'aide de petits triangles. Étant la division des avantages par les coûts, lorsque cette valeur est supérieure à 1, les premiers sont plus importants. Cette figure offre donc toute la nuance nécessaire à la prise de décision.



**Figure 13.** Comparaison des coûts et avantages actualisés (RCP 4.5), étude de cas de Compton

## 6.5 ANALYSES COMPLÉMENTAIRES

Afin de valider la robustesse des résultats de l'analyse économique, les analyses de sensibilité sont un complément indispensable. De plus, l'analyse de redistribution entre les acteurs (7.5.2) et l'analyse des risques et enjeux résiduels (7.5.3) apportent des résultats complémentaires enrichissants concernant l'équité entre les acteurs et l'efficacité sur certains enjeux non modélisés des scénarios d'adaptation. Ces analyses permettent de nourrir les discussions entourant les résultats économiques et les recommandations finales.

## 6.6 ANALYSES DE SENSIBILITÉ

Pour assurer la crédibilité des recommandations formulées dans l'analyse coûts-avantages, plusieurs analyses de sensibilité sont réalisées. Une analyse de sensibilité consiste à choisir une liste de paramètres sur lesquels il y a eu une hypothèse pouvant affecter le résultat final de façon significative si la valeur choisie comme hypothèse avait été différente. Par la suite, la VAN est recalculée, mais en faisant varier chacun de ces paramètres dans une proportion qui pourrait en faire ressortir la sensibilité des

résultats. Pour la plupart des analyses de sensibilité réalisées dans les deux études de cas, les paramètres choisis ont été augmentés et réduits de 15 % de leur valeur actualisée <sup>7</sup>. Certains paramètres ont été testés par une augmentation ou réduction plus importante, afin de refléter la variabilité observée sur le territoire à l'étude, selon le contexte local. De plus, des modifications aux scénarios hydroclimatiques modélisés ont aussi été testées, à savoir d'utiliser plutôt le scénario hydroclimatique du 10<sup>ème</sup> et 90<sup>ème</sup> percentile de la distribution, au lieu de la médiane employée dans les analyses principales. Finalement, différentes valeurs du taux d'actualisation des valeurs futures ont été testées. Dans l'analyse principale, ce taux était fixé à 4 % pour l'horizon 2020 – 2040 et à 2 % pour l'horizon 2041 – 2070. Deux analyses de sensibilité ont été réalisées, soit à 2% ou à 6% pour l'ensemble de l'horizon temporel, sans notion de palier (taux constant). Les différents paramètres des analyses de sensibilité et les valeurs à tester dans le cadre des deux études de cas sont présentés au **Tableau 20**.

**Tableau 20.** Paramètres des analyses de sensibilité et valeurs à tester des études de cas

Paramètres de sensibilité	Valeurs à tester
<b>Taux d'actualisation</b>	Linéaire à 2 % et 6 %
<b>Débits maximums annuels et profondeur d'eau</b>	10 <sup>e</sup> et 90 <sup>e</sup> percentiles des scénario hydro-climatiques
<b>Coût de réalisation et d'entretien des mesures</b>	Chaudière : +/- 15 %
	Compton : +/- 50 %
<b>Valeur des pertes de rendement</b>	Chaudière : +/- 15 %
	Compton : +/- 30 %
<b>Coûts d'opportunité des mesures</b>	Chaudière : +/- 15 %
	Compton : Terres agricoles : 25 000 \$/ha; autres : + 100 %
<b>Coûts liés à l'érosion des berges</b>	Compton : +/- 15 %
<b>Coûts de nettoyage des débris</b>	+/- 15 %
<b>Valeur des bénéfices environnementaux</b>	+/- 15 %

<sup>7</sup> Notons qu'une variation sur la valeur unitaire d'un paramètre plutôt que sur la valeur actualisée d'un impact est préférable afin de tester l'impact d'une hypothèse à sa source.

## 6.6.1 Analyse de redistribution par catégories d'acteurs

L'analyse de redistribution permet de mieux comprendre la répartition des coûts et avantages de chacun des scénarios entre les groupes d'acteurs et ainsi cibler les opportunités de redistribution afin d'améliorer l'équité des scénarios. Il s'agit premièrement d'identifier les groupes d'acteurs affectés par les options envisagées. Pour les deux études de cas, 4 groupes ont été ciblés :

1. *La société*, bénéficiant par exemple des services écosystémiques ou supportant les indemnités versées par les programmes provinciaux;
2. *Les agriculteurs*, affectés soit par les aléas fluviaux ou les mesures d'adaptation. Une distinction entre les agriculteurs assurant leurs productions par la Financière Agricole du Québec (FADQ) peut être ajoutée afin de mettre en lumière l'importance des indemnités versées à ce groupe d'acteur;
3. *Les sinistrés*, représentant les autres citoyens impactés par les aléas ou les mesures, soit en majorité les propriétaires ou locataires des résidences principales;
4. *Les municipalités*, devant éponger par exemple une partie des coûts de la gestion des urgences ou des mesures d'adaptation sur leur territoire.

Toutefois, la liste des acteurs varie selon le contexte de l'étude et doit être co-construite avec les parties prenantes. Ensuite, il s'agit d'attribuer une pondération représentant le poids supporté par chaque groupe d'acteurs, pour chaque type d'impacts monétisés, en tenant compte des subventions ou indemnités disponibles pour chaque groupe. Pour fins pédagogiques, le **Tableau 21** rapporte les résultats de l'analyse de redistribution des scénarios pour l'étude de cas sur la rivière Chaudière. La quantification de ces valeurs se fait en redistribuant la VAN de certains postes d'impacts en proportion du poids de l'impact assumé par chaque groupe d'acteurs analysés. La pondération utilisée pour chaque acteur, selon le poste d'impact, est rapportée en annexe C (**Tableau C.1**). Cette table de pondération doit être ajustée au contexte des études de cas, aux mécanismes en place et effectivement utilisés par les municipalités, ainsi qu'aux politiques publiques en vigueur (ex. taux d'indemnisation).

*Piste de réflexion* : Les promoteurs et les assureurs pourraient figurer dans l'analyse de redistribution.

**Tableau 21.** Analyse de redistribution entre les acteurs, étude de cas de la rivière Chaudière

	SQ	MHH-acc		MHH-acc + IMM-ind		MHH-dis + IMM-ind	
<b>VAN p/r au SQ</b>	-	<b>773 300 \$</b>		<b>8 933 200 \$</b>		<b>9 243 500 \$</b>	
<b>Part de la VAN par catégorie d'acteurs</b>							
Société /collectivité	-23 153 200 \$	1 026 500 \$	133%	3 483 900 \$	39%	3 848 100 \$	42%
Agriculteur	-2 140 700 \$	57 800 \$	7%	57 900 \$	1%	3 900 \$	0%
<i>Cultures assurées</i>	-365 400 \$	9 800 \$	1%	9 800 \$	0%	13 100 \$	0%
<i>Cultures non assurées</i>	-1 624 000 \$	43 800 \$	6%	43 800 \$	0%	58 300 \$	1%
Résident	-11 473 300 \$	15 800 \$	2%	4 489 600 \$	50%	4 489 600 \$	49%
Commerce & industrie	-942 800 \$	4 300 \$	1%	371 400 \$	4%	371 400 \$	4%
Municipalité	-1 622 000 \$	-331 200 \$	-43%	530 500 \$	6%	530 500 \$	6%







## 6.6.2 Analyse des enjeux et risques résiduels

Les analyses des enjeux et risques résiduels sont un incontournable pour offrir une comparaison intégrale des divers scénarios à l'étude. En effet, l'ACA est un outil performant et bon nombre de paramètres, monétaires ou non, peuvent y être inclus. Toutefois, elle comporte certains angles morts qui doivent être intégrés. Un de ces angles morts est la prise en compte des aléas qui n'ont pu être intégrés aux calculs des VAN. Pour l'étude de cas de la rivière Chaudière, le **Tableau 22** rapporte cette analyse qualitative des aléas non quantifiés - soient l'érosion, la submersion des affluents et la submersion par embâcle de glace - pour lesquels une modélisation en climat futur et actuel n'a pas été produite. Cette analyse qualitative se fait à la lumière de la littérature, de rencontres avec des experts et des différentes parties prenantes. Ces impacts potentiels permettent de confirmer ou de nuancer la prise de décision basée exclusivement sur les résultats quantitatifs de l'ACA.

**Tableau 22.** Analyses des risques et enjeux résiduels, étude de cas de la rivière Chaudière

Scénario	Bénéfices environnementaux.	Facteurs de risque	Aléas quantifiés		Aléas non quantifiés		
			Submersion de la rivière Chaudière	VAN p/r au SQ (RCP 4.5)	Érosion	Submersion des affluents	Embâcle
IMM-ind + MHH-dis		Intensité		9 243 400 \$			
		Exposition					
MHH-acc + IMM-ind		Intensité		8 933 200 \$			
		Exposition					
MHH-acc		Intensité		773 300 \$			
		Exposition					

**Légende :**

	Effet positif maximal		Aucun effet anticipé		Effet négatif potentiel
	Effet positif partiel		Effet négligeable		
	Effet positif potentiel				

**En résumé, la phase de réalisation des analyses coûts-avantages permet de comparer la valeur monétaire actuelle des coûts liés aux aléas fluviaux sous le scénario de référence, à la valeur actuelle des coûts et avantages offerts par chacun des scénarios d'adaptation. En s'appuyant sur une base monétaire commune, la comparaison des indicateurs économiques (VAN et ratio AC) entre le scénario de référence et les scénarios d'adaptation permet de faire émerger l'option la plus avantageuse pour la société. La quantification et monétisation des flux monétaires sur l'horizon temporel choisi des différents impacts et pour chacun des scénarios est cruciale et dépend des données et méthodes de quantification disponibles. Afin d'évaluer la robustesse des résultats, les analyses de sensibilité viennent compléter l'ACA, en plus des analyses de redistribution et des risques résiduels permettant de nourrir les discussions entourant les résultats économiques et les recommandations finales.**



## 7. DISCUSSION ET CONCLUSION DE L'ÉTUDE

---

Ce chapitre est très variable d'une étude à l'autre et construit sur les résultats du chapitre précédent. Le dernier atelier participatif (ACP2) et la dernière réunion participative sont des sources précieuses pour identifier les limites et obstacles à l'adaptation et pour tirer davantage d'enseignements des analyses de redistribution. Des notions d'acceptabilité sociale des solutions et des défis réglementaires pourraient notamment émerger. Voici quelques pistes pour structurer cette section :

### *Interpréter les leçons de l'analyse de risque.*

- Rappeler les résultats les plus marquants de l'analyse de risque et les replacer dans leur contexte plus large (ex. géographique, social ou politique).
- Faire référence à des études scientifiques ayant des résultats cohérents ou opposés.
- Souligner les résultats les plus novateurs et pourquoi.
- Décrire les résultats volontairement laissés de côté et pourquoi.
- Y a-t-il des actions de traitement de risque déjà entreprises à d'autres niveaux de prise de décision?

### *Interpréter les leçons de l'analyse économique et des analyses complémentaires.*

- Vérifier et s'appuyer sur le cadre réglementaire (ex. REAFIE)
- Rappeler les résultats de l'analyse économique et des analyses complémentaires et les replacer dans leur contexte plus large (ex. géographique, social ou politique).
- Faire référence à des études scientifiques ayant des résultats cohérents ou opposés.
- Souligner les résultats les plus novateurs et pourquoi.
- Décrire les résultats volontairement laissés de côté et pourquoi.
- Y a-t-il des actions de traitement de risque déjà entrepris à d'autres niveaux de prise de décision ?
- Quels sont les opportunités ou obstacles à l'adaptation ? Y a-t-il des pistes à explorer pour y remédier ?

*Identifier les limites et sources d'incertitudes.*

- Identifier les limites dans les savoirs ou méthodes qui ont teinté l'étude. Par exemple, les formuler en pistes de recherche.
- Identifier les enjeux de gestion de projet ayant influencé la réalisation de l'étude. Par exemple, les formuler en recommandations pour des projets similaires

*Résumer les conclusions générales.*

- Rappeler le but du projet
- Rappeler les scénarios étudiés
- Rappeler les constats de l'analyse de risque
- Rappeler les constats de l'analyse économique
- Ouverture vers les pistes pour l'adaptation et la mise en œuvre.





## 8. TRANSFERT DE CONNAISSANCES

---

### 8.1 MOBILISATION DES CONNAISSANCES : UN PROCESSUS EN CONTINU

La mobilisation se fait tout au long du projet. Le plus souvent par des réunions. Ainsi, plusieurs outils de mobilisation des connaissances sont générés lors des différentes phases du projet, notamment les suivants :

- *Démarrage* :
  - Fiche projet en cours
  - Présentation de la proposition de projet et du site d'étude lors de la réunion de démarrage avec les partenaires
- *Réalisation* :
  - Compte-rendu de réunion ou présentations annotées lors des diverses activités d'instances participatives (CT, CLS, ACP)
  - Représentation imprimée du territoire comme support pour la cartographie interactive
  - Pictogramme des scénarios pour faciliter la communication
  - Gabarit de prise de notes sur l'évaluation des obstacles à l'adaptation
- *Clôture* :
  - Présentation finale et capture vidéo enregistrée
  - Rapport final
  - Fiche projet terminée
- *Suivi, évaluation, apprentissage* :
  - Sondage de satisfaction lors des activités participatives, en fin de projet et a posteriori
  - Post-mortem de projet

Se référer également au chapitre 3. Des modèles peuvent être obtenus sur demande.

## 8.2 ACCESSIBILITÉ NUMÉRIQUE ET INTEROPÉRABILITÉ

L'objectif de ce guide méthodologique est de démocratiser la prise de décision éclairée en permettant aux acteurs de reprendre la méthodologie développée. Cette section rapporte les différents logiciels et certains modules ou scripts employés. Certains pourraient être rendus publiques avec un effort supplémentaire dans une phase de valorisation technologique des ACA.

### 8.2.1 Scénarios climatiques (PAVICS)

Les demandes de scénarios climatiques peuvent être placées auprès d'Ouranos à : [scenarios@ouranos.ca](mailto:scenarios@ouranos.ca) Les utilisateurs avancés pourraient explorer l'outil PAVICS d'Ouranos pour élaborer leurs propres scénarios : <https://pavics.ouranos.ca/>

### 8.2.2 Modélisation hydrologique (SWAT)

Le lecteur souhaitant créer son propre modèle hydrologique pour tester l'effet des changements climatiques ou d'utilisation du sol pourrait utiliser le logiciel libre d'accès *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT : <https://swat.tamu.edu/>), créé par l'université du Texas et utilisé par USDA. Il doit être calibré pour le bassin versant à l'étude.

### 8.2.3 Modélisation hydraulique (HEC-RAS)

Le lecteur souhaitant créer son propre modèle hydraulique pourrait pour tester l'effet de certaines mesures structurelles grises ou vertes pourrait utiliser le logiciel libre d'accès Hydrologic Engineering Center's River Analysis System (HEC-RAS : <https://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/>), du US Army Corps of Engineers. La bathymétrie est une condition d'entrée pour ce logiciel.

### 8.2.4 Modélisation géostatistique des niveaux d'eau (Python)

Le lecteur souhaitant voir et potentiellement utiliser les scripts Python (logiciel libre d'accès) employés pour la modélisation géostatistique des niveaux d'eau (permettant de transférer les débits en niveaux d'eau), peut se référer à l'annexe E, où les principaux programmes et la façon de les utiliser sont rapportés. Ils peuvent servir d'exemples, mais ne sont pas à prendre comme des programmes clés en main.

