







ANALYSE COÛTS-AVANTAGES DES OPTIONS D'ADAPTATION AUX INONDATIONS ET ALÉAS FLUVIAUX DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE CHAUDIÈRE

Rapport final Septembre 2021







ANALYSE COÛTS-AVANTAGES DES OPTIONS D'ADAPTATION AUX INONDATIONS ET ALÉAS FLUVIAUX DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE CHAUDIÈRE

Rapport final 09/2021

DIRECTRICE DE PROJET : Ursule Boyer-Villemaire, Ouranos

ÉQUIPE DE RÉALISATION:

Ursule Boyer-Villemaire, Ouranos

Annabelle Lamy, Ouranos

Raphaël Desjardins, Ouranos

Jérémie Roques, ROBVQ

Dorothy Heinrich, Ouranos

Caroline Simard, Ouranos

Hugo Morin, Ouranos

Scénarios climatiques: Marco Braun, Ouranos

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

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

CRÉDIT PHOTO PAGE COUVERTURE: COBARIC.

CRÉDITS PHOTOS DÉBUTS DE SECTIONS: COBARIC.

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

riveraines

Numéro du projet Ouranos: 510034

Citation suggérée : 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.

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 cette étude, 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 Mohammad Bizhanimanzar et de Robert Leconte en génie civil à l'Université de Sherbrooke, Marc-André Bourgault sur les milieux humides de l'université Laval, Pascale Biron et Guénolé Choné 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 de la zone d'étude. Dans le comité local de suivi, nous tenons à remercier le COBARIC (Véronique Brochu, Yannick Bourque, Marie-Ève Théroux), 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, nous soulignons le taux de participation exemplaire des aménagistes des 8 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.

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 Bisaillon (Ouranos), Pascal Marceau (MSP), Jimmy Duschesneau/Myriam Michel/Steve Hétu (MAMH).

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





Introduction:

Les inondations des dernières années au Québec et notamment la récurrence des inondations aux abords de la Chaudière remettent en cause les usages en zone à risque et mettent en évidence la vulnérabilité de plusieurs communautés. Appuyée par Ressources naturelles Canada, le Gouvernement du Québec et la Fédération Canadienne des municipalités, Ouranos a entrepris le projet de recherche Analyse des coûts-avantages des options d'adaptation aux inondations et aléas fluviaux en contexte de changements climatiques, afin d'outiller les communautés pour prendre des décisions éclairées en matière de gestion des risques d'inondations et liés aux rivières. Ce projet comporte un guide méthodologique (Boyer-Villemaire et al., 2021) et deux études de cas d'analyses coûts-avantages : 1) la rivière Coaticook à Compton (Boyer-Villemaire et al., 2021a) et 2) l'ensemble du bassin versant de la rivière Chaudière. Le présent rapport visait à quantifier les coûts et les avantages de différents scénarios d'adaptation visant à réduire et gérer les risques reliés aux inondations et aléas fluviaux de la rivière Chaudière sur le territoire de son bassin versant et mettre en valeur la contribution potentielle des milieux hydriques et humides.

Méthodologie:

Cette étude fait converger les méthodologies d'analyses coûts-avantages (ACA) réalisées auparavant au Québec et ailleurs, et l'analyse de risque (basée sur ISO 31000), soutenue par un cadre participatif, dans une perspective multialéa. Pour appuyer la prise de décisions complexes, elle s'appuie sur une chaîne de modélisation multidisciplinaire: scénarios climatiques, modélisation hydrologique, géostatistique et hydrogéomorphologique, une évaluation des impacts socio-économiques et une modélisation des services écosystémiques. La zone d'étude s'étend sur tout le territoire du bassin versant de la rivière Chaudière.

Résultats

Malgré les relocalisations déjà effectuées, l'analyse de risque montre une valeur totale des terrains et bâtiments exposés aux inondations en eau libre à 273 805 M\$. Cela représente plus de 2000 personnes sinistrées potentielles. Cet état des enjeux justifie de poursuivre l'acquisition de connaissances sur certains aléas (embâcles, érosion des berges, avulsion, cônes alluviaux). La priorité de réduction de risque se situe dans les foyers urbains, et en zone agricole. Les pratiques actuelles consistent en la poursuite 1) du développement urbain en vertu du plan d'urbanisme de la ville de Lévis, 2) des autorisations de démolitions des lots suite aux inondations du printemps 2019 et 3) de l'approche réglementaire d'indemnisation des dommages liés à la submersion.

Les résultats de l'ACA indiquent clairement que les deux scénarios les plus avantageux économiquement pour l'ensemble de la société au cours des 50 prochaines années concilient les usages anthropiques et naturels par les mesures de relocalisation et d'immunisation des bâtiments résidentiels et commerciaux, combinées à la restauration de milieux humides et hydriques. Les avantages excèdent les coûts, car les dommages évités en termes de réduction des aléas, des coûts d'indemnisation des propriétaires et des coûts psychosociaux, combinés à l'amélioration des services écosystémiques, dépassent les coûts des mesures. En particulier, l'option de distribuer stratégiquement sur le territoire les milieux hydriques et humides pour renforcer la connectivité des habitats riverains s'avère plus robuste face aux risques résiduels.

Par contre, la mise en œuvre de l'adaptation suscite des questions collectives de distribution, d'acceptabilité, et de réglementation (ex. relocalisation résidentielle, coûts concentrés sur les résidents et producteurs agricoles, perte de terres agricoles pour la création de milieux humides riverains et de bandes riveraines élargies). Les infrastructures naturelles et l'écofiscalité soutiendraient cette avenue.

Retombées pour l'adaptation

Cette étude a démontré :

- qu'il était plus rentable de réduire l'exposition et la vulnérabilité des activités et personnes à risque que de réduire l'aléa (contrôle des débits ou des étendues d'eau);
- que les scénarios d'adaptation les plus rentables pour la société comportent toutefois des limites liées à la distribution de leurs impacts entre acteurs;
- un besoin de cohérence réglementaire dans les secteurs multialéas présentant un niveau de risque élevé;
- une valeur ajoutée à quantifier la valeur des services écosystémiques au sein d'une ACA;
- l'intérêt d'utiliser une méthode d'évaluation socioéconomique tenant compte de plusieurs types d'usages et secteurs économiques, pouvant s'appliquer autant à l'échelle municipale que du bassin versant.

Concrètement, les résultats influencent déjà certaines décisions :

• les résultats préliminaires de l'ACA ont soutenu l'adoption des objectifs de conservation des milieux hydriques et humides dans la mise à jour du plan directeur de l'eau (PDE) du COBARIC ainsi que la démarche d'élaboration du PRMHH Chaudière-Appalaches.

RÉSUMÉ EXÉCUTIF

Au cours des dernières années, les inondations de la rivière Richelieu en 2011, celles des printemps 2017 et 2019, autant que les débordements de décembre 2020 en Chaudière-Appalaches ont affecté une large portion du territoire du sud du Québec. Elles remettent en cause la construction en zone à risque, les modes d'aménagement du territoire et mettent en évidence la vulnérabilité de plusieurs communautés. Appuyée par Ressources naturelles Canada, le Gouvernement du Québec et la Fédération Canadienne des municipalités, Ouranos a entrepris le projet de recherche Analyse des coûts-avantages des options d'adaptation aux inondations et aléas fluviaux en contexte de changements climatiques, afin d'outiller les communautés pour prendre des décisions éclairées en matière de gestion des risques d'inondations et fluviaux. Les partenaires principaux furent le Regroupement des organismes de bassin versant (ROBVQ), l'Université de Sherbrooke, le Comité de gestion de la rivière Saint-François (COGESAF) et le comité de bassin versant de la rivière Chaudière (COBARIC), tous ayant développé un imposant bagage de connaissances sur le sujet.