## 8.2.5 Cartographies (ArcGIS ou QGIS)

Le lecteur souhaitant réaliser ses propres cartographies est invité à utiliser le logiciel ArcGIS (ou l'équivalent en logiciel libre QGIS). Ces logiciels fonctionnent par superposition de couches, soient des bases de données d'information géographiques spatialisées. Ces logiciels pourraient autant être utilisés pour la réalisation des figures de localisation, la spatialisation des scénarios que l'estimation annuelle des taux d'érosion.

## 8.2.6 Analyses des services écosystémiques (InVEST)

Du côté des analyses de services écosystémiques, le logiciel libre d'accès (*open source*) InVEST permet d'en faire la quantification et la spatialisation. Le logiciel donne accès à une suite de modèles qui fonctionnent en boîte grise et sur une base spatiale. Pour alimenter ces modèles, on doit construire et formater des bases de données qui leur sont spécifiques. Celles pour les modules utilisés pourraient être partagées; elles proviennent de Wood et al. (2019). Par la suite, les interfaces permettent d'appeler ces bases de données nettoyées et le logiciel produira des résultats agrégés en format matriciel. Tout est amplement détaillé dans le [guide d'utilisateur](#) du logiciel. Le programme [Mapping Ecosystem Services to Human well-being \(MESH\)](#) intègre InVEST et d'autres logiciels, mais n'a pas été employé ici.

## 8.2.7 Analyse économique (R)

Le lecteur souhaitant voir et potentiellement utiliser les scripts R (logiciel libre d'accès) employés pour la modélisation économique peut en faire la demande auprès des auteurs. Ils peuvent servir d'exemples, mais ne sont pas à prendre comme des programmes clés en main. Les lecteurs souhaitant créer leur propre routine économique à partir de données géospatiales sont invités à consulter le livre *Geocomputation with R* (Lovelace, Nowosad et Muenchow, 2019).



## 9. CONCLUSION

---

Ce guide méthodologique a couché sur papier les différentes étapes ayant permis la réalisation des analyses coûts-avantages de la municipalité de Compton ([Boyer-Villemaire et al., 2021a](#)) et du bassin versant de la rivière Chaudière ([Boyer-Villemaire et al., 2021b](#)). La méthode a été généralisée pour en permettre une répliquabilité aussi aisée que possible dans des contextes divers. Le déroulement de ces projets se résume en six grandes étapes :

- 1- le design de l'étude( chapitre 2)
- 2- la mobilisation des parties prenantes au projet (chapitre 3);
- 3- l'analyse de risque (chapitre 4);
- 4- la scénarisation des stratégies d'adaptation (chapitre 5) et
- 5- la réalisation des ACA (chapitre 6).
- 6- la discussion et la conclusion (chapitre 7)

La première étape permet de caractériser la zone d'étude et ses problématiques fluviales, en plus de déterminer les principaux paramètres de l'analyse économique (horizon temporel, taux d'actualisation, etc.). La deuxième étape permet de réunir autour du projet les différentes instances décisionnelles et consultatives et les acteurs devant porter voix au chapitre. Ces acteurs, d'horizons hétérogènes, peuvent être soit au fait de la problématique, soit potentiellement impactés par les aléas ou les scénarios d'adaptation ou encore faire partie de la solution. Cette réunion solidifie l'analyse et sa réceptivité.

Lorsque les équipes sont mises en place, le premier jalon important est l'analyse de risque, permettant d'évaluer et de prioriser les enjeux selon le degré de probabilité et le degré de conséquences, mais aussi d'initier la modélisation des aléas en climat futur. Ainsi, il est possible d'évaluer la façon dont se comporte le réseau hydrique dans l'horizon temporel sélectionné, en tenant compte de l'impact des changements climatiques sur celui-ci. Cette modélisation permet d'estimer les coûts des aléas.

La co-construction des scénarios d'adaptation est ensuite amorcée. La première étape est de définir le scénario de référence de l'analyse, incluant l'état de référence de l'environnement, à partir duquel les scénarios d'adaptation, composés d'une ou plusieurs mesures, seront comparés. Les scénarios d'adaptation sont mis sur pied au

moyen d'échanges actifs entre les différentes instances décisionnelles et consultatives. Cette rétroaction des acteurs permet, à chaque tour de roue, d'optimiser l'efficacité des scénarios, à la fois dans leur capacité à réduire les aléas et à minimiser les coûts engendrés. Une fois la liste des scénarios d'adaptation consolidée, l'estimation des coûts d'implantation et de l'efficacité sur le contrôle de l'aléa est réalisée pour chacun d'eux. Une liste d'impacts anticipés de chaque scénario par rapport au scénario de référence est également créée afin de prioriser les secteurs d'impacts.

Finalement, les ACA sont réalisées et permettent de calculer les avantages, soit la réduction des coûts face au scénario de référence, sur les postes d'impacts sélectionnés. Ces postes d'impact prennent encore une fois la forme d'actifs et d'activités économiques, mais aussi de services écosystémiques et d'impacts sur le bien-être des individus. Les analyses complémentaires viennent ensuite valider la robustesse des résultats et couvrir certains angles morts de l'analyse quantitative. Elles permettent de nourrir les discussions entourant les résultats économiques et les recommandations finales.

## 9.1 PERSPECTIVES

*Généraliser l'accès aux ACA pour optimiser les retombées sociétales* : Pour chaque étape, le guide méthodologique fait ressortir une mécanique générale, à savoir les différents éléments nécessaires pour réutiliser la méthode dans d'autres cas de figure. L'objectif est de généraliser ces techniques. Ainsi, les communautés qui seront affectées par l'impact des changements climatiques sur les inondations et autres aléas fluviaux pourront décider, de façon éclairée et rigoureuse, de la meilleure manière pour s'adapter. Les instances publiques, quel que soit leur niveau, auront à faire des choix. À budget limité, les politiques publiques doivent être soigneusement choisies. Il est nécessaire que les investissements fournissent les meilleures retombées pour l'ensemble de la société, au meilleur des connaissances et des données disponibles.

Ceci est d'autant plus vrai dans un contexte où le temps de décision et d'action se rétrécit. Les conséquences liées aux changements climatiques sont appelées à croître de façon exponentielle dans les décennies à venir. Au Canada, vraisemblablement, les changements climatiques entraîneront des impacts sur les risques d'inondations, à certains endroits en agissant sur la hausse des niveaux, ou à d'autres sur des transferts saisonniers des probabilités affectant davantage les agriculteurs. Plus les communautés attendent avant de mettre sur pied des politiques d'adaptation à ces conséquences et plus les coûts seront importants. La nécessité de généraliser l'utilisation de ces outils d'aide à la prise de décision permet d'accélérer l'adaptation. Il faut toutefois reconnaître que chaque site d'étude a ses particularités en termes d'aléas, secteurs économiques, disponibilité des bases de données et contraintes

organisationnelles. Cela nécessite une modulation adéquate des méthodologies présentées, atteignable grâce à la rencontre des compétences issues de multiples disciplines

*Une méthode à la rencontre des disciplines*: Ce projet a permis de mettre en commun les plus récentes avancées en matière d'analyse coûts-avantages, en plus de poser les jalons d'une méthode rigoureuse et exhaustive pour évaluer des scénarios d'adaptation visant la réduction des risques fluviaux. En intégrant le meilleur des connaissances en matière de modélisations climatique, hydro-dynamique, écologique et socio-économique, les ACA ont été bonifiées d'impondérables trop souvent occultés. Pourtant, l'impact des scénarios d'adaptation sur les services écosystémiques et le bien-être des individus est crucial pour une vision complète de la problématique.

Il importe également de souligner la pluridisciplinarité et l'intégration nécessaires à la réalisation d'un tel projet. Les équipes d'analyses doivent maîtriser des techniques complexes, à la fois portant sur les modélisations hydrologiques et hydrauliques, les analyses des écosystèmes et les analyses économiques. Puisque chaque pan est dépendant des autres, ils doivent tous être conduits avec rigueur. Par exemple, l'utilisation du territoire, employée pour l'estimation des services écosystémiques, est intimement liée à la modélisation des aléas futurs et des scénarios d'adaptation misant sur une modification de cette utilisation. Ces deux axes du projet doivent être cohérents. Il est nécessaire que tous les champs d'expertise puissent prêter main forte aux autres. De tels projets doivent être réalisés par des équipes pluridisciplinaires ayant une grande écoute et ayant à cœur la création de ponts entre les disciplines.

*Une approche à l'intersection des échelles*: En revanche, aussi spécialisées que puissent être ces équipes d'analyse, elles restent souvent bien limitées dans leurs connaissances du contexte d'étude. Les communautés vivant dans des milieux à risque ont su, à travers le temps, trouver des solutions et des façons d'organiser la société qui leur permettent de réduire les conséquences des aléas. Ils connaissent les foyers d'impacts. Ils ont une mémoire institutionnelle des événements extrêmes passés. Ils ont su reconnaître leurs bons coups et leurs erreurs. Ce savoir est une richesse inestimable qui doit être intégrée aux projets. Ceux-ci n'en sortent que plus fructueux et permettent une solide adaptation des communautés.

Cette composante ancrée dans la réalité locale reste en filigrane tout au long du projet. En incluant les différentes parties prenantes, non seulement l'efficacité des scénarios est accrue, mais leur acceptabilité l'est tout autant. En ayant participé à l'identification du problème, porté voix dans les choix des mesures à mettre en place, fourni une rétroaction aux résultats préliminaires et adapté le projet en fonction de leur perspective, ces acteurs ont modelé l'étude à leur réalité respective. Le projet devient leur projet. Il existe cependant des limites au modèle participatif, notamment la lourdeur, la lenteur, les ressources nécessaires et les défis de gestion des relations

(ex. Massé, 2018). Le choix des représentants dans chaque instance doit être réfléchi selon la portée souhaitée et il faut se rappeler qu'une ACA exploratoire pourrait très bien être réalisée sans contact avec le milieu. Néanmoins, les chances que les recommandations soient mises en place malgré une situation complexe augmentent de façon importante avec l'approche participative en s'intéressant dès le début aux enjeux d'adhésion ou d'acceptabilité.

*Un guide évolutif*: Ces études de cas et la méthodologie brossée ici ne sont pas sans faille. La méthode décrite dans ce document-ci se veut une généralisation, une marche à suivre qui ne soit pas collée à l'expérience réalisée pour les deux contextes de recherche où ils ont été employés. Chacune des grandes étapes de l'analyse est regardée avec la lunette d'amélioration continue. D'une part, c'est essentiel parce que les savoirs évoluent rapidement, tant sur les problématiques, les impacts que sur les options d'adaptation, notamment l'évolution en fonction du cadre réglementaire de gestion des zones inondables actuellement en refonte majeure. D'autre part, les compétences collectives à réaliser de tels projets se développent, que ce soit par l'instauration d'équipes dédiées au sein des bureaux de projets de gestion des inondations ou alors par l'accélération du transfert technologique de telles méthodes numériques. En somme, il serait souhaitable de réviser ce guide régulièrement.



## RÉFÉRENCES

---

**ÁLVAREZ-FARIZO, B., & HANLEY, N.** (2006). IMPROVING THE PROCESS OF VALUING NON-MARKET BENEFITS: COMBINING CITIZENS' JURIES WITH CHOICE MODELLING. *LAND ECONOMICS*, 82(3), 465-478.

**BATEMAN, I. J., LOVETT, A. A., BRAINARD, J. S., & PEARCE, D. W.** (2003). *APPLIED ENVIRONMENTAL ECONOMICS: A GIS APPROACH TO COST-BENEFIT ANALYSIS*. CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS.

**BATES, P. D., & DE ROO, A. P. J.** (2000). A SIMPLE RASTER-BASED MODEL FOR FLOOD INUNDATION SIMULATION. *JOURNAL OF HYDROLOGY*, 236(1-2), 54-77.

**BARETTE, N., VANDERMISSEN, M.-H., ROY, F.** ATLAS DE VULNÉRABILITÉ. VULNÉRABILITÉ AUX ALÉAS HYDROMÉTÉOROLOGIQUES. [EN LIGNE] [HTTPS://ATLAS-VULNERABILITE.ULAVAL.CA/PROJET/](https://atlas-vulnerabilite.ulaval.ca/projet/) (PAGE CONSULTÉE LE 26 NOVEMBRE 2020)

**BIRON, P., BUFFIN-BÉLANGER, T., LAROCQUE, M., DEMERS, S., OLSEN, T., OUELLET, M. A., ... & NEEDELMAN, M.** (2013). ESPACE DE LIBERTÉ: UN CADRE DE GESTION INTÉGRÉE POUR LA CONSERVATION DES COURS D'EAU DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES. OURANOS.  
[HTTPS://WWW.OURANOS.CA/PUBLICATION-SCIENTIFIQUE/RAPPORTBIRONETAL2013\\_FR.PDF](https://www.ouranos.ca/publication-scientifique/RAPPORTBIRONETAL2013_FR.PDF)

**BIRON, P., BOUCHER, É., TAHA, W., MARTEL, J-L., FOURNIER, A.** (2020) COMITÉ EXPERT VISANT À IDENTIFIER DES SOLUTIONS PORTEUSES POUR LA RÉDUCTION DE LA VULNÉRABILITÉ DES RISQUES LIÉS À L'INONDATION PAR EMBÂCLES DE GLACE SUR LA RIVIÈRE CHAUDIÈRE – RAPPORT FINAL, 92P.

**BOYER-VILLEMAIRE, U., LAMY, A., DESJARDINS, R., ROQUES, J., HEINRICH, D., SIMARD, C.** (2021A). *ANALYSE COÛTS-AVANTAGES DES OPTIONS D'ADAPTATION AUX INONDATIONS ET ALÉAS FLUVIAUX DE LA RIVIÈRE COATICOOK À COMPTON*. RAPPORT PRÉSENTÉ À RESSOURCES NATURELLES CANADA. OURANOS. MONTRÉAL. 119 P. + ANNEXES.  
[HTTPS://WWW.OURANOS.CA/WP-CONTENT/UPLOADS/RAPPORTBOYERVILLEMAIRE2021A\\_FR.PDF](https://www.ouranos.ca/wp-content/uploads/RAPPORTBOYERVILLEMAIRE2021A_FR.PDF)

**BOYER-VILLEMAIRE, U., LAMY, A., DESJARDINS, R., ROQUES, J., SIMARD, C., HEINRICH, H., MORIN, H.** (2021B). *ANALYSE COÛTS-AVANTAGES DES OPTIONS D'ADAPTATION AUX INONDATIONS ET ALÉAS FLUVIAUX DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE CHAUDIÈRE*. RAPPORT PRÉSENTÉ À RESSOURCES NATURELLES CANADA. OURANOS. MONTRÉAL. 143 P. + ANNEXES.  
[HTTPS://WWW.OURANOS.CA/WP-CONTENT/UPLOADS/RAPPORTBOYERVILLEMAIRE2021B\\_FR.PDF](https://www.ouranos.ca/wp-content/uploads/RAPPORTBOYERVILLEMAIRE2021B_FR.PDF)



**BONNIFAIT, L.** (2005). DÉVELOPPEMENT DE COURBES SUBMERSION-DOMMAGES POUR L'HABITAT RÉSIDENTIEL QUÉBÉCOIS (THESIS DISSERTATION, UNIVERSITÉ DU QUÉBEC, INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE).

**BRAHIC, É. ET TERREAUX, J.** (2009). ÉVALUATION ÉCONOMIQUE DE LA BIODIVERSITÉ : MÉTHODES ET EXEMPLES POUR LES FORÊTS TEMPÉRÉES (PP.151-160). VERSAILLES, FRANCE : ÉDITIONS QUAE.

**BRUNNER, G. W.** (2020). HEC-RAS RIVER ANALYSIS SYSTEM. HYDRAULIC REFERENCE MANUAL. VERSION 6.0 BETA. HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER DAVIS CA.

**CAROLUS, J. F., HANLEY, N., OLSEN, S. B., & PEDERSEN, S. M.** (2018). A BOTTOM-UP APPROACH TO ENVIRONMENTAL COST-BENEFIT ANALYSIS. ECOLOGICAL ECONOMICS, 152, 282-295.

**CHONÉ, G., BENACCHIO, V., BIRON, P., BUFIN-BÉLANGER, T.** (2020). VERS UNE CARTOGRAPHIE GÉNÉRALE DES ZONES INONDABLES : MODÉLISATION HYDRAULIQUE APPLIQUÉE À LARGE ÉCHELLE POUR LES COURS D'EAU DU QUÉBEC HABITÉ. RAPPORT FINAL. MELCC. 150.

**CIRCÉ, M., DA SILVA, L., BOYER-VILLEMAIRE, U., DUFF, G., DESJARLAIS, C. ET MORNEAU, F.** (2016A) ANALYSE COÛTS-AVANTAGES D'OPTIONS D'ADAPTATION EN ZONE CÔTIÈRE AU QUÉBEC – RAPPORT SYNTHÈSE. OURANOS, MONTRÉAL. 92 PAGES ET ANNEXES.

**CIRCÉ, M., DA SILVA, L., MERCIER, X., DUFF, G., BOYER-VILLEMAIRE, U., CORBEIL, S., DESJARLAIS, C. ET MORNEAU F.** (2016B) ANALYSE COÛTS-AVANTAGES DES OPTIONS D'ADAPTATION EN ZONE CÔTIÈRE À CARLETON-SUR-MER. OURANOS, MONTRÉAL. 169 PAGES ET ANNEXES

**CIRCÉ, M., DA SILVA, L., DUFF, G., BOYER-VILLEMAIRE, U., DESJARLAIS, C., ET MORNEAU, F.** (2016C) ANALYSE COÛTS-AVANTAGES DES OPTIONS D'ADAPTATION EN ZONE CÔTIÈRE À RIVIÈRE-OUELLE. OURANOS : MONTRÉAL. 69 PAGES ET ANNEXES.

**CMI – COMMISSION MIXTE INTERNATIONALE LAC CHAMPLAIN ET RIVIÈRE RICHELIEU** (IN PREP.) PROJET D'ANALYSE COÛTS-AVANTAGES DES OPTIONS D'ADAPTATION AU LAC CHAMPLAIN ET À LA RIVIÈRE RICHELIEU.

**CRAAQ - CENTRE DE RÉFÉRENCE EN AGRICULTURE ET AGROALIMENTAIRE DU QUÉBEC** (2014). MACHINERIE-COÛT D'UTILISATION ET TAUX À FORFAIT SUGGÉRÉS (AGDEX 740/825).

[HTTPS://WWW.CRAAQ.QC.CA/PUBLICATIONS-DU-CRAAQ/MACHINERIE-CO%C3%BBTS-D\\_UTILISATION-ET-TAUX-A-FORFAITS-SUGGERES-AVEC-SYSTEME-D\\_AUTOGUIDAGE-2014-AGDEX-740825A/P/PREF0380](https://www.craaq.qc.ca/publications-du-craaq/machinerie-co%C3%BBts-d_utilisation-et-taux-a-forfaits-suggeres-avec-systeme-d_autoguidage-2014-agdex-740825a/p/pref0380)

**CRAAQ - CENTRE DE RÉFÉRENCE EN AGRICULTURE ET AGROALIMENTAIRE DU QUÉBEC.** (2015A). AMÉNAGEMENTS HYDRO-AGRIQUES DIMINUANT L'ÉROSION ET AMÉLIORANT L'ÉGOUTTEMENT DE L'EAU DE SURFACE - FRAIS D'IMPLANTATION ET D'ENTRETIEN. AGDEX570/821A

**CRAAQ - CENTRE DE RÉFÉRENCE EN AGRICULTURE ET AGROALIMENTAIRE DU QUÉBEC.** (2015B). AMÉNAGEMENTS HYDRO-AGRIQUES STABILISANT LES BERGES - FRAIS D'IMPLANTATION ET D'ENTRETIEN. AGDEX570/821B.

**DAMART, S., & ROY, B.** (2009). THE USES OF COST-BENEFIT ANALYSIS IN PUBLIC TRANSPORTATION DECISION-MAKING IN FRANCE. *TRANSPORT POLICY*, 16(4), 200-212.

**DEMERS S., MASSÉ S., BUFFIN-BÉLANGER T.** (2017) CARTOGRAPHIE DES ALÉAS FLUVIAUX DE LA RIVIÈRE COATICOOK : DIAGNOSTIC, MÉTHODOLOGIE ET RECOMMANDATIONS. LABORATOIRE DE GÉOMORPHOLOGIE ET DYNAMIQUE FLUVIALE, UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI.  
[HTTP://COGESAF.QC.CA/WP-CONTENT/UPLOADS/2018/11/DEMERS-ET-AL.-2017-CARTOGRAPHIE-DES-AL%C3%A9AS-FLUVIAUX-DE-LA-VALL%C3%A9E-DE-COATICOOK.PDF](http://cogesaf.qc.ca/wp-content/uploads/2018/11/DEMERS-ET-AL.-2017-CARTOGRAPHIE-DES-AL%C3%A9AS-FLUVIAUX-DE-LA-VALL%C3%A9E-DE-COATICOOK.PDF)

**DESJARLAIS, C. ET LARRIVÉE, C.** (2011). ANALYSE ÉCONOMIQUE DE L'ADAPTATION AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES EN MATIÈRE DE DRAINAGE URBAIN AU QUÉBEC : COMPARAISON DE DIVERSES STRATÉGIES D'ADAPTATION POUR UN SECTEUR DE MONTRÉAL. OURANOS. [HTTPS://WWW.OURANOS.CA/PUBLICATION-SCIENTIFIQUE/RAPPORTDESJARLAIS2011\\_FR.PDF](https://www.ouranos.ca/publication-scientifique/RAPPORTDESJARLAIS2011_FR.PDF)

**DOBROW, M.** (2010) MÉTHODES DÉLIBÉRATIVES POUR COMBINER DIFFÉRENTS TYPES DE DONNÉES PROBANTES DANS LE DÉVELOPPEMENT DE RECOMMANDATIONS CONCERNANT DES POLITIQUES PUBLIQUES. [EN LIGNE]  
[HTTPS://WWW.CCNPPS.CA/DOCS/DELIBERATIONJASP2010\\_DOBROWFR.PDF](https://www.ccnpps.ca/docs/DELIBERATIONJASP2010_DOBROWFR.PDF)

**DUPRAS, J., RÉVERET, J.P., HE, J.** (2013). L'ÉVALUATION ÉCONOMIQUE DES BIENS ET SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES : UN GUIDE MÉTHODOLOGIQUE POUR UNE AUGMENTATION DE LA CAPACITÉ À PRENDRE DES DÉCISIONS D'ADAPTATION. OURANOS.  
[HTTPS://WWW.OURANOS.CA/WP-CONTENT/UPLOADS/RAPPORTREVERET2013\\_FR.PDF](https://www.ouranos.ca/wp-content/uploads/RAPPORTREVERET2013_FR.PDF)

**DUTEMPLE, K.** (2019). LES COÛTS DES PROJETS DE DÉMOLITION. [EN LIGNE]  
[HTTPS://SOUMISSIONRENOVATION.CA/FR/BLOGUE/COUTS-PROJETS-DEMOLITION](https://soumissionrenovation.ca/fr/blogue/couts-projets-demolition)

**ECOSYSTEM KNOWLEDGE NETWORK. INVEST** (INTEGRATED VALUATION OF ECOSYSTEM SERVICES AND TRADE-OFFS). OVERVIEW [EN LIGNE]  
[HTTPS://ECOSYSTEMSKNOWLEDGE.NET/INVEST](https://ecosystemsknowledge.net/invest) (PAGE CONSULTÉE LE 13 NOVEMBRE 2020)

**ECCC- ENVIRONNEMENT ET CHANGEMENTS CLIMATIQUES CANADA** (2016). TECHNICAL UPDATE TO ENVIRONMENT AND CLIMATE CHANGE CANADA'S SOCIAL COST OF GREENHOUSE GAS ESTIMATES. [EN LIGNE]  
[HTTP://OARESOURCE.LIBRARY.CARLETON.CA/WCL/2016/20160502/EN14-202-2016-ENG.PDF](http://oaresource.library.carleton.ca/wcl/2016/20160502/EN14-202-2016-ENG.PDF) (PAGE CONSULTÉE LE 24 AOÛT 2020).

**FADQ - FINANCIÈRE AGRICOLE DU QUÉBEC.** (2018). BASE DE DONNÉES DES PARCELLES ET PRODUCTIONS AGRICOLES DÉCLARÉES (V.3) [FICHER DE FORME]. [HTTPS://WWW.FADQ.QC.CA/DOCUMENTS/DONNEES/BASE-DE-DONNEES-DES-PARCELLES-ET-PRODUCTIONS-AGRICOLES-DECLAREES/](https://www.fadq.qc.ca/documents/donnees/base-de-donnees-des-parcelles-et-productions-agricoles-declarees/)

**FADQ - FINANCIÈRE AGRICOLE DU QUÉBEC.** (2019, JUIN). BULLETIN TRANSAC-TERRES ÉDITION 2019.  
[HTTPS://WWW.FADQ.QC.CA/FILEADMIN/FR/BULLETINS/TRANSAC-TERRES-2019.PDF](https://www.fadq.qc.ca/fileadmin/fr/bulletins/transac-terres-2019.pdf)

**FADQ - FINANCIÈRE AGRICOLE DU QUÉBEC.** (2021, JANVIER). BULLETIN TRANSAC-TERRES ÉDITION 2020.  
[HTTPS://WWW.FADQ.QC.CA/SALLE-DE-PRESSE/BULLETINS-DINFORMATION/BULLETIN-TRANSAC-TERRES/BULLETIN-TRANSAC-TERRES-2020/](https://www.fadq.qc.ca/salle-de-presse/bulletins-dinformation/bulletin-transac-terres/bulletin-transac-terres-2020/)

**FEMA - FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY.** (2009). HAZUS-MH: TECHNICAL MANUAL. DEPARTMENT OF HOMELAND SECURITY.

[HTTPS://WWW.FEMA.GOV/SITES/DEFAULT/FILES/2020-09/FEMA\\_HAZUS\\_FLOOD-MODEL\\_TECHNICAL-MANUAL\\_2.1.PDF](https://www.fema.gov/sites/default/files/2020-09/fema_hazus_flood-model_technical-manual_2.1.pdf)

**GIEC, IPCC - GROUPE D'EXPERTS INTERGOUVERNEMENTAL SUR L'ÉVOLUTION DU CLIMAT** (2014). CLIMATE CHANGE 2014: IMPACTS, ADAPTATION, AND VULNERABILITY. PART A: GLOBAL AND SECTORAL ASPECTS. CONTRIBUTION OF WORKING GROUP II TO THE FIFTH ASSESSMENT REPORT OF THE INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE [FIELD, C.B., V.R. BARROS, D.J. DOKKEN, K.J. MACH, M.D. MASTRANDREA, T.E. BILIR, M. CHATTERJEE, K.L. EBI, Y.O. ESTRADA, R.C. GENOVA, B. GIRMA, E.S. KISSEL, A.N. LEVY, S. MACCRACKEN, P.R. MASTRANDREA, AND L.L. WHITE (EDS.)]. CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, CAMBRIDGE, UNITED KINGDOM AND NEW YORK, NY, USA, 1132 PP.

**HANLEY, N.** (2001). COST—BENEFIT ANALYSIS AND ENVIRONMENTAL POLICYMAKING. ENVIRONMENT AND PLANNING C: GOVERNMENT AND POLICY, 19(1), 103-118.

**HAYHOE, K., EDMONDS, J., KOPP, R., LEGRANDE, A., SANDERSON, B., WEHNER, M., & WUEBBLES, D.** (2017). CLIMATE MODELS, SCENARIOS, AND PROJECTIONS.

**HEINRICH, D., BOYER-VILLEMAIRE, U., SIMARD, C., LAMY, A., ROQUES, J., MORIN H., QUINTIN C.,** (2021). ANNEXE 1. ESTIMATION DU COÛT DES MESURES. DANS LE CADRE DU PROJET *ANALYSE COÛTS-AVANTAGES DES OPTIONS D'ADAPTATION AUX INONDATIONS ET ALÉAS FLUVIAUX EN CONTEXTE DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES*. RAPPORT PRÉSENTÉ OURANOS. MONTRÉAL. (IN PREP).

**JEAN, M. ET DOYON, B.** (2020). FONCTIONS D'ENDOMMAGEMENT RÉSIDENTIEL, ÉTUDE DE LA CMI SUR LE SYSTÈME LAC CHAMPLAIN – RIVIÈRE RICHELIEU, GARDE-CÔTIÈRE CANADIENNE, JUIN 2020, 7 PP.

**LOVELACE R., NOWOSAD J., MUENCHOW J.** (2019). GEOCOMPUTATION WITH R. CRC PRESS. [HTTPS://BOOKDOWN.ORG/ROBINLOVELACE/GEOCOMPR/](https://bookdown.org/robinlovelace/geocompr/)

**ISO** (2018). ISO 31000:2018(FR) MANAGEMENT DU RISQUE - LIGNES DIRECTRICES. [EN LIGNE] [HTTPS://WWW.ISO.ORG/OBP/UI/FR/#ISO:STD:ISO:31000:ED-2:V1:FR](https://www.iso.org/obp/ui/fr/#iso:std:iso:31000:ed-2:v1:fr) (PAGE CONSULTÉE LE 5 FÉVRIER 2020)

**Khoi, D. N.** (2016). COMPARISON OF THE HEC-HMS AND SWAT HYDROLOGICAL MODELS IN SIMULATING THE STREAM FLOW. JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY, 53(5A), 189-195.

**KIND, J., WOUTER BOTZEN, W. J., & AERTS, J. C.** (2017). ACCOUNTING FOR RISK AVERSION, INCOME DISTRIBUTION AND SOCIAL WELFARE IN COST-BENEFIT ANALYSIS FOR FLOOD RISK MANAGEMENT. WILEY INTERDISCIPLINARY REVIEWS: CLIMATE CHANGE, 8(2), e446.

**LAIBSON, D.** (1997). GOLDEN EGGS AND HYPERBOLIC DISCOUNTING. THE QUARTERLY JOURNAL OF ECONOMICS, 112(2), 443-478.

**LECONTE, R., BIZHANIMANZAR, M.** (2020) MODÉLISATION DU RÉGIME HYDROLOGIQUE EN FONCTION DES MILIEUX HUMIDES ET RIVERAINS DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES. RAPPORT FINAL DE PROJET PRÉSENTÉ AU COBARIC. UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE. 74P.

[HTTPS://COBARIC.QC.CA/WP-](https://cobaric.qc.ca/wp-content/uploads/2021/02/Rapport_de_projet_modelisation_USherbrooke_Cobaric.pdf)

[CONTENT/UPLOADS/2021/02/RAPPORT\\_DE\\_PROJET\\_MODELISATION\\_USHERBROOKE\\_COBARIC.PDF](https://cobaric.qc.ca/wp-content/uploads/2021/02/Rapport_de_projet_modelisation_USherbrooke_Cobaric.pdf)

**MAMH - MINISTÈRE DES AFFAIRES MUNICIPALES ET DE L'HABITATION** (2019). RÔLE D'ÉVALUATION FONCIÈRE DES MUNICIPALITÉS. [BASE DE DONNÉES].

**MASSÉ, S., BUFFIN-BÉLANGER, T., BIRON, P., & RUIZ, J.** (2018). LA PORTÉE ET LES LIMITES DES APPROCHES PARTICIPATIVES POUR LA GESTION INTÉGRÉE DES INONDATIONS. REVUE DES SCIENCES DE L'EAU/JOURNAL OF WATER SCIENCE, 31(4), 341-362.