L'objectif général du projet portait sur le développement d'une méthode d'analyse des impacts des CC et des solutions d'adaptation aux inondations fluviales, à l'érosion de berges et d'autres aléas liés aux rivières qui menacent les actifs, activités et personnes dans les zones riveraines du Québec. La méthode choisie fut celle de l'analyse coûts-avantages participative basée sur l'analyse de risque : les coûts et les avantages de différents scénarios d'adaptation (combinaisons de plusieurs mesures d'adaptation) ont été comparés, afin de déterminer la viabilité économique des solutions et d'identifier celles qui offrent un avantage net pour la collectivité, en s'appuyant sur plusieurs instances de mobilisation des parties prenantes. Ce projet comporte un rapport méthodologique et deux études de cas d'analyses coûts-avantages : la rivière Coaticook à Compton (échelle municipale) et la rivière Chaudière (échelle du bassin versant).

Le présent rapport d'étude de cas répond d'un côté à une problématique de multiples enjeux liés à la rivière Chaudière et ses affluents, mais aussi à l'opportunité d'évaluer le potentiel des infrastructures naturelles dans la réduction de risque sur tout le bassin versant. L'étude visait à quantifier les coûts et les avantages de différents scénarios d'adaptation visant à réduire et gérer les risques reliés aux inondations et aléas fluviaux de la rivière Chaudière sur le territoire de son bassin versant et mettre en valeur la contribution potentielle des milieux hydriques et humides.

Approche méthodologique

Cette étude fait converger les méthodologies d'analyses coûts-avantages réalisées auparavant au Québec et ailleurs, et l'analyse de risque (basée sur ISO 31000), soutenue par un cadre participatif, dans une perspective multialéa. Pour appuyer la prise de décisions complexes, elle s'appuie sur une chaîne de modélisation multidisciplinaire: des scénarios climatiques locaux (Ouranos), des projections de débits (Génie hydrologique, Université de Sherbrooke), leur transformation en probabilités annuelles de dépassement et de profondeurs d'eau (méthode géostatistique, ROBVQ / Concordia), une évaluation des impacts socio-économiques et une modélisation des services écosystémiques (Ouranos).

- Cadre participatif: La mobilisation des parties prenantes à l'échelle de la municipalité, la région et de ministères ou organismes permet de cerner des mesures d'adaptations acceptables par le milieu.
- Analyse de risque: Un dénombrement des actifs, des activités et des personnes selon des niveaux de risque permet de prioriser les coûts à éviter. Les aléas fluviaux considérés sont les inondations en eau libre (submersion), les embâcles de glace, l'érosion des berges, le déplacement soudain du chenal (avulsion), et les cônes alluviaux (accumulations de sédiments en forme de cône en pied de talus).
- Co-construction des scénarios d'adaptation: Les scénarios d'adaptation évalués constituent une combinaison de mesures réparties sur le territoire et pouvant évoluer dans le temps. Ils reflètent plusieurs stratégies d'adaptation (infrastructure grise et verte, gestion des actifs, réglementation, mesures comportementales). Le choix des scénarios a été réalisé en co-construction avec deux instances participatives, soit le comité local de suivi (multidisciplinaire, reflétant une diversité d'acteurs du milieu) et l'assemblée consultative de priorisation (tous les aménagistes des MRC concernées et certains représentants municipaux).
- Analyse économique: La phase d'analyse économique compare du point de vue monétaire l'ensemble des avantages et des coûts de différentes options d'adaptation réalisables avec le scénario de références (statu quo) sur une période de 50 ans (2020 à 2070), dans la perspective collective du bassin versant de la rivière Chaudière. Pour cette analyse, les trois indicateurs économiques retenus sont la valeur actualisée nette (VAN), le ratio avantages-coûts et le seuil de rentabilité de la VAN. Cette base économique commune est exprimée en \$ constants 2019, et un taux d'actualisation décroissant s'applique, de 4 % (2020-

2050) puis de 2 % (2050-2070). Cette analyse est ensuite soumise à des tests de robustesse (analyse de sensibilité, analyse de distribution entre acteurs et analyses complémentaires).

Cette démarche dégage le scénario le plus avantageux économiquement pour la collectivité, afin d'éventuellement nourrir des discussions sur l'acceptabilité et la mise en œuvre de l'adaptation.

Zone d'étude

La zone d'étude s'étend sur tout le territoire du bassin versant de la rivière Chaudière (environ 6713 km²) (**Figure A**).

Le débit mensuel médian de la rivière Chaudière à la station de Saint-Lambert-de-Lauzon est de 79 m³/s (1970 et 2020) et peut dépasser les 2000 m³/s. L'analyse repose sur cinq sous-bassins ayant des dynamiques fluviales distinctes.

Le territoire recoupe 78 municipalités, regroupées en 7 MRC et soutenant 179 000 habitants. La taille moyenne est de 2,3 personnes/ménage selon le dernier recensement (Statistiques Canada, 2016).

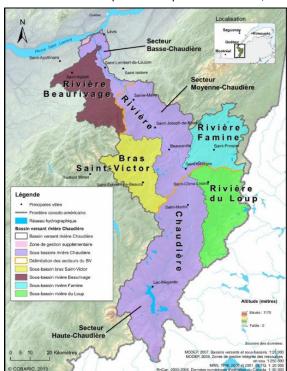


Figure A. Zone d'étude et ses sous-bassins versant Source : COBARIC, 2014.

Mobilisation des parties prenantes

Les activités suivantes ont soutenu la mobilisation tout au long du projet :

- CLS Comité local de suivi : impliquant le COBARIC, la ville de Lévis, la MRC de la Nouvelle-Beauce, la MRC de Lotbinière/équipe de projet du PRMHH, permettant un processus itératif de co-construction pour la sélection des postes d'impacts reflétant les enjeux, la validation des hypothèses, la sélection des scénarios et l'amélioration et la communication des résultats (6 réunions)
- ACP Assemblée consultative de priorisation : impliquant toutes les MRC concernées, et plusieurs municipalités, visant à cartographier de manière participative les impacts et des solutions concertées à évaluer, puis de valider l'adhésion aux résultats et déterminer les obstacles à l'adaptation (2 réunions)
- CT Comité technique composé d'experts d'Ouranos, du ROBVQ, du COBARIC et de l'Université Sherbrooke, pour assurer la coordination du projet, mais aussi offrir du soutien technique et analytique pour la réalisation de l'étude (11 réunions)
- CS Le comité de suivi du projet global réunissant les principaux bailleurs de fond, des experts académiques et des représentants de ministères et organismes (3 réunions)
- L'équipe restreinte de projet d'Ouranos et du ROBVQ (une réunion hebdomadaire, près de 120).

Les retombées générales de la mobilisation dans le cadre de cette étude ont été d'arrimer l'évaluation d'impacts aux préoccupations du milieu, de faciliter l'accès aux données locales, de sélectionner des scénarios suscitant une adhésion initiale et de s'appuyer sur les meilleures pratiques scientifiques.

Analyse des risques

L'analyse de l'aléa d'inondation en eau libre projette une augmentation des risques en climat futur (2020-2050), soit une augmentation des débits et l'expansion conséquente de la zone d'inondation, à l'exception du secteur de la Haute Chaudière où la zone d'inondation en eau libre reste stable. Malgré les relocalisations déjà effectuées, l'enjeu résidentiel domine le dénombrement des actifs et activités à risque, soit 42 % de la valeur totale des actifs, estimée à 273 805 M\$ (Tableau A). Le secteur du corridor longeant la rivière Chaudière contient la vaste majorité des actifs exposés à la submersion (86 %) par rapport à l'ensemble du bassin versant, sans compter le dénombrement lié aux embâcles, puisque les connaissances sont en développement. Par ailleurs, les autres enjeux majeurs portent sur les zones agricoles fortement exposées dans les régions de la rivière Beaurivage et de la rivière Famine, ainsi que la zone industrielle à l'embouchure de la Famine. La vulnérabilité de la zone d'étude est plutôt forte, tant par sa forte sensibilité socio-économique (population âgée, parc bâti vieillissant, faible capacité financière des ménages), que sa faible capacité à faire face (distance à certains services d'intervention d'urgence). Enfin, le manque de

connaissance sur les aléas d'érosion des berges, d'avulsion et de cônes alluviaux est préoccupant puisqu'ils pourraient s'exacerber face à une variation des événements hydro-météorologiques.