**MELCC - MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES.** (2020). APPEL À PROJETS ET INSTRUCTIONS – VOLET 2 DE L'AIDE FINANCIÈRE DU PROGRAMME DE RESTAURATION ET DE CRÉATION DE MILIEUX HUMIDES ET HYDRIQUES.

[WWW.ENVIRONNEMENT.GOUV.QC.CA/PROGRAMMES/PRCMHH/APPEL-PROJETS-INSTRUCTIONS-VOLET-2.PDF](http://www.environnement.gouv.qc.ca/programmes/prcmhh/appele-projets-instructions-volet-2.pdf)

**MELCC - MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES.** POLITIQUE DE PROTECTION DES RIVES, DU LITTORAL ET DES PLAINES INONDABLES. [EN LIGNE]

[HTTP://WWW.ENVIRONNEMENT.GOUV.QC.CA/EAU/RIVES/INDEX.HTM](http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/rives/index.htm) (PAGE CONSULTÉE LE 11 JANVIER 2021A)

**MELCC - MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES.** GUIDE DE GESTION DES EAUX PLUVIALES. [EN LIGNE]

[HTTPS://WWW.ENVIRONNEMENT.GOUV.QC.CA/EAU/PLUVIALES/CHAP11.PDF](https://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/pluviales/chap11.pdf) (PAGE CONSULTÉE LE 15 FÉVRIER 2021B)

**MERN – MINISTÈRE DE L'ÉNERGIE ET DES RESSOURCES NATURELLES. (2021). AQGÉOBÂTI. [BASE DE DONNÉES].** [HTTPS://ADRESSESQUEBEC.GOUV.QC.CA/AQGEOBATI.ASP](https://adressesquebec.gouv.qc.ca/aqgeobati.asp)

**MICROSOFT.** (2019). [CANADIANBUILDINGFOOTPRINTS](https://github.com/microsoft/canadianbuildingfootprints). [BASE DE DONNÉES].

[HTTPS://GITHUB.COM/MICROSOFT/CANADIANBUILDINGFOOTPRINTS](https://github.com/microsoft/canadianbuildingfootprints)

**MSP - MINISTÈRE DE LA SÉCURITÉ PUBLIQUE.** (2019) PROGRAMME GÉNÉRAL D'INDEMNISATION ET D'AIDE FINANCIÈRE. DÉCRET 403-2019.

**MTQ - MINISTÈRE DES TRANSPORTS DU QUÉBEC** (2019). DÉBIT DE CIRCULATION [FICHIER DE FORME]. [HTTPS://WWW.TRANSPORTS.GOUV.QC.CA/FR/PAGES/DEFAULT.ASPX](https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/pages/default.aspx)

**NOAA - NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION** (2014). ECONOMIC ASSESSMENT OF GREEN INFRASTRUCTURE STRATEGIES FOR CLIMATE CHANGE ADAPTATION: PILOT STUDIES IN THE GREAT LAKES REGION. 181

**NOAA - NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION** (2015). A GUIDE TO ASSESSING GREEN INFRASTRUCTURE COSTS AND BENEFITS FOR FLOOD REDUCTION. [EN LIGNE]

[HTTPS://COAST.NOAA.GOV/DATA/DOCS/DIGITALCOAST/GI-COST-BENEFIT.PDF](https://coast.noaa.gov/data/docs/digitalcoast/gi-cost-benefit.pdf)

**ORGANISATION DE LA SÉCURITÉ CIVILE DU QUÉBEC. PROTECTION CONTRE LES CRUES.** [EN LIGNE]  
[HTTPS://CDN-CONTENU.QUEBEC.CA/CDN-CONTENU/URGENCE-QUEBEC/FEUILLET-DIGUE-SACS-DE-SABLE.PDF?1583357466](https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/urgence-quebec/feuille-digue-sacs-de-sable.pdf?1583357466) (PAGE CONSULTÉE LE 15 FÉVRIER 2020)

**PENNING-ROWSSELL, E., PRIEST, S., PARKER, D., MORRIS, J., TUNSTALL, S., VIAVATTENE, C., CHATTERTON, J., & OWEN, D.** (2013). FLOOD AND COASTAL EROSION RISK MANAGEMENT: A MANUAL FOR ECONOMIC APPRAISAL (1ST ED.). ROUTLEDGE. [HTTPS://DOI.ORG/10.4324/9780203066393](https://doi.org/10.4324/9780203066393)

**PÔLE D'EXPERTISE MULTIDISCIPLINAIRE EN GESTION DU LITTORAL DU LAC ST-PIERRE (PÔLE LSP)** (PROJET EN COURS) AXE AGRICULTURE :  
[HTTPS://ORAPRDNT.UQTR.QUEBEC.CA/PLS/PUBLIC/GSCW031?OWA\\_NO\\_SITE=5765](https://oraprdnt.uqtr.quebec.ca/pls/public/gscw031?owa_no_site=5765)

**PREGNOLATO, M., FORD, A., WILKINSON, S. M., & DAWSON, R. J.** (2017). THE IMPACT OF FLOODING ON ROAD TRANSPORT: A DEPTH-DIREUPTION FUNCTION. TRANSPORTATION RESEARCH PART D: TRANSPORT AND ENVIRONMENT, 55, 67-81

**MARCEAU, P., HUME, J.** (2019). PRÉSENTATION DES PROJETS GÉRÉS PAR LE MINISTÈRE DE LA SÉCURITÉ PUBLIQUE EN LIEN AVEC LES INONDATIONS. RIISQ - RÉSEAU INONDATIONS INTERSECTORIEL DU QUÉBEC (RIISQ).  
[HTTPS://RIISQ.CA/WP-CONTENT/UPLOADS/2021/02/RIISQ\\_AG\\_20191128\\_10H30-10H45\\_PASCALMARCEAU\\_MSP.PDF](https://riisq.ca/wp-content/uploads/2021/02/RIISQ_AG_20191128_10H30-10H45_PASCALMARCEAU_MSP.PDF)

**RIEUSSEC, E.** (2018). ANALYSE COMPARATIVE DES DIFFÉRENTS MODES DE GESTION DES SÉDIMENTS DE DRAGAGE EN MILIEUX TERRESTRE ET MARIN. UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE.  
[HTTPS://SAVOIRS.USHERBROOKE.CA/HANDLE/11143/7423](https://savoirs.usherbrooke.ca/handle/11143/7423)

**ROMJIN G. ET RENES, G.** (2013). GENERAL GUIDANCE FOR COST-BENEFIT ANALYSIS. CPB NETHERLANDS BUREAU FOR ECONOMIC POLICY ANALYSIS.  
[HTTPS://WWW.CPB.NL/EN/PUBLICATION/GENERAL-GUIDANCE-FOR-COST-BENEFIT-ANALYSIS](https://www.cpb.nl/en/publication/general-guidance-for-cost-benefit-analysis)

**ROUSSEAU, A. N., SAVARY, S., & FOSSEY, M.** (2013). MODÉLISATION HYDROLOGIQUE DES MILIEUX HUMIDES DANS LES BASSES-TERRES DU SAINT-LAURENT: ACTIVITÉ EN VULNÉRABILITÉ, IMPACTS ET ADAPTATION PACC 26: RAPPORT FINAL DU VOLET HYDROLOGIQUE.

**SAMBE, A. M., DOGOUA F-H.** (2016). GUIDE DE L'ANALYSE AVANTAGES-COÛTS DES PROJETS PUBLICS EN TRANSPORT ROUTIER. PARTIE 2: PARAMÈTRES VALEURS DE 2015. MINISTÈRE DES TRANSPORTS, DE LA MOBILITÉ DURABLE ET DE L'ÉLECTRIFICATION DES TRANSPORTS.

**SAGER, T.** (1979). CITIZEN PARTICIPATION AND COST-BENEFIT ANALYSIS. TRANSPORTATION PLANNING AND TECHNOLOGY, 5(3), 161-168.

**SECRÉTARIAT DU CONSEIL DU TRÉSOR DU CANADA.** (2007). GUIDE D'ANALYSE COÛTS-AVANTAGES : PROPOSITIONS DE RÉGLEMENTATION.  
[HTTPS://PUBLICATIONS.GC.CA/COLLECTIONS/COLLECTION\\_2013/SCT-TBS/BT58-5-2007-FRA.PDF](https://publications.gc.ca/collections/collection_2013/sct-tbs/BT58-5-2007-FRA.PDF)

**SHIVA, V.** (2005). EARTH DEMOCRACY: JUSTICE, SUSTAINABILITY AND PEACE. ZED BOOKS.

**SOW, M. ROQUES, J.** (2019) - PROTOCOLE DE MISE EN ŒUVRE DES ASSEMBLÉES CITOYENNES DE PRIORISATION. RAPPORT DE STAGE DANS LE CADRE DU PROJET D'ANALYSE DES COÛTS ET DES AVANTAGES DE L'ADAPTATION AUX INONDATIONS RIVERAINES. ROBVOQ, 30 P.

**TECSULT. (1994)** ÉTUDE DE MODÉLISATION DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE CHAUDIÈRE. RAPPORT FINAL. RAPPORT REMIS À ENVIRONNEMENT CANADA ET AU MINISTÈRE DE LA SÉCURITÉ PUBLIQUE DU GOUVERNEMENT DU QUÉBEC, 108 P.

**TRUDEL, M., GOBBI, S.** (2019). PROJECTION ET SCÉNARISATION HYDROLOGIQUE ET HYDRAULIQUE – RIVIÈRE COATICOOK. UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE. 41.

**UICN FRANCE.** (2018). LES SOLUTIONS FONDÉES SUR LA NATURE POUR LUTTER CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET RÉDUIRE LES RISQUES NATURELS EN FRANCE. PARIS, FRANCE.

[HTTPS://UICN.FR/WP-CONTENT/UPLOADS/2018/06/BROCHURE-SFN-MAI2018-WEB-OK.PDF](https://uicn.fr/wp-content/uploads/2018/06/brochure-sfn-mai2018-web-ok.pdf)

**VÉZINA, A., LEBEL, F., RIVEST, C. ET DION, J.-P.** (2019). OUTIL DE SIMULATION DES IMPACTS ÉCONOMIQUES DE PRATIQUES AGROFORESTIÈRES. IN INSTITUT DE TECHNOLOGIE AGROALIMENTAIRE. [EN LIGNE]. [HTTP://WWW.WBVECAN.CA/FRANCAIS/COÛTSPDF.HTML](http://www.wbvecan.ca/francais/coûtspdf.html) (PAGE CONSULTÉE LE 30 MARS 2020)

**VOUSDOKAS M., MENTASCHI L., MONGELLI I., CISCAR J-C, HINKEL J.(A), WARD P.(B), GOSLING S.(C) AND FEYEN L.** (2020). ADAPTING TO RISING COASTAL FLOOD RISK IN THE EU UNDER CLIMATE CHANGE, EUR 29969 EN, PUBLICATIONS OFFICE OF THE EUROPEAN UNION, LUXEMBOURG, ISBN 978-92-76-12990-5, DOI:10.2760/456870, JRC118512



## **ANNEXES**

## ANNEXE A – COMPLÉMENTS AU CHAPITRE 3 : MOBILISATION DES PARTIES PRENANTES

**Tableau A.1.** Composition et mandat des structures

	<b>Structure</b>	<b>Représentations et expertises</b>	<b>Rôles dans le projet</b>
<b>Échelle de l'administration et de la coordination du projet (global)</b>	<b>Équipe de projet</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Économiques</li> <li>· Services écosystémiques</li> <li>· Géomatique et programmation</li> <li>· Hydrologie et hydrodynamique</li> <li>· Gestion de risque</li> <li>· Mobilisation et participation citoyenne</li> <li>· Représentant des structures mobilisatrices</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Coordination</li> <li>· Mobilisation</li> <li>· Production de livrables intermédiaires et de l'ensemble des livrables finaux</li> </ul>
	<b>Comité de suivi</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Équipe de projet, complétée de</li> <li>· Représentants des ministères concernés</li> <li>· Représentants des universités et groupes de recherche pertinents ou concernés</li> <li>· Représentant des bailleurs de fonds</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Assurer les orientations et la validité technique et scientifique des contenus</li> <li>· Apporter un appui technique et administratif à l'équipe de projet</li> </ul>
<b>Échelle du territoire d'étude et de la communauté (local)</b>	<b>Comité technique</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Experts universitaires (modélisation CC-HHH)</li> <li>· Experts et représentants des entités administratives porteuses de projets associés</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Produire plusieurs livrables intermédiaires</li> <li>· Apporter l'expertise dans l'identification et le dimensionnement des mesures</li> </ul>



	<b>Structure</b>	<b>Représentations et expertises</b>	<b>Rôles dans le projet</b>
	<b>Comité local de suivi (CLS)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Représentants des directions régionales et des ministères concernés</li> <li>· Représentants régionaux des principaux groupes d'utilisateurs</li> <li>· Représentants élus des municipalités et/ou MRC               <ul style="list-style-type: none"> <li>· Aménagistes, urbanistes ou gestionnaires de plans d'eau, de cours d'eau ou de MHH</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Valider le contenu et la méthode de chacune des étapes du processus</li> <li>· Assurer la représentativité et l'ancrage de l'ensemble de l'étude à la réalité du terrain</li> <li>· Apporter des éléments de bonifications du processus (informations sur la communauté, les problématiques, les processus, les solutions, etc.)</li> <li>· Assurer l'identification des membres et la représentativité des utilisateurs dans l'ACP</li> </ul>
	<b>Assemblée consultative de priorisation (ACP)</b>	<p>Représentants locaux des principaux groupes d'utilisateurs</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>· Expertises similaires au CLS</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· Identifier et prioriser les mesures d'adaptation à analyser</li> <li>· Fournir les éléments tangibles et intangibles devant être quantifiés</li> <li>· Transmettre les préoccupations résiduelles et identifier les freins de mise en œuvre des solutions étudiées</li> </ul>

**Tableau A.2.** Modèle SÉNAT –début de projet

Votre Nom et Prénom	Votre fonction / emploi	Les actions auxquelles vous vous engagez dans le cadre du projet d'ACA	Les résultats espérés du projet d'ACA	Les conditions de leur atteinte	Les acteurs que vous souhaiteriez voir s'engager dans le projet	Les actions pouvant être entreprises pour permettre leur engagement	Les résultats attendus de leur implication dans le projet

**Tableau A.3.** Modèle SÉNAT- Fin de projet

Votre Nom et Prénom	Votre fonction / emploi	Résultats observés	Pistes de solutions et prochaines étapes

# ANNEXE B – COMPLÉMENTS AU CHAPITRE 5 : SCÉNARISATION DES STRATÉGIES D'ADAPTATION

**Tableau B.1.** Impacts anticipés par mesure d'adaptation et poste d'impact, par rapport au scénario de référence

	R O C	D R A	B A S	B A S +	D I G	B A R R	I M M b	P R E V	R E L O C	M H H	B R	E M O B	P R A	C U L T
<b>Coût de la mesure</b>														
Conception et réalisation	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red
Entretien	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Green	Red	Red	Red	Yellow	Red	Red
Coûts d'opportunité	Grey	Grey	Red	Red	Red	Grey	Grey	Grey	Red	Red	Red	Red	Yellow	Red
<b>Coûts liés à la submersion</b>														
<b>Gestion des urgences</b>														
Nettoyage des débris urbains	Yellow	Green	Yellow	Yellow	Green	Yellow	Grey	Grey	Green	Green	Green	Green	Grey	Grey
Intervention d'urgence	Yellow	Green	Green	Green	Green	Yellow	Grey	Grey	Green	Green	Green	Green	Green	Green
Nettoyage des débris agricoles	Grey	Grey	Yellow	Green	Yellow	Yellow	Grey	Grey	Green	Green	Green	Green	Green	Green
Évacuation	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
Relocalisation	Grey	Grey	Grey	Grey	Grey	Grey	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red	Red
Intervention post-sinistre	Green	Green	Yellow	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green
<b>Secteur résidentiel</b>														
Dommages aux bâtiments	Yellow	Green	Yellow	Green	Green	Yellow	Green	Grey	Green	Yellow	Grey	Green	Grey	Grey
<b>Secteur agricole</b>														
Dommages aux cultures	Green	Green	Yellow	Green	Green	Yellow	Grey	Grey	Green	Green	Green	Green	Green	Green
<b>Secteur commercial et industriel</b>														
Dommages aux bâtiments	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Grey	Green	Green	Green	Green	Green	Green
Perte de stock	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Grey	Green	Green	Green	Green	Green	Green
Perte de journées de production	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Grey	Green	Green	Green	Green	Green	Green
Pertes de vente	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Grey	Green	Green	Green	Green	Green	Green
Pertes de revenus locatifs	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Grey	Green	Green	Green	Green	Green	Green
Pertes de récréotourisme	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Green	Grey	Green	Green	Green	Green	Green	Green

	R O C	D R A	B A S	B A S +	D I G	B A R R	I M M b	P R E V	R E L O C	M H H	B R	E M O B	P R A	C U L T
<b>Secteur public</b>														
Dommmages aux infrastructures														
Pertes dues à l'interruption des services														
<b>Secteur du transport</b>														
Dommmages aux infrastructures														
Incidence économique de la fermeture des infrastructures														
Incidence économique des ralentissements routiers														
<b>Psychosociaux</b>														
Stress et détresse														
Blessures et décès														
Pertes de salaires														
Dépenses et soins														
<b>Coûts liés à l'érosion des berges</b>														
<b>Secteur résidentiel</b>														
Pertes de terrain résidentiel														
<b>Secteur agricole</b>														
Pertes de terres agricoles														
<b>Coûts liés aux avulsions</b>														
Actifs résidentiels														
Actifs agricoles														

	ROC	DRA	BAS	BAS+	DIG	BARR	IMMb	PREV	RELOC	MHH	BR	EMOB	PRA	CULT
Autres actifs	Yellow	Light Green	Yellow	Yellow	Light Green	Yellow	Light Green	Grey	Green	Light Green	Light Green	Green	Light Green	Light Green
<b>Bénéfices environnementaux et connexes</b>														
<b>Services écosystémiques :</b>														
Habitats fauniques	Light Red	Light Red	Light Red	Red	Light Red	Grey	Grey	Grey	Light Green	Green	Green	Green	Light Green	Light Green
Qualité de l'eau	Red	Light Red	Light Red	Light Red	Light Red	Red	Grey	Grey	Light Green	Green	Green	Green	Light Green	Light Green
Sédiments	Red	Light Red	Light Red	Light Red	Light Red	Red	Grey	Grey	Light Green	Green	Green	Green	Light Green	Light Green
Nutriments	Red	Light Red	Light Red	Light Red	Light Red	Red	Grey	Grey	Light Green	Green	Green	Green	Light Green	Light Green
Séquestration du carbone	Grey	Grey	Grey	Grey	Grey	Grey	Grey	Grey	Light Green	Green	Green	Green	Yellow	Yellow
<b>Usages publics des espaces naturels :</b>														
Activités récréatives et/ou touristiques	Light Red	Light Red	Grey	Grey	Light Red	Grey	Grey	Grey	Light Green	Green	Light Green	Light Green	Light Green	Light Green

<b>Légende</b>	
<b>Effet positif important</b>	Green
<b>Effet positif léger</b>	Light Green
<b>Effet incertain</b>	Yellow
<b>Effet nul</b>	Grey
<b>Effet négatif léger</b>	Light Red
<b>Effet négatif important</b>	Red
<b>ROC</b>	Enrochement léger
<b>DRA</b>	Dragage
<b>BAS</b>	Bassins de rétention
<b>BAS+</b>	Bassin de rétention surdimensionné
<b>DIG</b>	Digues
<b>BARR</b>	Gestion des barrages
<b>IMMb</b>	Immunsation individuelle des bâtiments
<b>PREV</b>	Système de prévision et d'alerte
<b>RELOC</b>	Relocalisations des propriétés résidentielles et commerciales
<b>MHH</b>	Milieus humides
<b>BR</b>	Bandes riveraines
<b>EMOB</b>	Espace de mobilité (avec ou sans démantèlement)
<b>PRA</b>	Modification des pratiques agricoles
<b>CULT</b>	Restrictions des cultures permises dans la zone inondable

# EXEMPLE DE DESCRIPTION DES SCÉNARIOS, ÉTUDE DE CAS DE COMPTON

## Stabilisation avec dragage (STA-DG)

Le scénario de stabilisation avec dragage (STA-DG) implique la poursuite de la stabilisation de berge (ajout de 1,5 km, portant le total à 8,4 km) et le dragage de 3 ilots dans le chenal principal, pour un volume total dragué de 6791 m<sup>3</sup> du chenal (Figure ci-jointe). Le dragage est un type de travail en cours d'eau règlementé pour lequel les producteurs ont démontré un intérêt. Il entraîne une modification structurelle du chenal et nécessite un entretien régulier (hypothèse aux 7 ans).

### Coûts des mesures

**Enrochement** : L'enrochement avec végétalisation se base sur un coût de 500 \$ au mètre linéaire, pour un ajout de 1,5 km répartis sur 3 ans. S'y ajoutent des coûts de conception de 20 %. L'entretien s'effectue sur le total incluant les enrochements existants et ceux ajoutés, soit 8,4 km, et correspond à 10% des coûts d'implantation à chaque décennie. La végétalisation implique une implantation et un suivi décroissant 5 ans de 12 % à 1% des coûts de réalisation. Au total, le coût actualisé sur 50 ans de cette mesure est de 2,021 M\$, soit 1,052 pour l'entretien des enrochements actuels et 0,969 M\$ pour les enrochements ajoutés. Aucune valeur résiduelle n'a été considérée.

**Dragage** : Les coûts d'implantation se chiffrent à 72 \$/m<sup>3</sup> auxquels s'ajoutent 35 \$/m<sup>3</sup> pour les redevances et mises en dépôt (Rieussec, 2008). On assume 10 % des coûts d'implantation pour la conception et des coûts d'entretien optimiste de 100 % aux 7 ans. Selon le volume total à draguer, le coût actualité de ce cette mesure sur 50 ans s'élèvent à 4,524 M\$. Il est probable ce coût soit sous-estimé, puisqu'un événement significatif de pluie torrentielle peut combler la déformation instantanément, mais il est difficile à prévoir.

**Le coût total actualisé sur 50 ans de ce scénario est de 6,545 M\$.**

### Efficacité

**Submersion** : Le dragage entraîne une réduction locale des profondeurs d'inondation jusqu'à 15 cm, mais une augmentation jusqu'à 5 cm à d'autres endroits, pour une efficacité globale inférieure à 5% de l'étendue de la zone inondable.

**Érosion** : L'hypothèse est que la stabilisation amène 100 % de réduction de coûts d'érosion des berges

### Impacts identifiés

Vu la réduction à la fois de la submersion et de l'érosion, les impacts anticipés sont positifs dans tous les secteurs (agricole, résidentiel et psycho-social, commercial et industriel, municipal, économie), sauf pour les services écosystémiques en raison de la perturbation du milieu aquatique associée aux 2 mesures



**Tableau B.2.** « Recette » des scénarios d'adaptation, étude de cas Compton

Scénario	Mesures	Localisation/dimensions	Coûts actualisés 50 ans	Efficacité
<b>1. SQ – Statu quo</b>	Enrochement léger	+ 1,5 km d'enrochement, total de 8,4 km	2,0 M\$	Érosion : 100 % Submersion : 0 %
	Programmes d'indemnisation et remboursements	-		
<b>1. STA-DG</b> Stabilisation avec dragage	Enrochement avec végétalisation	+ 1,5 km d'enrochement, total de 8,4 km	6,545 M\$	Érosion : 100 % Submersion : <5 % Dommages agricoles : 42 %
	Dragage	3 bancs d'accumulations dans le chenal (6700 m <sup>3</sup> )		
<b>2. STA-ACC</b> Stabilisation avec rétention acceptable	Enrochement avec végétalisation	+ 1,5 km d'enrochement, total de 8,4 km	23,015 M\$	Érosion : 100 % Submersion : 5 à 10 % Dommages agricoles : 44 %
	Bassins de rétention en milieu agricole désignés acceptables	7 bassins de 5 000 m <sup>3</sup> (35 000 m <sup>3</sup> )		
	Restauration de milieux humides désignés acceptables	6,5 ha restauration 20,1 ha conservation		
<b>3. STA-EFF</b> Stabilisation avec bassin surdimensionné	Enrochement avec végétalisation	+ 1,5 km d'enrochement, total de 8,4 km	32,750 M\$	Érosion : 100 % Submersion : <5 % Dommages agricoles : 20 %
	Bassin de rétention	Terrain vacant riverain à l'entrée de la zone d'étude (39 500 m <sup>3</sup> )		
<b>4. MOB-EFF</b> Mobilité efficace	Interdiction d'usage dans toute la plaine inondable (avec compensation)	Toute la plaine inondable (398 ha)	7,758 M\$	Érosion : 0 % Submersion : 0 % Dommages agricoles : 100 %
<b>5. MOB-HYB</b> Mobilité avec corridor multialéa et usage durable	Modification des droits d'usage dans la zone multialéa	Zone multialéa (M50) (185 ha)	3,472 M\$	Érosion : 0 % Submersion : 0 % Dommages agricoles : 70 %
	Restriction des types de cultures (avec compensation)	Toute la plaine inondable (225 ha)		
<b>6. PRA</b> Adaptation des pratiques agricoles	Stabilisation de berges	+ 1,5 km d'enrochement, total de 8,4 km	2,934 M\$	Érosion : 0 % Submersion : 5 à 10 % Dommages agricoles : 42 %
	Aménagements hydro-agricoles de rétention + règlementation des pratiques de culture sur résidus	Tout le secteur agricole à l'étude hors zone inondable (430 unités sur 4812 ha)		
<b>7. MOB-HYB + PRA</b> Combinaison de MOB-HYB et PRA	Modification des droits d'usage dans la zone de mobilité 50 ans	Zone multialéa (M50) (185 ha)	6,406 M\$	Érosion : 0 % Submersion : 5 à 10 % Dommages agricoles : 70 %
	Restriction des types de cultures (avec compensation)	Toute la plaine inondable (225 ha)		
	Aménagements hydro-agricoles de rétention et règlementation des pratiques de culture sur résidus	Tout le secteur agricole à l'étude hors zone inondable (430 unités sur 4812 ha)		

**Tableau B.3.**

« Recette » des scénarios d'adaptation, étude de cas du bassin versant de la rivière Chaudière

Scénario	Mesures	Localisation/dimensions	Coûts des mesures actualisés 50 ans	Efficacité (% des coûts du SQ)
<b>SQ :</b> Scénario de référence, statu quo	Programmes d'indemnisation et remboursements	Jusqu'à 535 résidences et 1350 hectares agricoles inondées	39,338 à 44,393 M\$ (coûts de la submersion)	-
	Démolition de lots	667 lots		
<b>1. MHH-ACC :</b> Milieux humides et hydriques acceptables	SQ +			-0,5 %
	Destruction/ Restauration de MHH	5,5 / 5,5 km <sup>2</sup>		
	Verdissement des lots	0,2 km <sup>2</sup>	0,335 M\$	
<b>2. MHH-EFF :</b> Milieux humides et hydriques efficaces	Bandes riveraines	63,0 km <sup>2</sup>	74,062 M\$	0,71 %
	Corridor inondable - Réaménagement des milieux urbains	1028 lots démolis 8,2 km <sup>2</sup> d'espaces vert	304,034 M\$	
	- Restriction aux cultures fourragères	770 ha	2,414 M\$	
	- Restauration des MHH	27,4 km <sup>2</sup>	83,522 M\$	
<b>3. IMM-COLL :</b> Immunitisation collective	Digues	Sainte-Marie, Beauceville, Saint-Joseph, Scott Junction, Vallée-Jonction, Saint-Georges, Notre-Dame-des-Pins	197,783 M\$	90 %
<b>4. MHH-acc + IMM-ind :</b> MHH acceptables et immunitisation individuelle	MHH-acc +		0,335 M\$	44 %
	Retrait des actifs aux sous-sols résidentiels	108 résidences	-	
	Relocalisations résidentielles	75 résidences	8,217 M\$	
	Élévation des commerces	12 commerces	0,659 M\$	
<b>5. MHH-dis + IMM-ind:</b> MHH distribués et immunitisation individuelle	SQ +			44 %
	Destruction/ Restauration de MHH	5,5 / 5,5 km <sup>2</sup>	-	
	Bandes riveraines	0,2 km <sup>2</sup>	0,287 M\$	
	Retrait des actifs aux sous-sols résidentiels	108 résidences	-	
	Relocalisations résidentielles	75 résidences	8,217 M\$	
	Élévation des commerces	12 commerces	0,659 M\$	



## ANNEXE C – COMPLÉMENTS AU CHAPITRE 6 : RÉALISATION DES ANALYSES COÛTS-AVANTAGES

**Tableau C.1.** Pondération des postes d'impact, selon les acteurs, pour l'analyse de redistribution

<b>Analyse de redistribution entre les acteurs (% des coûts ou avantages assumés par chacun)</b>					
<b>Coûts/ avantages</b>	<b>Société</b>	<b>Agriculteurs assurés</b>	<b>Agriculteurs non assurés</b>	<b>Sinistrés</b>	<b>Municipalité</b>
<b>Coûts liés à l'érosion des berges</b>					
<b>Perte terres agricoles</b>	70%	30%		0%	0%
<b>Pertes de terrains autres</b>	0%	0%	0%	0%	100%
<b>Coûts liés à la submersion</b>					
<b>Agriculteurs</b>					
<b>Dompage aux cultures</b>	45%	13%	42%	0%	0%
<b>Nettoyage des débris</b>	75%	25%		0%	0%
<b>Résidents</b>					
<b>Dompage aux résidences (structure et contenu)</b>	90%	0%	0%	10%	0%
<b>Assistance MSP (évacuation, vêtement, déplacement mob.)</b>	100%	0%	0%	0%	0%
<b>Dépenses complémentaires</b>	0%	0%	0%	100%	0%
<b>Soins de santé</b>	100%	0%	0%	0%	0%
<b>Perte de productivité</b>	0%	0%	0%	100%	0%
<b>Qualité de vie</b>	0%	0%	0%	100%	0%
<b>Municipalité</b>					
<b>Nettoyage des débris par la municipalité</b>	0%	0%	0%	0%	100%
<b>Économie</b>					
<b>Perte de productivité due à la fermeture de routes</b>	100%	0%	0%	0%	0%
<b>Dompages aux bâtiments institutionnels</b>	100%	0%	0%	0%	0%

<b>Services écosystémiques</b>					
<b>Séquestration du carbone</b>	100%	0%	0%	0%	0%
<b>Azote</b>	100%	0%	0%	0%	0%
<b>Phosphore</b>	100%	0%	0%	0%	0%
<b>Rétention sédiment</b>	100%	0%	0%	0%	0%
<b>Habitats fauniques</b>	100%	0%	0%	0%	0%
<b>Coûts des mesures – Réalisation et entretien</b>					
<b>Dragage</b>	100%	0%	0%	0%	0%
<b>Enrochements - agricole</b>	70%	30%		0%	0%
<b>Enrochements - autres</b>	0%	0%	0%	0%	100%
<b>Bassin de rétention</b>	0%	0%	0%	0%	100%
<b>Ouvrages hydro-agricoles</b>	0%	100%		0%	0%
<b>Bandes riveraines - agricoles</b>	75%	25%		0%	0%
<b>Bandes riveraines - autres</b>	75%	0%	0%	25%	0%
<b>Digues</b>	50%	0%	0%	0%	50%
<b>Restauration de MHH</b>	100%	0%	0%	0%	0%
<b>Relocalisation – nouvelles propriétés</b>	90%	0%	0%	10%	0%
<b>Relocalisation : démolition des lots</b>	90%	0%	0%	10%	0%
<b>Verdissement des lots</b>	0%	0%	0%	0%	100%
<b>Élévation des commerces</b>	75%	0%	0%	25%	0%
<b>Coûts des mesures – Coût d'opportunité</b>					
<b>Usages agricoles</b>	0%	100%		0%	0%
<b>Usages résidentiels ou commerciaux</b>	0%	0%	0%	100%	0%
<b>Usages municipaux</b>	0%	0%	0%	0%	100%
<b>Usages institutionnels</b>	100%	0%	0%	0%	0%

# ANNEXE D – APPROCHE ACTUARIELLE APPLIQUÉE AU CALCUL DES DOMMAGES STRUCTURELS AUX RÉSIDENCES, ÉTUDE DE CAS DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE CHAUDIÈRE

## RÉDACTION

- Adèle Danielle N'cho, étudiante à la maîtrise en mathématiques concentration maths actuarielles et financières, UQAM

## SUPERVISION

- Mathieu Boudreault, Professeur-chercheur, Département de mathématiques, UQAM
- Ursule Boyer-Villemaire, Cheffe d'équipe analyse / Gestionnaire de projet Résilience, gestion de risques et inondations, Ouranos, professeure associée, Département de géographie, UQAM
- Annabelle Lamy, Économiste, Ouranos.