Tableau A. Matrice de risque multialéa

	Sévères >25% actifs exposés par secteur Infrastructur es essentielles			-Résidentiel chenal principal, Famine, Beaurivage exposés à de multiples aléas Inondations: -Agricole Beaurivage, Famine et Affluents -Industriel Famine -3 écoles primaires, bâtiments institutionnels essentiels
	Modérées 10-25% actifs exposés	Érosion des berges*		Inondations: -Résidentiel Affluents -Commercial chenal principal -Récréatif chenal principal Exposition aux embâcles de glace ***
Conséquences	Mineures < 10% actifs exposés	Inondations: -Résidentiel chenal principal faible exposition -Autres enjeux exposés aux inondations Cônes alluviaux** Zones d'avulsion**	Inondations: -Résidentiel chenal principal exposition moyenne	Inondations: -Industriel chenal principal -Agricole chenal principal -Patrimonial tous secteurs confondus
Consé		Faible <1 % (< 1:100)	Moyenne 1-5 % (1:20-1 :100)	Forte >5 % (> 1:20)

Probabilité d'occurrence d'ici 50 ans

*Probabilité incertaine considérée faible, mais conséquences modérées, la vaste étendue potentielle et la faible proportion de bandes riveraines

***Probabilité incertaine de notoriété forte (annuelle ou interannuelle), estimation de conséquences modérées vu l'étendue potentielle restreinte à certains secteurs

^{**}Probabilité incertaine considérée faible, estimation de conséquences mineures vu l'étendue potentielle limitée

Scénarios d'adaptation à l'étude

La construction des scénarios se base sur un processus collaboratif en plusieurs étapes impliquant les comités participatifs du projet, mais aussi la consultation d'experts techniques pour certaines solutions. Ces solutions prennent en compte les conditions hydrodynamiques, l'érosion et la sédimentation et ont été conçues pour éviter les problèmes de submersion et d'érosion pour les 50 prochaines années.

Le scénario de référence se définit comme la poursuite : 1) du développement urbain déjà autorisé en vertu du plan d'urbanisme de la ville de Lévis, 2) des autorisations de démolitions des lots suite aux inondations du printemps 2019 et 3) de l'approche réglementaire d'indemnisation des dommages liés à la submersion. L'état de référence partiel de l'environnement a permis de situer les flux annuels de trois services écosystémiques : la qualité de l'eau, la qualité de l'habitat et la séquestration du carbone.

Les sept scénarios illustrent des stratégies d'adaptation aux aléas fluviaux bien différentes, que ce soit l'adoption d'infrastructures vertes, le contrôle par des infrastructures grises, la réduction des conséquences par la relocalisation ou l'immunisation d'actifs, la transformation d'usages ou des combinaisons (**Tableau B**). Ils s'appuient sur diverses mesures structurelles, naturelles, réglementaires ou comportementales, construits soit en collaboration avec les acteurs du milieu, en se basant sur des études antérieures (Tecsult, 1994) ou en processus itératif par le comité technique du projet. Chaque scénario a fait l'objet d'une estimation de l'efficacité sur les aléas et les actifs à risque, des coûts des mesures (conception, réalisation, entretien), des coûts d'opportunités des mesures (coût de renonciation à un usage, imposé par une mesure), et d'identification des impacts par secteurs (agricoles, commerciaux et industriels, résidentiels, psychosociaux, municipaux, économiques, environnementaux).

 Tableau B.
 Liste des sept scénarios et leurs mesures

Symbole	Nom	Description
1. SQ	Statu quo	Signifie une perte nette de 2,37 km² de MHH en vertu du plan d'urbanisme de la ville de Lévis, compensée hors bassin versant.
Infrastruct	ures vertes	
2. MHH- ACC	MHH acceptable	Signifie zéro perte nette de MHH pour le BV; Implique un minimum de changements d'utilisation du sol ou une optimisation des espaces existants; Tient compte des perspectives de développement des territoires prévues.
3. MHH- EFF	MHH efficace	Gain net de MHH pour le BV; Retrait des actifs et ajout de milieux humides et naturels dans le corridor inondable; Bandes riveraines de 15 mètres sur les milieux anthropiques et agricoles; Importants changements dans l'utilisation du sol.
Infrastruct	ures grises	
4. IMM- COLL	Immunisation collective	Approche consistant à immuniser les collectivités à l'aide de multiples digues en zone urbaine; Non considéré pour la modélisation hydrologique.
Infrastruct	ure verte et immunisation	individuelle
5. MHH acc + IMM- IND	MHH acceptable et immunisation individuelle	Approche consistant à combiner le scénario MHH-acc et les mesures d'immunisation individuelle des bâtiments résidentiels et commerciaux (IMM-IND). Non considéré pour la modélisation hydrologique.
6. MHH_dis + IMM-IND	MHH distribués et immunisation individuelle	Approche consistant à combiner les mesures d'immunisation individuelle des bâtiments résidentiels et commerciaux (IMM-IND), avec une distribution des MHH mitoyenne entre les niveaux dits acceptable et efficace et l'ajout de bandes de végétation de 15 mètres sur les milieux agricoles en zone inondable 0-2 ans. Non considéré pour la modélisation hydrologique.

Analyse économique

Une approche exhaustive a permis d'estimer l'ensemble des coûts et avantages liés aux impacts économiques, environnementaux ou sociaux des scénarios, notamment en se basant sur les budgets de ferme selon les cultures, des probabilités mensuelles de profondeurs d'eau, des prix de marché de nettoyage de débris et des coûts de remplacement d'enrochement.

Ainsi, en l'absence de changement des pratiques actuelles, sur 50 ans, les risques fluviaux dans le bassin de la rivière Chaudière pourraient engendrer des dommages d'inondation en eau libre de 39,338 M\$ (RCP 4.5) pour la collectivité, malgré le retrait de 646 lots démolis ou à démolir (en date d'octobre 2020). D'ailleurs, les impacts résidentiels et leur effets indirects sur le domaine psychosocial absorbent à eux seuls 71 % (environ 27,826 M\$; RCP 4.5) du total. Les 29 % restants se séparent de façon presque égale entre 3 autres secteurs: agricole, commercial et industriel, et municipalité et économie, pour environ 3,8 M\$ chaque. Près de 60 % des coûts totaux (39,338 M\$) sont endossés par la société par des programmes d'indemnisations.

Parmi les scénarios étudiés, l'approche de valorisation des milieux hydriques et humides combinée à la réduction des risques en milieu urbain par la relocalisation et l'immunisation des bâtiments constitue un équilibre avantageux entre trois facteurs : l'efficacité (coûts évités de submersion de 44 %), le coût des mesure (9,5 M\$), et les gains en services écosystémiques (un minimum de 1,5 M\$) (**Figure B**). Ensemble, ces mesures offrent un avantage net à la société dépassant les 9 M\$ sur 50 ans. La localisation judicieuse des usages résilients et l'utilisation du plein potentiel des milieux naturels constituent des facteurs de succès de ces scénarios d'adaptation. Ce scénario est robuste face à l'ensemble des analyses de sensibilité et seul un fort taux d'actualisation change légèrement le classement. De plus, l'analyse qualitative suggère que la monétisation des coûts évités en matière d'érosion des berges, de la submersion des affluents ainsi que des embâcles renforcerait cette conclusion.

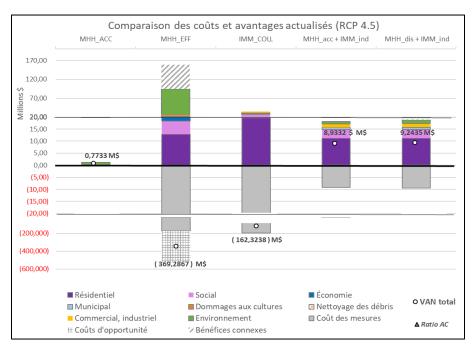


Figure B. Comparaison des coûts et avantages actualisés sur 50 ans des scénarios (RCP 4.5)

L'analyse soulève l'enjeu incontournable de l'aménagement des zones urbaines, dont l'enjeu dominant est le secteur résidentiel. À faible effort, des grands coûts pourraient être évités dans les sous-sols, mais une des clés de l'adaptation réside dans la planification urbaine résiliente par quartier.

Dans les zones agricoles, notamment dans le sous-bassin de Beaurivage, l'évolution du prix de la terre appelle à une réflexion sociétale pour une agriculture résiliente aux aléas fluviaux. De plus, certaines limites réglementaires freinent l'adaptation, alors que des opportunités d'adaptation se situent dans les modèles d'agriculture résiliente. Les enjeux d'acceptabilité se profilent et les décisions doivent en tenir compte.

Du côté des infrastructures naturelles, l'étude montre clairement l'avantage économique des milieux hydriques et humides et du principe de zéro perte nette. Malgré une contribution plutôt modeste à la régulation des crues, pour chaque dollar investi, la conservation, création et restauration des milieux hydriques et humides suscitent un retour de 3 \$ en bénéfices écosystémiques. La création en milieu urbain amènerait le maximum de gains environnementaux. Par ailleurs, la combinaison des milieux humides riverains connectés à des bandes riveraines amène un effet multiplicateur de bénéfices environnementaux (double presque, surtout pour la qualité de l'eau). À l'opposé, la destruction de certains milieux sensibles pourrait amplifier les coûts. Le sous-bassin de la rivière Beaurivage est à surveiller et devrait faire l'objet d'une analyse plus approfondie dans cette perspective. Dans l'ensemble, il existe un besoin de clarifier et d'optimiser les rapports coûts-efficacités des infrastructures naturelles. De plus, les pistes à explorer sont le potentiel d'adaptation

des pratiques de drainage ainsi que les options d'écofiscalité pour la mise en œuvre des mesures proposées.

Par contre, une limite d'acceptabilité est prévisible. La mise en œuvre de l'adaptation repose sur des questions collectives à résoudre : Comment opérer la transformation d'usage des zones à haut risque au bénéfice de la collectivité ? Quel est le seuil de tolérance face à l'augmentation anticipée des indemnisations collectives et comment partager ce fardeau entre les individus et la société ?

En résumé, l'analyse montre clairement que l'approche de conciliation des usages résilients par la valorisation des milieux naturels et la planification urbaine résiliente est la plus avantageuse collectivement et sans regret face à l'amplification possible des impacts des changements climatiques. Par contre, elle fait face à des défis de mise en œuvre. La prise de décision en adaptation devra non seulement se baser sur les critères analysés dans cette étude, soit la rentabilité financière incluant la valeur des écosystèmes, l'équité entre les acteurs et la réduction des risques multialéa, mais également prendre en compte l'acceptabilité sociale, le degré de complexité de la mise en œuvre, et le momentum de l'adaptation afin d'optimiser les retombées pour la société.

Concrètement, les résultats influencent déjà certaines décisions. En effet, les résultats préliminaires de l'ACA ont soutenu l'adoption des objectifs de conservation des milieux hydriques et humides dans la mise à jour du plan directeur de l'eau (PDE) du COBARIC ainsi que la démarche d'élaboration du PRMHH Chaudière-Appalaches.



REMERCIEMENTSII RÉSUMÉ COURTIV RÉSUMÉ EXÉCUTIF......VII GLOSSAIRE......XXI LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMESXXIV LISTE DES FIGURES......1 LISTE DES TABLEAUX......3 LISTE DES ANNEXES......5 INTRODUCTION6 2.1.1 Localisation9 2.1.2 2.1.3 Milieu humain......12 2.1.4 2.1.5 2.1.5.1 Secteur de la Moyenne-Chaudière......13 2.1.5.2 2.1.5.3 Problématiques liées à la rivière Chaudière......14 2.1.6 2.1.6.1

2.1.6.	2 Causes principales des aléas fluviaux	16
2.1.6.	3 Historique des aléas	16
2.1.6.	4 Mesures techniques et technologiques de lutte contre les aléas fluviaux	18
2.2 Hor	zon temporel	19
2.3 Pop	ulation d'intérêt	19
2.4 Para	amètres économiques	19
2.4.1	Taux d'actualisation	19
2.4.2	Unité monétaire	20
2.4.3	Indicateurs économiques	20
3. MOBI	LISATION DES PARTIES PRENANTES	21
3.1 Rôle	es, compositions et relations entre les groupes	21
3.2 Chr	onologie des activités	24
3.3 Reto	ombées	25
4. ANAL	YSE DE RISQUE	27
4.1 Mét	hodologie : L'approche multialéa	27
4.2 Ana	lyse des aléas	28
4.2.1	Inondations en climat futur	28
4.2.1.	1 Scénarios climatiques	28
4.2.1.	2 Méthode de modélisation hydrologique et géostatistique	29
4.2.1	3 Résultats	32
4.2.2	Autres aléas fluviaux non probabilistes	37
4.3 Exp	osition des actifs aux aléas	37
4.3.1	Résultats par type d'actifs	41
4.3.2	Résultats par régions d'intérêt dans le bassin de la rivière Chaudière	42
4.4 Vulr	nérabilité aux impacts des aléas	45
4.4.1	Sensibilité socio-économique	45
4.4.2	Capacité à faire face	46
4.5 Mat	rice multirisque	48
4.5.1	Méthodologie	48
4.5.2	Résultats	49

5.	SCÉNA	ARISATION DES STRATÉGIES D'ADAPTATION	52
	5.1 Méth	odologie	52
	5.2 Scén	ario de référence (SQ)	55
	5.2.1	Définition du scénario de référence – le statu quo (SQ)	55
	5.2.2	Identification des impacts de la submersion	56
	5.2.3	État de référence de l'environnement	57
	5.2.3.1	Méthodologie	58
	5.2.3.2	Résultats	59
	5.3 Paraı	mètres des scénarios d'adaptation	62
	5.3.1	Combinaison des mesures	62
	5.3.2	Coûts des mesures	64
	5.4 Desc	ription des scénarios	67
	Milieu	x humides et hydriques acceptables (MHH-acc)	69
	5.4.1	Milieux humides et hydriques efficaces (MHH-eff)	72
	5.4.2	Immunisation collective (IMM-coll)	75
	5.4.3 acc +	Milieux humides et hydriques acceptables et immunisation individuelle	•
	5.4.4 + IMM	Milieux humides et hydriques distribués et immunisation individuelle (N	
	5.5 Synth	nèse des scénarios	83
6.	ANALY	/SE ÉCONOMIQUE	85
		odologie	
	6.2 Valeu	ur monétaire du scénario de référence (SQ)	91
	6.3 Résu	ltats économiques des scénarios d'adaptation	95
	6.3.1	Milieux humides et hydriques acceptables (MHH-acc)	95
	6.3.2	Milieux humides et hydriques efficaces (MHH-eff)	98
	6.3.3	Immunisation collective (IMM-coll)	101
	6.3.4 acc +	Milieux humides et hydriques acceptables et immunisation individuelle	
	6.3.5	Milieux humides et hydriques distribués et immunisation individuelle	107
	6.4 Com	paraison des scénarios	111
	6.5 Analy	/ses complémentaires	114