## Motivation

L'approche classique<sup>8</sup> consiste à déterminer le dommage annuel moyen en tenant compte de l'incertitude liée à la sévérité des inondations selon les probabilités d'occurrence. On obtient ainsi des flux financiers annuels stables permettant de calculer des indicateurs économiques tels que la VAN, le ratio coût-avantage ainsi que les dommages totaux cumulés dans le scénario « moyen ». Par contre, la méthode classique ne tient pas compte de la fréquence d'occurrence des inondations sur l'horizon d'étude, ainsi les dommages et les indicateurs économiques pourraient être très largement supérieurs au scénario « moyen ». Afin de renforcer la robustesse de la prise de décision en contexte de gestion des extrêmes pouvant engendrer des dommages catastrophiques, l'approche actuarielle permettrait de tenir compte de la variabilité des dommages due à la fréquence des inondations.

Conséquemment, nous proposons une approche actuarielle fréquence-sévérité<sup>9</sup> basée sur la simulation de scénarios d'occurrence d'inondations sur un horizon de 50 ans (2020-2070) qui tient compte des changements climatiques. Cette méthode prend en compte de l'incertitude liée à la fréquence des inondations sur l'horizon choisi, et pour une année donnée de la variabilité de la sévérité des dommages liée à la récurrence de l'inondation qui pourrait survenir. Elle permet d'estimer la

---

<sup>8</sup> Penning-Rowsell, E.C., Priest, S., Parker, D., Morris, J., Tunstall, S. Viavattene, C., Chatterton, J.B., and Owen, D. (2013) Flood and Coastal Erosion Risk Management: A Manual for Economic Appraisal. London: Routledge.

<sup>9</sup> Boudreault, M., & Bourdeau-Brien, M. (2020). Limite à vie sur les inondations successives: vers un nouveau pacte social?. Assurances et gestion des risques/Insurance and Risk Management, 87(1-2), 1-32.

distribution complète des dommages c'est-à-dire une estimation de tous les scénarios possibles et leurs probabilités. Ainsi, nous obtenons un portrait plus détaillé des dommages liés au risque d'inondation. La distribution obtenue permet non seulement de calculer les indicateurs économiques susmentionnés, mais aussi de faire des évaluations plus approfondies telles que des analyses de scénarios et l'évaluation de la rentabilité de programmes de gestion du risque.

## **Méthodologie**

La méthode consiste d'abord à combiner les informations sur la vulnérabilité des propriétés, c'est-à-dire la valeur, le nombre d'étages, le type de sous-sol et leurs géolocalisations aux cartes de profondeurs d'inondations pour différentes récurrences et différents scénarios de concentration de gaz à effet de serre (Representative Concentration Pathways – RCP) afin de déterminer leurs niveaux de risque anticipés.

Ensuite, nous simulons 100 000 scénarios d'occurrence d'inondations sur une période de 50 ans par la méthode Monte-Carlo. Dans chaque scénario, pour chaque année, nous tirons un nombre aléatoire représentant la récurrence de l'inondation survenue. Nous transformons ces scénarios d'occurrence en scénarios de dommages à partir du niveau de risque anticipé de chaque propriété et des courbes de submersion-dommages pour estimer les dommages directs à la structure des bâtiments résidentiels. Notons que nous faisons l'hypothèse que les propriétés sont réparées après chaque inondation de sorte que leurs valeurs demeurent constantes durant toutes les 50 années.

La méthode fréquence-sévérité a été appliquée à l'étude de cas du bassin de la rivière Chaudière. Les informations sur les bâtiments proviennent du rôle d'évaluation fourni par le COBARIC. Les cartes d'inondations ont été fournies par Ouranos. Elles découlent des travaux de la méthode géostatistique d'estimation des niveaux d'eau. Nous avons utilisé les courbes de submersion-dommages de Bonnifait (2005) afin de convertir les niveaux d'eau en montants de dommages. L'utilisation de ces courbes nécessite l'information sur les caractéristiques des sous-sols des bâtiments. Cette information n'étant pas disponible, nous avons décidé aléatoirement si un bâtiment était sans sous-sol ou avait un sous-sol fini ou non. Toutefois, les maisons mobiles ont été considérées sans sous-sol.

Nous obtenons ainsi pour chaque scénario de concentration de gaz à effet de serre et pour chaque horizon, les tableaux suivants, présentant les dommages totaux annuels à la structure des bâtiments résidentiels en fonction de la récurrence et du percentile du débit.

**Tableau D.23** Dommages annuels pour les abords de la rivière Chaudière et leurs probabilités selon la récurrence et le percentile du débit, horizon 1, RCP 4.5

Récurrence	Dommages annuels (\$CAN 2019)			Probabilité
	10ème percentile	Médiane	90ème percentile	
Pas d'inondation	-	-	-	50%
2 ans	-	-	31 435	30%
5 ans	281 957	512 005	743 233	10%
10 ans	774 347	1 204 656	1 861 590	5%
20 ans	1 372 995	2 061 901	4 863 176	3%
50 ans	2 837 924	4 862 887	11 617 644	1%
100 ans	5 140 472	8 047 728	19 819 935	0,7%
350 ans	10 983 223	16 174 016	38 656 798	0,3%

**Tableau D.24** Dommages annuels pour les abords de la rivière Chaudière et leurs probabilités selon la récurrence et le percentile du débit, horizon 2, RCP 4.5

Récurrence	Dommages annuels (\$CAN 2019)			Probabilité
	10ème percentile	Médiane	90ème percentile	
Pas d'inondation	-	-	-	50%
2 ans	-	-	44 095	30%
5 ans	226 286	391 803	700 337	10%
10 ans	697 803	1 222 832	2 022 441	5%
20 ans	1 305 687	2 380 635	4 936 106	3%
50 ans	2 136 698	6 929 435	10 935 317	1%
100 ans	4 911 042	11 544 836	18 048 929	0,7%
350 ans	10 576 903	23 558 515	35 309 502	0,3%

**Tableau D.25** Dommages annuels pour les abords de la rivière Chaudière et leurs probabilités selon la récurrence et le percentile du débit, horizon 1, RCP 8.5

Récurrence	Dommages annuels (\$CAN 2019)			Probabilité
	10ème percentile	Médiane	90ème percentile	
<b>Pas d'inondation</b>	-	-	-	50%
<b>2 ans</b>	29 676	45 220	60 090	30%
<b>5 ans</b>	485 881	730 219	993 752	10%
<b>10 ans</b>	1 015 607	1 579 363	2 105 256	5%
<b>20 ans</b>	1 777 277	2 929 199	4 958 699	3%
<b>50 ans</b>	3 750 551	6 852 113	10 591 966	1%
<b>100 ans</b>	6 279 886	10 821 518	16 678 174	0,7%
<b>350 ans</b>	11 871 557	20 698 033	31 175 509	0,3%

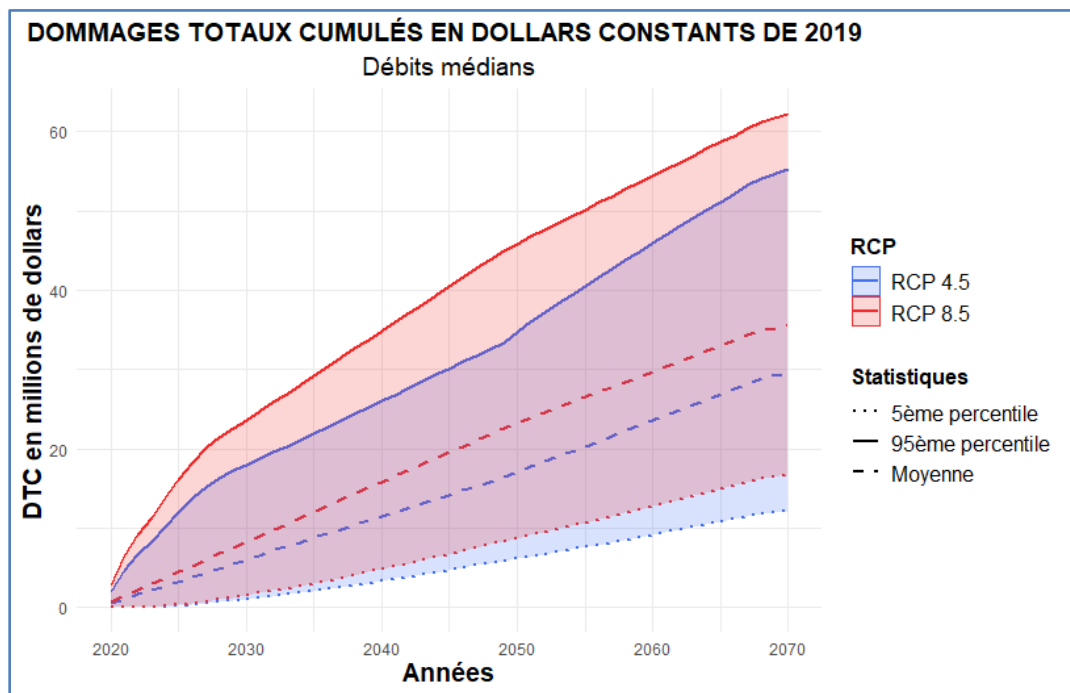
**Tableau D.26** Dommages annuels pour les abords de la rivière Chaudière et leurs probabilités selon la récurrence et le percentile du débit, horizon 2, RCP 8.5

Récurrence	Dommages annuels (\$CAN 2019)			Probabilité
	10ème percentile	Médiane	90ème percentile	
<b>Pas d'inondation</b>	-	-	-	50%
<b>2 ans</b>	-	37 653	123 706	30%
<b>5 ans</b>	331 837	694 539	1 124 206	10%
<b>10 ans</b>	760 663	1 385 343	2 334 620	5%
<b>20 ans</b>	1 306 229	2 354 633	5 616 551	3%
<b>50 ans</b>	2 247 669	5 699 789	12 013 811	1%
<b>100 ans</b>	3 865 068	9 123 593	19 015 231	0,7%
<b>350 ans</b>	8 082 902	17 875 997	34 981 519	0,3%

## Résultats

Dans le cadre de l'étude de cas de la rivière Chaudière, nous avons estimé les distributions de dommages pour les scénarios de concentration de gaz à effet de serre RCP 4.5 et RCP 8.5 et trois percentiles de débit (10<sup>ième</sup> percentile, médiane et 90<sup>ième</sup> percentile) parmi les 10 scénarios de changements climatiques utilisés. Ces distributions nous ont permis d'estimer pour chaque couple RCP et percentile de débit :

- La distribution des dommages totaux cumulés sur 50 ans ainsi que sa moyenne;
- La distribution de la valeur actuelle nette et sa moyenne;

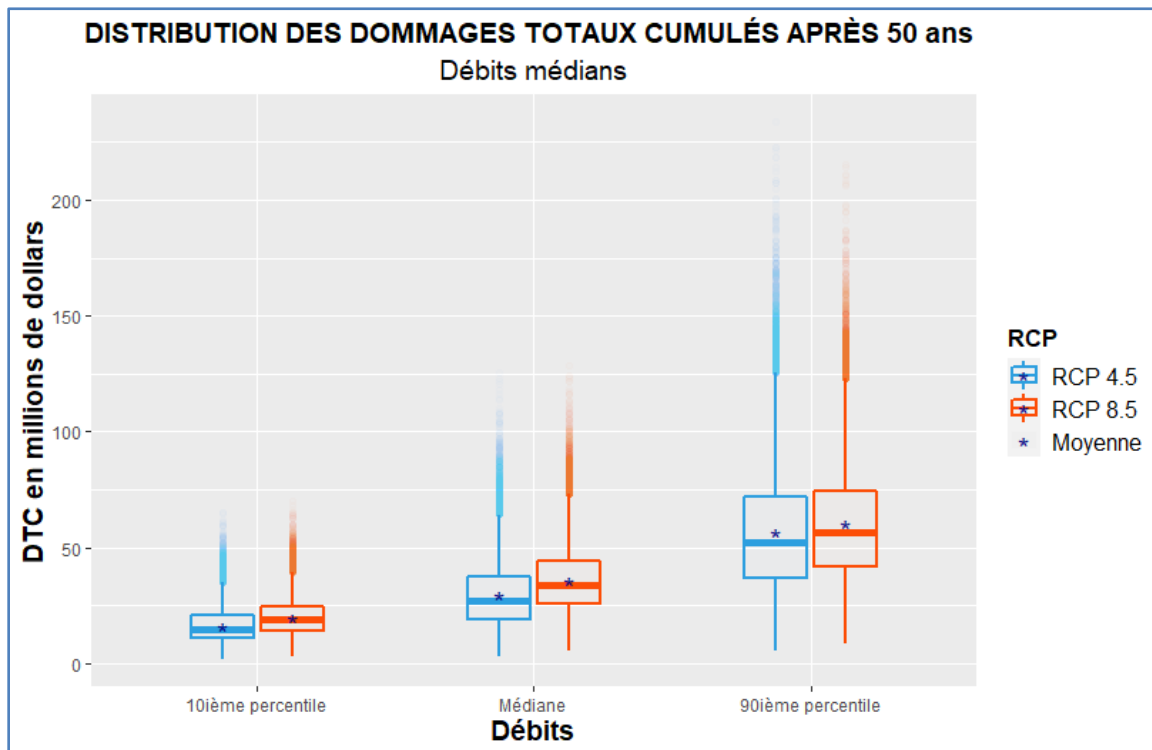


**Figure D.14** Distribution (moyenne, 5<sup>ème</sup> et 95<sup>ème</sup> percentile) des dommages totaux cumulés selon les scénarios de concentration des gaz à effet de serre

La **Figure D.1** présente la distribution des dommages totaux cumulés sur 50 ans pour les deux scénarios de concentration de gaz à effet de serre lorsqu'on utilise le débit médian. On remarque que les dommages cumulés peuvent être largement supérieurs aux dommages moyens avec une probabilité qui augmente en fonction du temps. Par exemple, les dommages totaux cumulés après 50 ans peuvent atteindre le double de la valeur moyenne et on estime à environ 44% la probabilité qu'ils dépassent cette moyenne, indépendamment du scénario de concentration de gaz à effet de serre. Il est donc nécessaire de prendre des décisions de gestion du risque d'inondation qui ne sont pas uniquement basées sur la moyenne mais qui

tiennent compte de la distribution complète des dommages. Aussi, l'augmentation des concentrations de GES (RCP 8.5) entraînent une augmentation des dommages totaux cumulés.

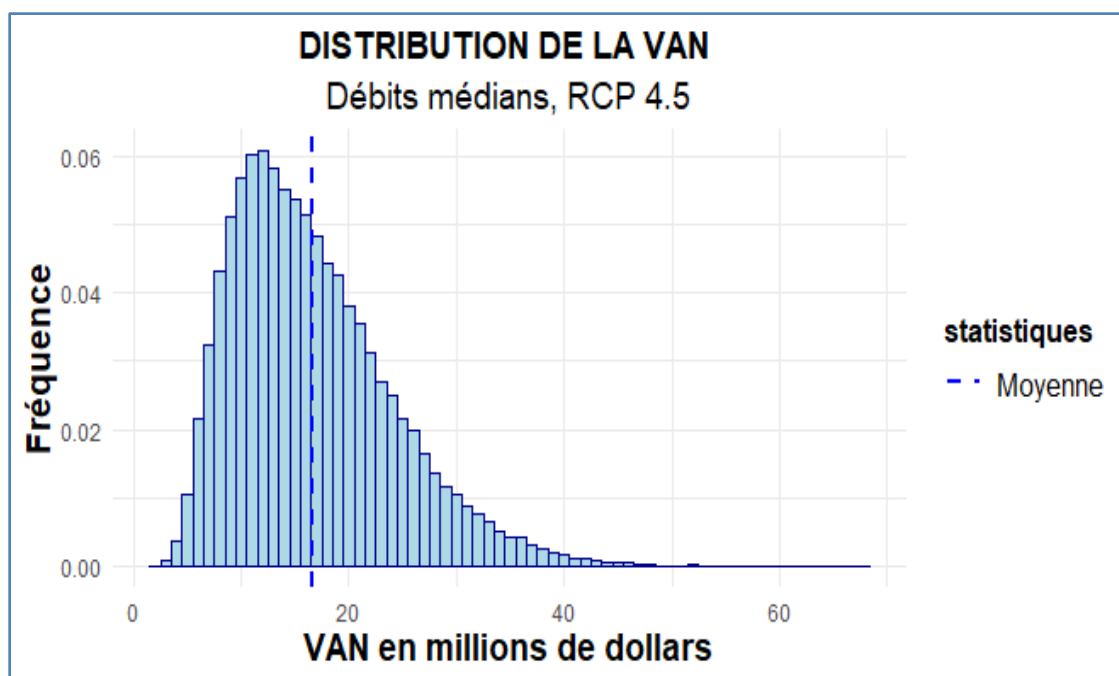
Nous avons testé la sensibilité des dommages totaux cumulés au percentile de débits utilisé. La **Figure D.2** présente les dommages totaux cumulés après 50 ans pour chacun des percentiles du débit. Il montre que le percentile utilisé et donc le choix du modèle climatique influence fortement la distribution des dommages totaux cumulés. Ainsi la principale source de variabilité des dommages ne provient pas du scénario de concentration de gaz à effet de serre, mais plutôt du choix du modèle climatique. On remarque également que le spectre des dommages cumulatifs possibles après 50 ans est assez large avec des extrêmes qui peuvent être catastrophiques. Il est donc primordial de mettre en place des mesures qui permettront de réduire le nombre de bâtiments à risque dans la zone inondable ou de rendre ces bâtiments plus résilients aux inondations, et ce peu importe le scénario de concentration de gaz à effet de serre.



**Figure D.15** Distribution des dommages totaux cumulés après 50 ans selon le percentile du débit



L'objectif d'une analyse coût-avantages est de comparer les coûts de mise en place des mesures de protection à la valeur actualisée des dommages. Il est donc important de déterminer la distribution de la valeur actualisée des dommages. La **Figure D.3** présente cette distribution pour le scénario RCP 4.5 si on utilise le débit médian. Nous avons utilisé un taux de 4 % pour actualiser les flux financiers de 2020 à 2040 et un taux de 2 % de 2041 à 2070. On obtient une valeur actualisée moyenne d'environ 16,65 millions de dollars comparativement à la VAN de 13,85 millions obtenues dans l'ACA avec l'estimation des dommages annuels moyens par la méthode des trapèzes\*. On estime une probabilité d'environ 43 % que la valeur actualisée des dommages totaux dépasse la valeur moyenne et 57 % qu'elle dépasse 13,85 millions de dollars obtenus dans l'ACA.



**Figure D.16** Distribution de la valeur actualisée des dommages totaux, RCP4.5, débit médian

\* La méthode d'estimation des niveaux d'eau a permis de générer des cartes d'inondations pour 7 récurrences. Nous avons extrapolé des événements entre les récurrences fournies. Il existe plusieurs méthodes d'extrapolation qui peuvent donner des résultats différents, d'où l'écart entre les VAN moyennes de l'approche du DAM et l'approche actuarielle.

## Limites

Les résultats de la méthode dépendent de la précision des cartes de profondeurs d'inondation et des courbes de dommages utilisées. Les courbes de dommages de Bonnifait (2005) ont été élaborées à partir de peu de données depuis une quinzaine d'années. Il est important de les mettre à jour et de les adapter au contexte actuel. De plus, l'évaluation municipale a été utilisée comme valeur des propriétés, ce qui pourrait entraîner une sous-estimation des dommages puisque cette valeur sous-estime en général la valeur marchande des propriétés.

## Perspectives et projets de recherche

L'approche actuarielle pourrait éclairer les acteurs à prendre des décisions qui tiennent compte des scénarios extrêmes afin de mieux se préparer aux événements rares ayant des graves conséquences lorsqu'on se trouve à une échelle plus locale.

La méthodologie et les résultats présentés dans cette annexe constituent la première partie des travaux réalisés dans le cadre du projet de maîtrise qui visera à concevoir des programmes de réduction du risque et à estimer leur rentabilité. Aussi, un autre objectif de recherche sera d'intégrer l'aversion au risque au modèle afin d'estimer les taux d'adhésion des propriétaires de bâtiments résidentiels à ces programmes.

### Faits saillants

- L'approche actuarielle donne une distribution des dommages dans tous les scénarios d'inondations possibles afin d'avoir un portrait plus détaillé du risque d'inondation.
- En tenant compte de la fréquence des inondations, il y a une grande probabilité (57 %) que les dommages réalisés dépassent les dommages moyens calculés dans l'ACA (13,85 M\$), d'où la nécessité de tenir compte des scénarios extrêmes pouvant générer des dommages très élevés dans la prise de décision.

## Remerciements

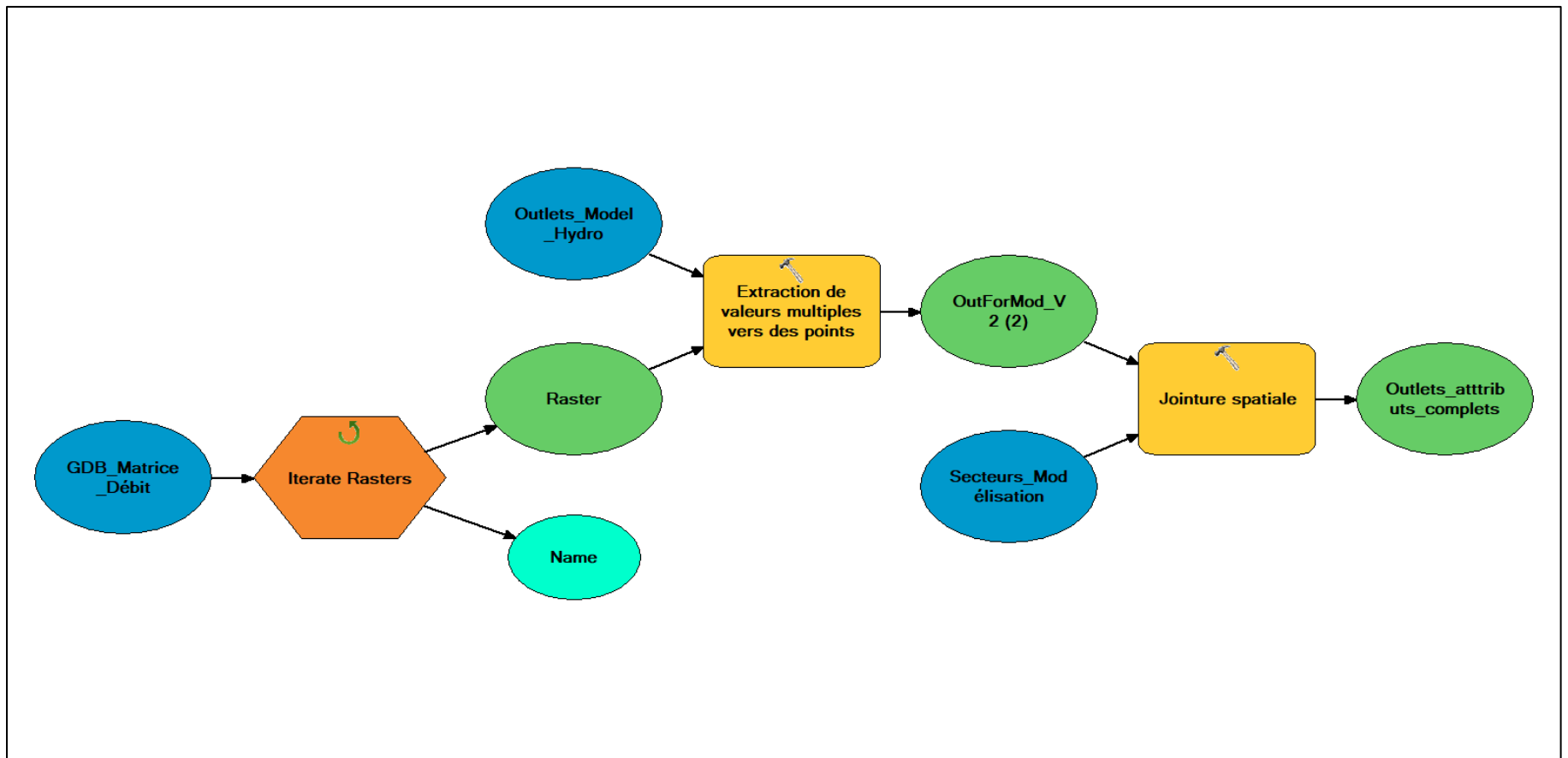
Cette contribution constitue la première partie d'un projet de recherche financé grâce à un partenariat entre le consortium Ouranos et l'UQAM dans le cadre du programme Mitacs Accélération.

## Références

**BOUDREAU, M., & BOURDEAU-BRIEN, M.** (2020). LIMITE À VIE SUR LES INONDATIONS SUCCESSIVES: VERS UN NOUVEAU PACTE SOCIAL? *ASSURANCES ET GESTION DES RISQUES/INSURANCE AND RISK MANAGEMENT*, 87(1-2), 1-32.

**BONNIFAIT, L.** (2005). *DÉVELOPPEMENT DE COURBES SUBMERSION-DOMMAGES POUR L'HABITAT RÉSIDENTIEL QUÉBÉCOIS* (THESIS DISSERTATION, UNIVERSITÉ DU QUÉBEC, INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE).