	6.5.1	Analyses de sensibilité	114
	6.5.1.1	Résultats des analyses de sensibilité sur les scénarios	118
	6.5.1.2	Seuils de rentabilité des mesures	118
	6.5.2	Analyse de redistribution par acteur	120
	6.5.3	Analyse des risques et enjeux résiduels	122
	6.6 Synth	èse de l'analyse économique	123
7.	DISCU	SSIONS ET CONCLUSIONS	125
	7.1 Analy	se de risque	125
	7.2 Analy	se économique	126
	7.2.1 et sans	L'approche des multiples usages résilients : la plus avantageuse colle s regret, face à des défis de mise en œuvre	
	7.2.2	L'aménagement des zones urbaines : un enjeu incontournable	128
	7.2.3 aux ale	Les dommages agricoles: une réflexion sociétale pour une agriculturéas fluviaux	
	7.2.4	La portée multiple des infrastructures naturelles	130
	7.2.5	La transformation d'usage à haut risque : une mise en œuvre à explor	er132
	7.2.6 risque	Les scénarios extrêmes de contrôle de la rivière ou de réduction m ne sont pas avantageux	
	7.3 Les lir	nites et sources d'incertitude	134
	7.4 Conc	usion générale	137
8.	RÉFÉR	ENCES	138
^	NNEVEC		1/./



Termes économique	es	
Analyses coûts-	Comparaison de différents scénarios sur la base du ratio	
avantages (ACA)	avantages-coûts en valeurs actualisées.	
Bénéfice connexe	Bénéfices indirects liés à une mesure (par exemple, bénéfices de	
benefice conflexe	récolte ou d'usage des milieux naturels).	
	Coûts indirects liés à une mesure (par exemple, coût de	
Coût connexe	compensations à verser, lié à une mesure d'espace de liberté ou un	
	bassin de rétention). Ces coûts peuvent être des coûts de	
	transaction et des coûts d'opportunité.	
Coûts d'opportunité	Coût de renonciation d'un bien ou d'une activité suite à une	
	décision.	
Coûts de	Coûts de coordination et d'échange entre les agents.	
transaction		
Produit intérieur brut (PIB)	Somme des revenus ou dépenses d'une économie.	
Ratio avantages-	Division des avantages (bénéfices) par les coûts, en valeur	
coûts (A/C)	actualisée	
Taux d'actualisation	Taux auquel les valeurs se déprécient à travers le temps.	
Valeur actualisée nette (VAN)	La somme des valeurs présentes et futures actualisées.	
Termes hydrologiques		
Amont	Partie d'un cours d'eau situé en direction de la source face à un point donné.	
A I	Partie d'un cours d'eau situé en direction de son écoulement face	
Aval	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.	
Cote de crue	Probabilité d'un territoire d'être inondé sur une échelle temporelle	
Cote de crue	(2 ans : 50% de chances, 20 ans : 5%).	
Débit de crue	Projection et probabilité d'occurrence de débit d'un cours d'eau	
DODIT GE CI GE	lors de crues.	

Embouchure	Lieu où un cours d'eau se jette dans un plan d'eau.
Période de retour	Probabilité qu'un phénomène dépasse une valeur donnée au cours d'une année donnée, exprimé comme une fréquence annuelle (50% de chances : 2 ans, 5% : 20 ans, etc.). Les périodes de retour calculées dans le cadre de ce projet concerne le phénomène d'inondation et donc, la probabilité qu'un territoire soit inondé au cours d'une année donnée, exprimé en fréquence annuelle.
Probabilité de dépassement annuel	Probabilité qu'un phénomène dépasse une valeur donnée au cours d'une année donnée. Les probabilités de dépassement annuel calculées dans le cadre de ce projet concernent les inondations.
Récurrence	Probabilité d'observer un événement à travers le temps.
Station	Dispositif permettant un enregistrement en continu du débit d'un
hydrométrique	cours d'eau.
Termes technologiq	ues
Lidar	Technique de mesure de distances utilisant la réception d'un laser par son émetteur.
Système de référence géodésique	Un point à partir duquel on détermine la latitude et longitude des autres points de la surface terrestre.
Termes mesures d'a	daptation
Aléa fluvial	Événement hydrométéorologique imprévisible comprenant un facteur de risque lié au système fluvial d'un cours d'eau.
Bande riveraine végétalisée	Lisière végétale permanente et variée longeant un cours d'eau.
Biodiversité	Diversité des espèces vivantes dans un milieu.
Immunisation	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.
Termes liés aux aléa	as
Avulsion	Changement soudain du tracé du cours d'eau souvent associé par un épisode de pluie torrentielle.
Cônes alluviaux	Amas de sédiments entrainés par un cours d'eau accumulé à la base d'une pente abrupte.
Embâcles	Accumulation de morceaux de glace 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 permettant l'évacuation par débordement d'un bassin ou d'une cuve.
Termes environnem	nentaux
Bassin versant	Territoire drainé par un cours d'eau et ses affluents.
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

ACA	Analyse Coûts-avantages
ACP	Assemblée consultative de priorisation
	Aire de diffusion, soit une subdivision territoriale du Recensement
AD	de Statistique Canada et la plus petite unité géographique dont les
	données sont divulguées
BV	Bassin versant
СС-НН	Chaîne de modélisation changements climatiques / hydrologie /
СС-НН	hydraulique
CLS	Comité local de suivi
COBARIC	Comité de bassin de la rivière Chaudière
INRS	Institut national de recherche scientifique
InVEST	Logiciel de modélisation des impacts aux services écosystémiques
IIIVESI	(Integrated Valuation of Ecosystem Services and Trade-offs)
m³/s	Mètres cubes par seconde, notamment utilisé pour quantifier les
111/5	débits d'eau
MDDEFP	Ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la
MDDEFP	Faune et des Parcs (maintenant MELCC)
MELCC	Ministère de l'Environnement et de la Lutte aux changements
MLLCC	climatiques
МНН	Milieux humides et hydriques
MRC	Municipalité régionale de comté
MTQ	Ministère des Transports du Québec
PRMHH	Plan régional sur les milieux humides et hydriques
ROBVQ	Regroupement des organismes de bassins versants du Québec
Scénario	Scénario d'adaptation utilisant l'immunisation à l'aide de digues
IMM_coll	Section d'adaptation diffisant minimalisation à raide de digues
Scénario	Scénario d'adaptation utilisant l'immunisation individuelle des
IMM_ind	bâtiments

Scénario	Scénario d'adaptation sans perte nette de milieux humides à
MHH_acc	l'échelle du bassin versant
Scénario	Scénario d'adaptation sans perte nette de milieux humides à
MHH_dis	l'échelle des secteurs géographiques du bassin (Basse, Moyenne et
МПП_СПБ	Haute Chaudière, Famine, Beaurivage)
Scénario MHH_eff	Scénario d'adaptation avec corridor riverain
Scénario SQ	Scénario de référence, situation de statu quo
SWAT	Modèle hydrologique spatialisé (Soil Water Assessment Tool)
VAN	Valeur actuelle nette

LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Démarche d'analyse coûts-avantages basée sur la gestion de risque,
adapté de l	a norme internationale ISO 31000:20187
Figure 2.	Zone d'étude et ses sous-bassins10
Figure 3.	Exemple d'hydrogramme issu du bassin de la rivière Chaudière à Saint-
Lambert-de	e-Lauzon entre 1970 et 202011
Figure 4.	Limites approximatives d'espace de liberté (en rouge) pour les secteurs
de Beaucev	ville (à gauche) et de Sainte-Marie (à droite)15
Figure 5.	Distribution des événements de sécurité civile dans le territoire du bassin
versant (198	30-2020)17
Figure 6.	Évolution du nombre d'inondations (gauche) et d'embâcles (droite)
	85-2019)18
Figure 7.	Organigramme de projet24
Figure 8.	Synthèse des rencontres et ateliers de mobilisation, concertation, co-
constructio	n et diffusion24
Figure 9.	a, b, et c) Illustrations lors de l'activité de mars 2020 et d) exemple
	on issue la cartographie participative transposée dans un SIG25
Figure 10.	Arrimage des projets de PRMHH et d'ACA26
Figure 11.	Résumé du processus d'analyse multirisque basé sur une chaîne de
	on hydrologique-géostatistique et hydrogéomorphologique28
Figure 12.	Segmentation de la modélisation31
Figure 13.	Effet des changements climatiques sur le régime hydrologique de la
rivière Chau	udière (tous scénarios et modèles confondus)35
Figure 14.	Analyse fréquentielle des crues, selon l'horizon (a) Horizon 1 : 2021 à 2040;
(b) Horizon	2 : 2041 à 2070, pour le bassin de la Chaudière (tous scénarios et modèles
confondus)	36
Figure 15.	
d'intérêt da	ıns le bassin de la rivière Chaudière38
	Dénombrement du réseau routier et ferroviaire à risque de submersion,
par région d	d'intérêt dans le bassin de la rivière Chaudière42

Figure 17.	Localisation des actifs à risque pour a) Saint-Étienne (rivière Beaurivage)
et Lévis, b) Sa	aint-Gilles et Saint-Patrice (rivière Beaurivage), c) Saint-Georges à Notre-
Dames-des-F	Pins (chenal principal) et d) Vallée-Jonction à Scott (chenal principal) 43
Figure 18.	Répartition de la proportion de la valeur totale des actifs, selon le type
d'usage et le	secteur géographique44
Figure 19.	Distribution des indices de sensibilité aux aléas hydrométéorologiques,
AD longeant	la Chaudière45
Figure 20.	Distribution des indices de capacité à faire face aux aléas
hydrométéor	ologiques, AD longeant la Chaudière47
Figure 21.	Modèles InVEST utilisés pour établir l'état de référence de
l'environnem	ent, détaillés par leurs paramètres d'entrés et leur source de données58
Figure 22.	Localisation mesures du scénario MHH-acc dans le bassin versant et
leurs répartit	ions par MRC69
Figure 23.	Localisation mesures du scénario MHH-eff dans le bassin versant et
leurs répartit	ions par MRC72
Figure 24.	Représentation d'un ouvrage de digue75
Figure 25.	Exemple de quantification spatiale des impacts sur les services
écosystémiqu	ues: comparaison de l'efficacité du scénario MHH_dis, par
l'implémenta	tion de bandes riveraines aux abords du chenal principal, sur les flux
annuels de p	hosphore vers les cours d'eau (résolution de 10m par 10m)110
Figure 26.	Comparaison des coûts et avantages actualisée (VAN), et du ratio
avantages-co	oûts des scénarios d'adaptation, par rapport au scénario de référence sur
50 ans	112

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.	Composition des différents groupes d'intervenants et rôles de chacun
d'entre eux, no	ombre de rencontres et retombées23
Tableau 2.	Dénombrement et valorisation des actifs à risque d'inondation, par
régions d'inté	rêt dans le bassin de la rivière Chaudière39
Tableau 3.	Seuils des probabilités et conséquences de la matrice multirisque48
Tableau 4.	Niveaux de risque selon les combinaisons de probabilité et
conséquence	s48
Tableau 5.	Matrice de risque multialéa50
Tableau 6.	Catégories d'impacts et de coûts et lien avec l'analyse de risque54
Tableau 7.	Quantification de l'état de référence de l'environnement pour a) le flux
d'azote, b) le	flux de phosphore, c) le flux de sédiments, d) la qualité de l'habitat e) la
charge de Car	bone60
Tableau 8.	Liste des mesures constituant les scénarios d'adaptation63
Tableau 9.	Coûts unitaires, coûts d'opportunités et coûts totaux par mesure65
Tableau 10.	Scénarios étudiés dans l'ACA, nomenclature et description68
Tableau 11.	Ventilation des coûts, scénario MHH-ACC70
Tableau 12.	Bilan net de superficies de MHH et pourcentage de variation des débits
des crues sou	ıs différentes périodes de retour pour le scénario MHH-acc, par rapport
au scénario d	e référence71
Tableau 13.	Ventilation des coûts, scénario MHH-EFF73
Tableau 14.	Pourcentage de variation des débits des crues sous différentes périodes
de retour pou	ır le scénario MHH-eff, par rapport au scénario de référence74
Tableau 15.	Ventilation des coûts, scénario immunisation collective
Tableau 16.	Ventilation des coûts, scénario MHH-acc + IMM-ind78
Tableau 17.	Répartition des mesures du scénario MHH-dis, par MRC79
Tableau 18.	Ventilation des coûts du scénario MHH-dis + IMM-ind81

Tableau 19.	Comparaison des bilans nets de MHH entre le scénario MHH-dis et
MHH-acc et p	pourcentage de variation des débits des crues sous différentes périodes
de retour pou	ur le scénario MHH-acc, par rapport au scénario de référence82
Tableau 20.	Synthèse des paramètres, coûts et efficacités des scénarios83
Tableau 21.	Résumé des impacts anticipés de chacun des scénarios par rapport
au scénario d	le référence84
Tableau 22.	Paramètres de monétisation des impacts87
Tableau 23.	Valeur monétaire des coûts du scénario de référence91
Tableau 24.	Dommages au secteur résidentiel par zone inondable, RCP 4.592
Tableau 25.	Dommages au secteur agricole par zone inondable, RCP4.593
Tableau 26.	Dommages au secteur commercial et industriel par zone inondable,
RCP 4.5	94
Tableau 27.	Dommage aux bâtiments institutionnels (secteur économique) par
zone inondak	ole, RCP 4.595
	Valeurs actualisées des coûts et avantages de MHH-acc, par rapport
au scénario d	le référence (\$2019)96
Tableau 29.	Valeurs actualisées des coûts et avantages de MHH-eff, par rapport au
scénario de r	éférence (\$2019)99
Tableau 30.	Retrait des actifs à risque du scénario MHH_eff, par secteur100
Tableau 31.	Valeurs actualisées des coûts et avantages de IMM_coll, par rapport
au scénario d	le référence (\$2019)102
Tableau 32.	Valeurs actualisées des coûts et avantages de MHH-acc + IMM-ind, par
rapport au sc	énario de référence (\$2019)104
Tableau 33.	Valeurs actuelles de l'immunisation individuelle des bâtiments
résidentiels e	t commerciaux106
Tableau 34.	Valeurs actualisées des coûts et avantages de MHH-dis + IMM-ind, par
rapport au sc	énario de référence (\$2019)108
Tableau 35.	Paramètres des analyses de sensibilité et valeurs à tester115
Tableau 36.	Résultats des analyses de sensibilité sur la valeur actuelle nette des
scénarios et l	es seuils de rentabilité des mesures, par rapport au scénario de référence
(RCP 4.5, \$ 20	019)117
Tableau 37.	Analyse de redistribution entre les acteurs, RCP 4.5 (2019 \$)120
Tableau 38.	Analyses des risques et enjeux résiduels des mesures rentables par
rapport au SQ	122



Annexe A Compléments au chapitre 1 : Introduction 147 Annexe B Compléments au chapitre 2 : Design de l'étude 149 Annexe C Compléments au chapitre 3 : Mobilisation des parties prenantes 150 Annexe D Cartographie des submersions 158 Annexe E Compléments au chapitre 4 : Analyse de risque 169 Annexe F Compléments au chapitre 5 : Scénarios d'adaptation 172 Annexe G Méthodes de monétisation, hypothèses de base et données pour chaque secteur 182