## ANNEXE E – PROGRAMMES UTILISÉS DANS LA MODÉLISATION DES ALÉAS FUTURS (CHAPITRE 4)



**Figure E.1** Première étape de la modélisation des aléas futurs : ExtrRastoPt\_Iter

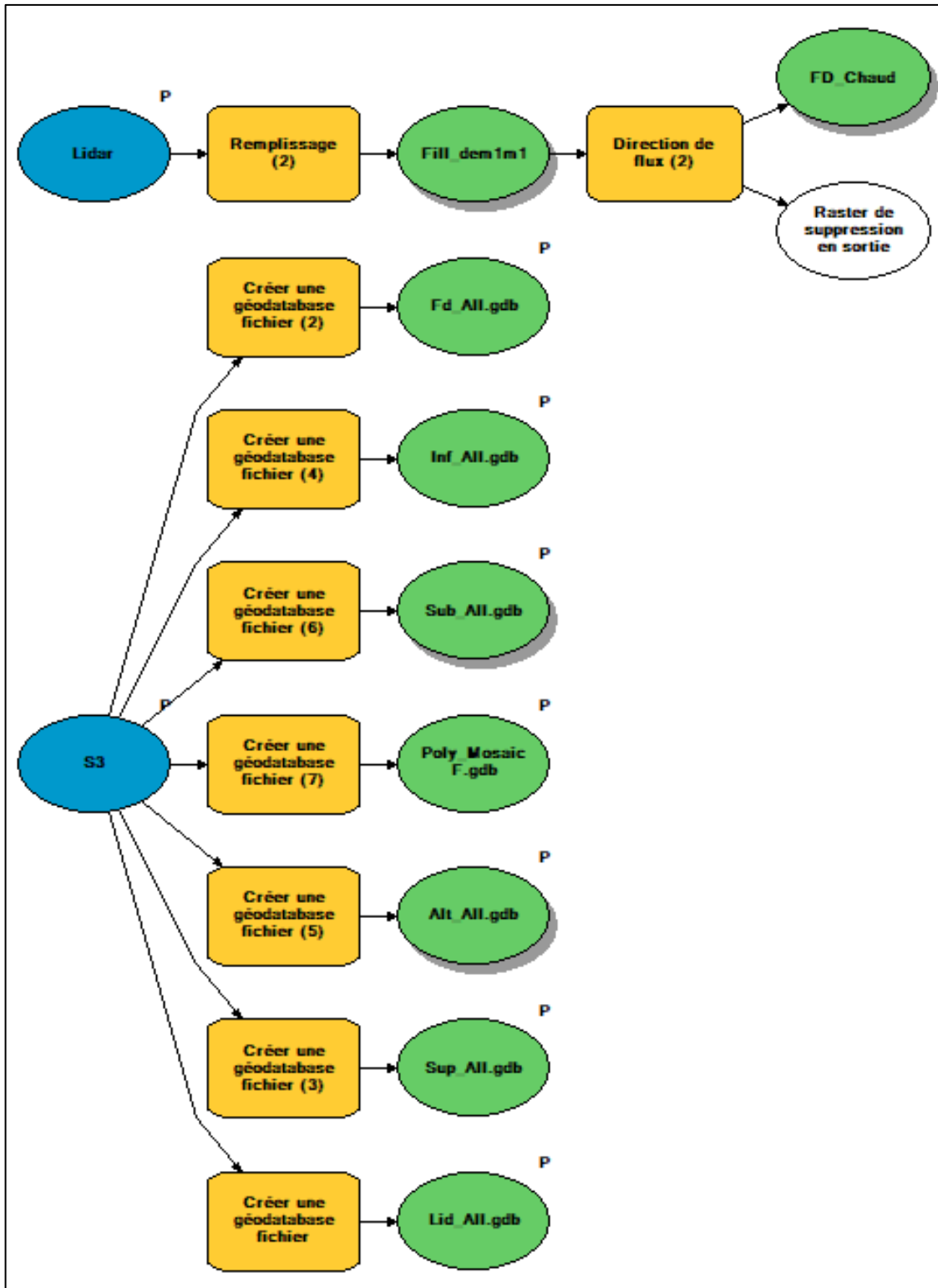
## Deuxième étape de la modélisation des aléas futurs (script Python) :

```
import pandas as pd
df = pd.read_excel(r'C:\Users\client\Desktop\CSV_S3\csv_complet_S3.xlsx')

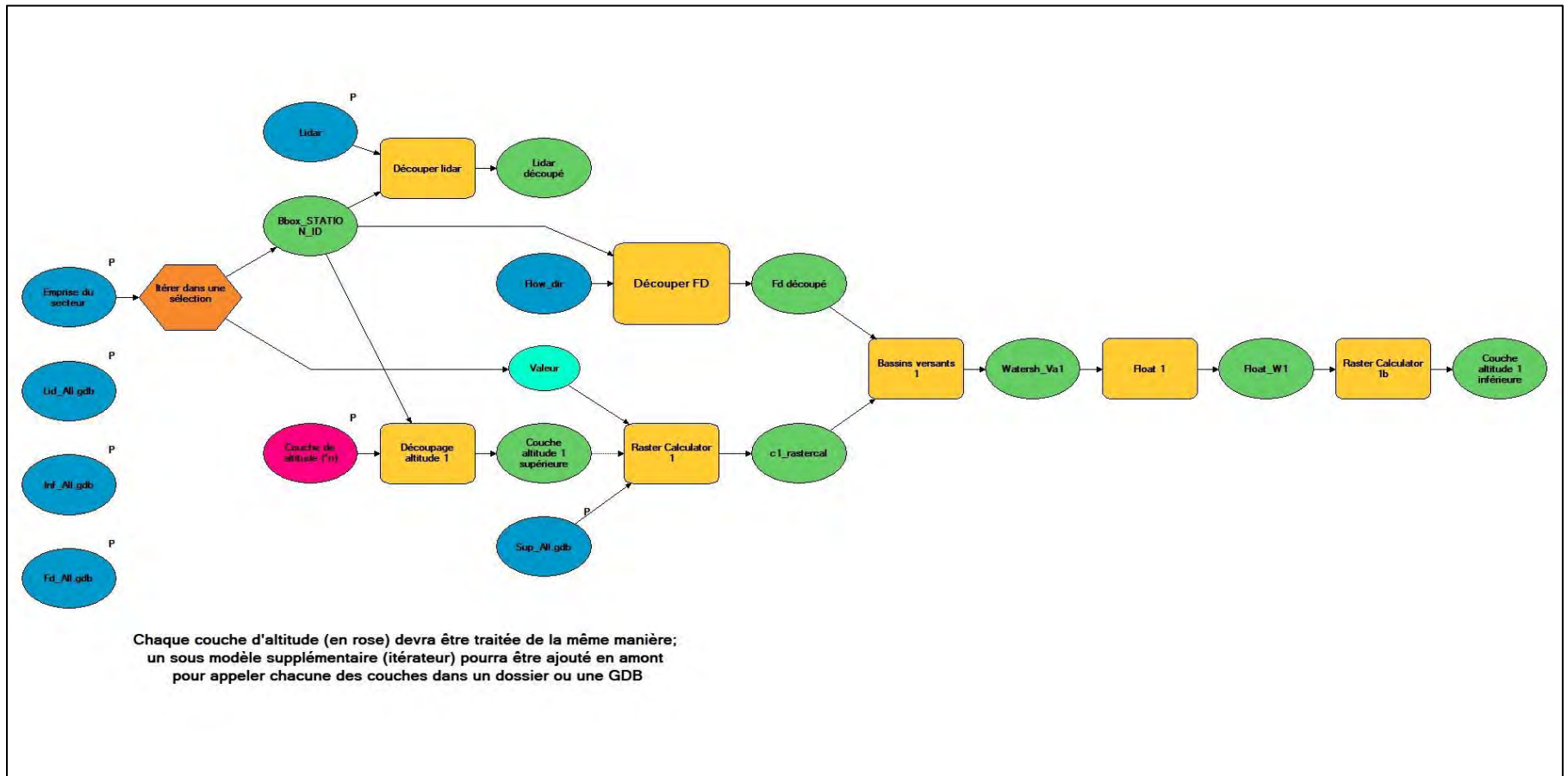
#save first column
index = df.iloc[:,0]
index.name = 'Sim'

#loop over remaining columns in blocks of 9
for i in range(1, len(df.columns), 9):
    cols = df.iloc[0, i:i+9]
    df2 = df.iloc[:,i:i+9].rename(columns=cols)

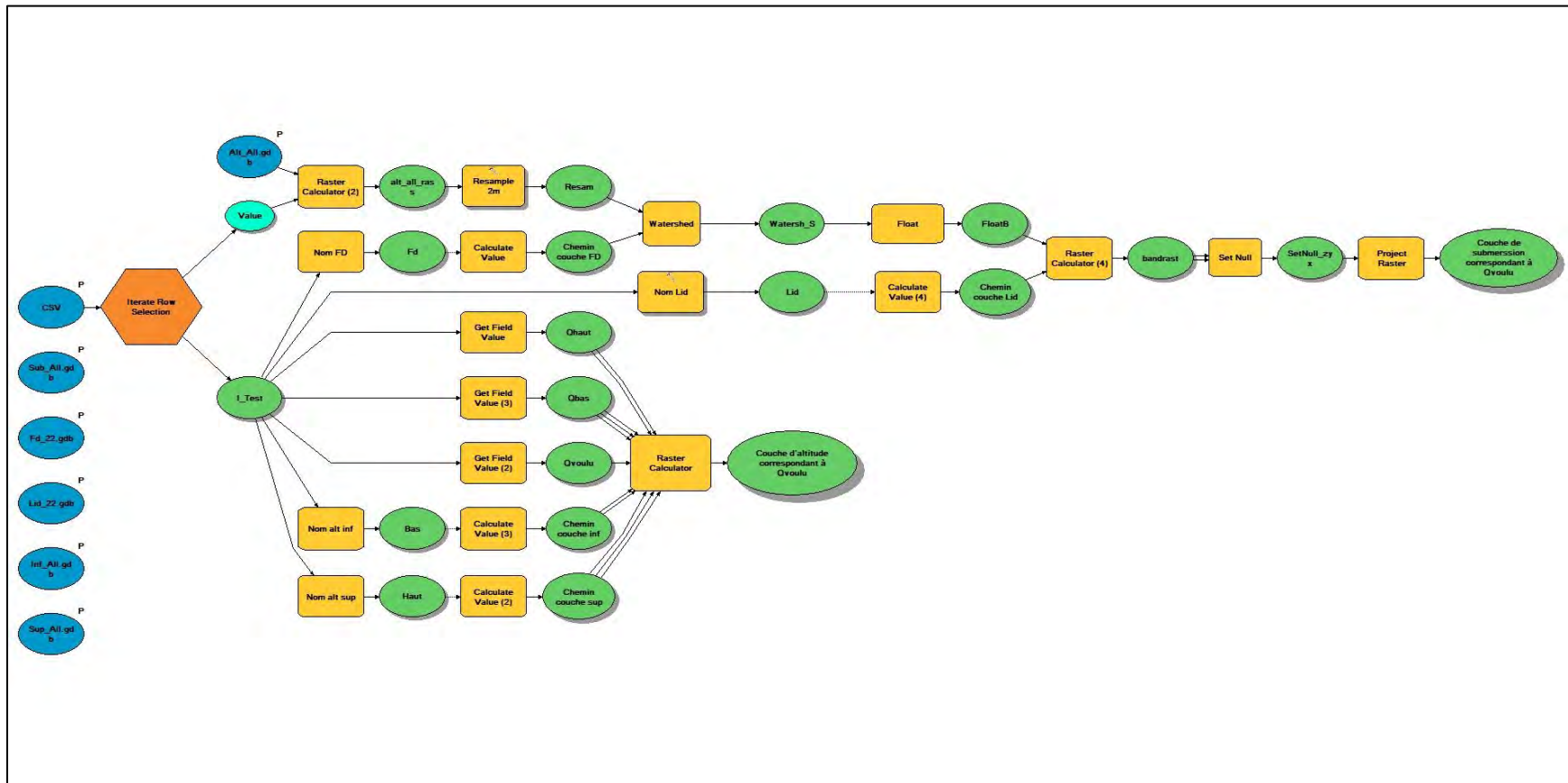
    df2.index = index
    outfile = r'C:\Users\client\Desktop\CSV_S3\subbasin_{}.csv'.format(cols.index[0])
    print(outfile)
    df2.to_csv(outfile)
```



**Figure E.2** Troisième étape de la modélisation des aléas futurs : CreationGDB\_V2



**Figure E.3** Quatrième étape de la modélisation des aléas futurs : Clipraster\_mask



**Figure E.4** Cinquième étape de la modélisation des aléas futurs : Qcv\_AltSub



## Sixième étape de la modélisation des aléas futurs (Script Python) :

```
import arcpy
import multiprocessing as mp
from arcpy.sa import *
from os import path

arcpy.CheckOutExtension("Spatial")
arcpy.env.overwriteOutput = True
arcpy.env.extent = "MINOF"

# depuis couches sub model builder 3
arcpy.env.workspace = "C:\Users\robvq\Desktop\Production\GDB_Sortie\S3\Sub_All.gdb"
Dossier = "C:\Users\robvq\Desktop\Production\GDB_Sortie\S3"

# Liste des matrices a mosaiquer
Liste_S = arcpy.ListRasters("*S*", "GRID")
Liste_S.sort()
print Liste_S

# create mosaic of all grids with same filename prefix (e.g. 'S1' etc)
subsets = sorted(list(set([l.split('_')[0] for l in Liste_S])))
if path.exists(path.join(Dossier, "Mosaics_P1" + ".gdb")):
    arcpy.Delete_management(path.join(Dossier, "Mosaics_P1" + ".gdb"))
arcpy.CreateFileGDB_management(Dossier, "Mosaics_P1" + ".gdb")
for s in subsets:
    Liste_Sc1 = arcpy.ListRasters("*" + s + "_*", "GRID")
    Liste_Sc1.sort()
    print Liste_Sc1
```

```

Sc2
arcpy.MosaicToNewRaster_management(Liste_Sc1,path.join(Dossier,
"Mosaics_P1" + ".gdb"), s, "", "" "32_BIT_FLOAT", "2", "1", "MEAN", "")

#get list of mosaic
arcpy.env.workspace = path.join(Dossier, "Mosaics_P1" + ".gdb")
Liste_Mo = arcpy.ListRasters("*S*", "GRID")
Liste_Mo.sort()
print Liste_Mo

Nom_GDB = "Mosaics_Full"

# Fusionner mosaics avec chenal mak22
arcpy.CreateFileGDB_management(Dossier, Nom_GDB + ".gdb")

for S in Liste_Mo:
    print arcpy.env.workspace + "\\\" + str(S)
    arcpy.MosaicToNewRaster_management([S,
r"C:\Users\robvq\Desktop\Production\GDB_Sortie\new_mask2"],
path.join(Dossier, Nom_GDB + ".gdb"), S, "", "32_BIT_FLOAT", "2", "1",
"FIRST", "")

# Nettoyer mosaics
arcpy.env.workspace
r"C:\Users\robvq\Desktop\Production\GDB_Sortie\S3\Mosaics_Full.gdb"
Chemin = arcpy.env.workspace
Matrice_ZI = Chemin + "\\\" + "S1"
Nom_GDB2 = "Mosaics_Corr"

arcpy.env.snapRaster = Matrice_ZI
arcpy.env.extent = Matrice_ZI

```

*Superficie = 500*

*Resolution = 2*

*# Liste des matrices ZI a traiter*

*Liste\_M = arcpy.ListRasters("\*S\*", "GRID")*

*Liste\_M.sort()*

*print Liste\_M*

*arcpy.CreateFileGDB\_management(Dossier, Nom\_GDB2 + ".gdb")*

*arcpy.env.workspace = Dossier + "\\\" + Nom\_GDB2 + ".gdb"*

*# Iteration et correction des matrices ZI*

*for S in Liste\_M:*

*expression = "Shape\_Area > " + str(Superficie)*

*expression2 = "Shape\_Area <= " + str(Superficie)*

*print arcpy.env.workspace + "\\\" + str(S)*

*Domaine\_Matrice = LessThan(Chemin + "\\\" + S, 9999)*

*Domaine\_Matrice.save("Domaine\_initial")*

*arcpy.RasterToPolygon\_conversion(Domaine\_Matrice, "Domaine\_Temp",  
"NO\_SIMPLIFY","VALUE")*

*Domaine\_Poly\_2\_lyr =  
arcpy.MakeFeatureLayer\_management("Domaine\_Temp",  
"Domaine\_Poly\_2\_lyr")*

*arcpy.SelectLayerByAttribute\_management(Domaine\_Poly\_2\_lyr,  
"NEW\_SELECTION", expression)*

*Matrice\_Temp = ExtractByMask(Chemin + "\\\" + S, Domaine\_Poly\_2\_lyr)*

```
    arcpy.Union_analysis(Domaine_Poly_2_lyr, "Domaine_Union", "NO_FID", "",
"NO_GAPS")
```

```
    Domaine_Union_lyr =
arcpy.MakeFeatureLayer_management("Domaine_Union",
"Domaine_Union_lyr")
```

```
    arcpy.SelectLayerByAttribute_management(Domaine_Union_lyr,
"NEW_SELECTION", expression2)
```

```
    Nb_Poly = int(str(arcpy.GetCount_management(Domaine_Union_lyr)))
```

```
    if Nb_Poly > 0:
```

```
        arcpy.AddField_management(Domaine_Union_lyr, "Valeur", "DOUBLE")
```

```
        arcpy.CalculateField_management(Domaine_Union_lyr, "Valeur", "0.001",
"PYTHON_9.3")
```

```
        arcpy.PolygonToRaster_conversion(Domaine_Union_lyr, "Valeur", S,
"CELL_CENTER", "", Resolution)
```

```
        arcpy.Mosaic_management(Matrice_Temp, S,"FIRST","FIRST","", "", "", "",
"NONE")
```

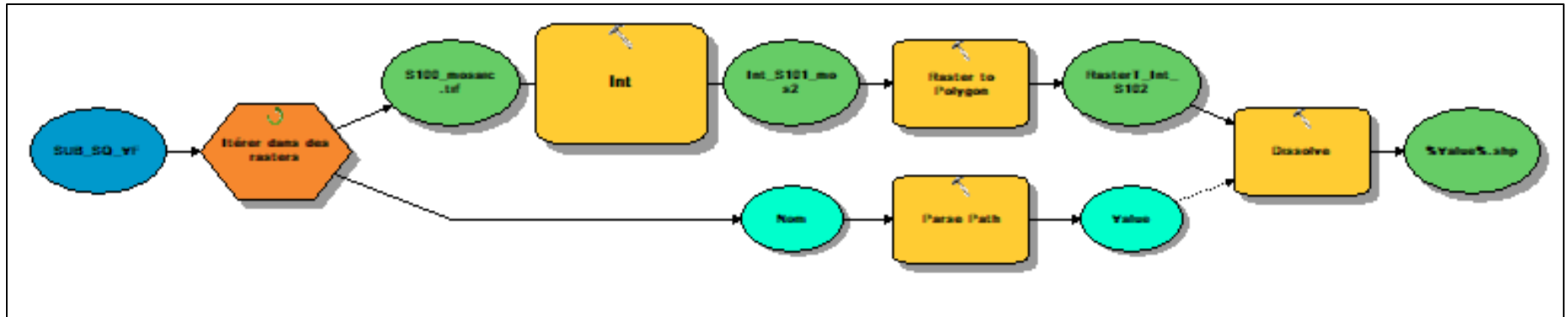
```
    else:
```

```
        Matrice_Temp.save(S)
```

```
arcpy.Delete_management("Domaine_Union")
```

```
arcpy.Delete_management("Domaine_initial")
```

```
arcpy.Delete_management("Domaine_Temp")
```



**Figure E.5** Septième étape de la modélisation des aléas futurs : Raster to MostoP