Au Canada, les inondations constituent le risque naturel le plus fréquent et qui provoque le plus de dégâts matériels (Sécurité publique Canada, 2015). Les plans et cours d'eau couvrent 22% du territoire québécois (MELCC, 2018) et la majorité de la population québécoise habite à proximité du réseau hydrographique. Au cours des dernières années, les inondations de la rivière Richelieu en 2011, celles des printemps 2017 et 2019, et les inondations à répétition en Chaudière-Appalaches ont affecté une large portion du territoire du sud du Québec. Elles ont généré des impacts économiques, environnementaux et sociaux majeurs se chiffrant en centaines de millions de dollars. Elles remettent en cause la construction en zone à risque, les modes d'aménagement du territoire et mettent en évidence la vulnérabilité de plusieurs communautés. Ainsi, prendre des décisions pour réduire les risques et s'adapter aux changements climatiques, qui pourraient affecter l'intensité et la fréquence des inondations et risques riverains, devient une nécessité. Cela implique de nombreuses perspectives (sécurité publique, agriculture, transports, santé, environnement, etc.) et constitue ainsi un enjeu de société. Il s'agit d'ailleurs d'une priorité dans le Plan de mise en œuvre 2021-2026 du Plan pour une Économie verte 2030 (Gouvernement du Québec, 2020).

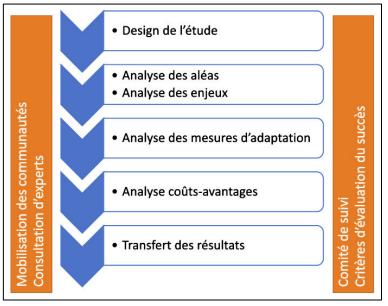
Appuyée par Ressources naturelles Canada, le Gouvernement du Québec et la Fédération Canadienne des municipalités, Ouranos a entrepris le présent projet de recherche, afin d'outiller les communautés pour prendre des décisions éclairées en matière de gestion des risques d'inondations et fluviaux. L'objectif général portait sur le développement d'une méthode d'analyse des impacts des CC et des solutions d'adaptation aux inondations fluviales, à l'érosion de berges et d'autres aléas liés aux rivières qui menacent les actifs, activités et personnes dans les zones riveraines du Québec. La méthode choisie est celle de l'analyse coûts-avantages participative basée sur l'analyse de risque: les coûts et les avantages de différents scénarios d'adaptation (combinaisons de plusieurs mesures d'adaptation) sont comparés, afin de déterminer la viabilité économique des solutions et d'identifier celles qui offrent un avantage net pour la collectivité. Ce projet comporte un rapport méthodologique et deux études de cas.

Le présent rapport d'étude de cas répond à une problématique de multiples aléas liés à la rivière Chaudière dans l'ensemble de son bassin versant, affectant de nombreux foyers urbains et terres agricoles. L'étude visait à quantifier les coûts et les avantages de différents scénarios d'adaptation visant à réduire et gérer les risques reliés aux inondations et aléas fluviaux du bassin versant de la rivière Chaudière.

1.1 L'ANALYSE COÛTS-AVANTAGES PARTICIPATIVE

La démarche employée fait converger l'analyse économique traditionnelle et la démarche de réduction du risque (ISO 31000 : 2018) (Figure 1). L'analyse coûtsavantages (ACA) constitue un outil courant d'aide à la décision. Il permet de comparer l'ensemble des avantages et des coûts de différentes options, sur une base commune exprimée en valeur monétaire. Appliquée aux options d'adaptation depuis plus d'une

décennie (Webster, 2008), l'ACA permet d'intégrer les multiples dimensions et enjeux relatifs aux risques fluviaux et d'évaluer les impacts afin de prioriser les mesures d'adaptation qui sont les plus rentables du point de vue de la société (ex. Penning-Rowsell et al., 2013; Circé et al., 2016). Grâce à la recherche en sciences de l'environnement, l'Évaluation des comme écosystèmes pour le millénaire, impacts socioenvironnementaux des usages territoire peuvent être quantifiés monétairement et intégrés dans ľACA pour soutenir une prise de décision soutenant le développement durable.



Démarche d'analyse coûts-avantages Figure 1. basée sur la gestion de risque, adapté de la norme internationale ISO 31000:2018.

- Chapitre 2: l'établissement du contexte et du design de l'étude, comprend la description du site d'étude du bassin versant de la rivière Chaudière et les grandes contraintes de l'étude (horizon temporel, taux d'actualisation).
- Chapitre 3: le processus de mobilisation, concertation et co-construction.
- •Chapitre 4: l'analyse de risque décrit les projections hydroclimatiques selon différents scénarios en climat futur, l'exposition et le dénombrement des actifs, activités et personnes à risque, et le contexte vulnérabilité et de capacité à faire de la zone d'étude, pour terminer avec une matrice multirisque qui établit les foyers prioritaires de dommages à éviter.
- Chapitre 5 : l'analyse des mesures d'adaptation débute par un scénario de référence (statu quo), suivant le cours actuel des affaires et s'appuyant sur la modélisation des aléas futurs, suivi des scénarios d'adaptation développés, qui combinent différentes mesures.
- •Chapitre 6: l'analyse économique porte sur la comparaison des impacts quantifiés (coûts et avantages) des scénarios sur une base économique commune en mesurant l'écart au scénario de référence, selon divers domaines et types d'impacts, dont le résultat permet de classes les options selon leurs avantages nets ; des analyses complémentaires sont effectuées (sensibilité, distribution, risques résiduels).
- Chapitre 7: la discussion des résultats permet de formuler les conclusions.
- •La démarche d'ensemble se conclut par le transfert des résultats, en particulier le présent rapport et des activités de diffusion des connaissances.

Note: Pour la méthodologie détaillée voir le <u>guide méthodologique</u> (Boyer-Villemaire et al., 2021)



Le design de l'étude comprend les choix de zone d'étude, d'horizon temporel, de la population d'intérêt et certains paramètres économiques (taux d'actualisation, unité monétaire et indicateurs économiques).

2.1 ZONE D'ÉTUDE

2.1.1 Localisation

Situé dans les régions administratives de Chaudière-Appalaches et de l'Estrie, le bassin versant de la rivière Chaudière s'étend sur 6 713 km² (COBARIC, *Territoire du COBARIC*). Il est délimité par la frontière canado-américaine au sud, par le fleuve Saint-Laurent au nord et est ceinturé de différents bassins versants à l'est et à l'ouest (MDDEFP, 2011, extrait de COBARIC, 2014). Tel qu'on peut le constater à la **Figure 2**, le bassin versant de la rivière Chaudière peut se caractériser en trois secteurs : Haute-Chaudière, Moyenne-Chaudière et Basse-Chaudière. Chacun de ces secteurs a des caractéristiques bien distinctes, notamment sur le plan des caractéristiques physiques que sur le plan des activités économiques.

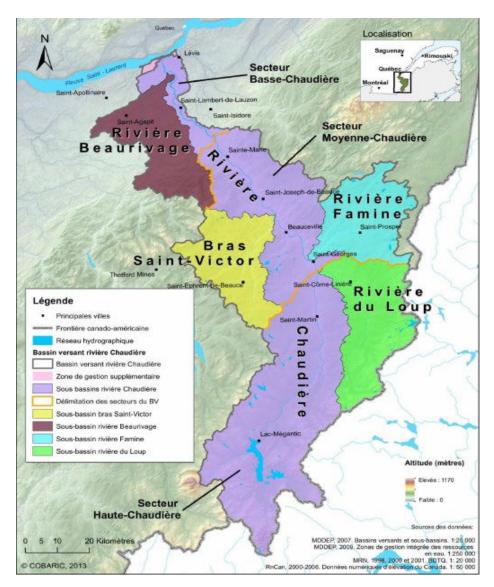


Figure 2. Zone d'étude et ses sous-bassins Source : COBARIC, 2014

2.1.2 Milieu physique

Le lac Mégantic, situé dans la chaîne de montagnes des Appalaches, se trouve à la tête de la rivière. La rivière s'étend sur environ 185 km entre l'embouchure du lac Mégantic et l'exutoire dans le fleuve Saint-Laurent (MELCC, station 023402). Selon les données de cette station, la rivière Chaudière a un débit mensuel médian de 79 m³/s entre 1970 et 2020. Il se situe entre le maximum annuel généralement en avril (maximum 2354 m³/s), et le minimum en juillet (minimum de 3 m³/s) (**Figure 3**). Les principaux tributaires sont les rivières du Loup, Famine et Beaurivage, ainsi que le Bras Saint-Victor. 15 des 20 lacs les plus importants se trouvent en amont de Saint-Georges (COBARIC, 2014). La section 4.2.1, traitant des inondations en climat futur, abordera de façon plus approfondie la dynamique et le régime hydrologique de la rivière.

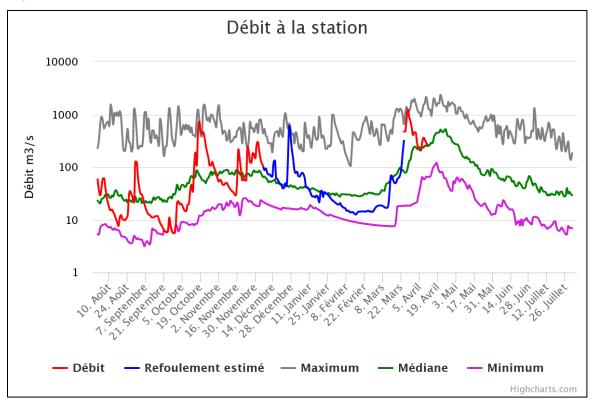


Figure 3. Exemple d'hydrogramme issu du bassin de la rivière Chaudière à Saint-Lambert-de-Lauzon entre 1970 et 2020 Source: Expertise hydrique et barrages, MELCC, station 023402

2.1.3 Utilisation du territoire

La forêt couvre près de 70 % du territoire, alors que près du quart du bassin versant a une vocation agricole. La partie restante se divise notamment en zones urbaines (4 %), en plans d'eau (2 %) et en milieux humides (1 %). Notons que les zones commerciales, industrielles et urbaines sont « concentrées dans la Ville de Lévis et quelques noyaux urbains longeant la rivière Chaudière » (COBARIC, 2014).

2.1.4 Milieu humain

78 municipalités, regroupées en sept Municipalités régionales de comté (MRC), soient Les Appalaches, Beauce-Sartigan, la Nouvelle-Beauce, Le Granit, Les Etchemins, Lotbinière et Robert-Cliche et la Ville de Lévis (hors MRC), se trouvent sur le territoire du bassin. 179 000 habitants résident sur le territoire. Au cours des deux dernières décennies, la population a diminué en amont (-2 à -10 %), alors qu'elle a augmenté de plus de 20 % dans la Basse-Chaudière, c'est-à-dire, près de la Ville de Lévis. Dans Chaudière-Appalaches, la taille moyenne d'un ménage est de 2,3 personnes selon le dernier recensement (Statistiques Canada, 2016).

À l'instar de nombreuses régions administratives, l'économie de Chaudière-Appalaches est concentrée autour d'un noyau industriel axé sur les services (60 % du produit intérieur brut (PIB)). Le secteur de production de biens représente 40 % du PIB de la région, surtout lié à la fabrication (28 %), à la construction (7 %) et au secteur de l'agriculture, foresterie, pêche et chasse (4 %).

2.1.5 Description par secteurs géographiques du bassin versant

2.1.5.1 Secteur Haute-Chaudière

Localisation: Le secteur de la Haute-Chaudière débute au lac Mégantic et couvre la partie du bassin versant « jusqu'à la confluence de la rivière du Loup et de la rivière Chaudière, près du barrage Sartigan » (COBARIC, 2014). Ce secteur se rend pratiquement jusqu'à la municipalité de Saint-Georges. Il représente 45,8 % de la superficie totale du bassin.

Milieu physique: Il est nettement influencé par son appartenance à la région physiographique des Appalaches. Notamment, la pente du lit de la rivière est de 2,5 m/km, contre environ 0,5 m/km dans le secteur de la Moyenne-Chaudière. La Figure A.1, située en annexe, permet de constater cette dynamique dans le dénivelé de la rivière Chaudière: très important au début, puis un plateau d'eaux mortes marqué entre Saint-Georges et Scott, pour finament s'accentuer et se jeter du haut des chutes de la Chaudière vers le fleuve Saint-Laurent. Le secteur de la Haute-Chaudière se clôt avec un phénomène hydrologique important, influençant grandement l'aval: la rivière du Loup et toute l'eau du sous-bassin versant du même nom confluent avec la

rivière Chaudière à environ 1 km en amont du barrage Sartigan, légèrement en amont de l'apport important du sous-bassin de la Famine.

Utilisation du sol : Ce secteur a un visage fortement forestier (82 % du territoire). Les terres agricoles sont réparties sur 11 % du secteur et seulement 2 % sont habités. Les 5 % restants sont constitués de milieux humides (1 %), de lacs et cours d'eau (1 %) et occupations autres (3 %) (COBARIC, 2014).

Milieu humain: Ce secteur comporte la densité géographique la plus faible (9 habitants par km²).

2.1.5.2 Secteur de la Moyenne-Chaudière

Localisation: Le secteur de la Moyenne-Chaudière s'étend entre la confluence de la rivière Chaudière avec la rivière du Loup, jusqu'au méandre prononcé à Scott, en passant par les confluences des rivières Famines et Bras Saint-Victor. En termes de superficie, c'est le deuxième secteur en importance (40 % du territoire).

Milieu physique: Dans le piémont des Appalaches, le secteur de la Moyenne-Chaudière a la forme nette d'une plaine. Son tracé est plutôt linéaire, encadré d'une plaine inondable de plus d'une centaine de mètres de large, avec des bancs d'accumulation au sein du chenal principal.

Utilisation du sol : Le secteur se présente comme une transition entre les deux autres. La forêt occupe toujours une part très importante de la superficie (60 %), mais moins que dans le secteur en amont et plus que celui qui suit. De la même façon, les terres agricoles représentent environ 31 % du territoire, alors que les milieux urbains occupent plutôt 4 % du territoire (COBARIC, 2014).

Milieu humain: La densité de population y est plus importante que dans le secteur en amont, avec 37 habitants par km². Ce secteur compte plusieurs noyaux de population : les villes de St-Georges, Beauceville, Saint-Joseph-de-Beauce et Sainte-Marie.

2.1.5.3 Secteur de la Basse-Chaudière

Localisation: Le secteur de la Basse-Chaudière est le moins étendu (14,6 % de superficie totale). La rivière Beaurivage rejoint la rivière Chaudière dans la partie la plus en aval de la rivière, quelque trois kilomètres avant qu'elle dévale les chutes de la Chaudière et rejoigne le fleuve Saint-Laurent.

Milieu physique: La rivière est nettement plus large, sillonne dans un secteur plutôt plat, contrôlé par des seuils, dont le plus important est celui des chutes de la Chaudière, vis-à-vis l'autoroute 20.

Utilisation du sol: Les zones forestières ne représentent plus qu'environ 49 % de l'occupation du territoire alors que les terres agricoles en représentent 36 %. Les milieux humides viennent ensuite (7 %), suivis des zones urbaines (5 %).

Milieu humain: La densité de population y est la plus élevée de tout le bassin versant, à 78 habitants / km². Malgré le fait que les milieux urbains ne représentent encore qu'une faible proportion du territoire (Saint-Lambert-de-Lauzon, Saint-Nicolas, Saint-Rédempteur, Lévis), il existe des zones d'étalement urbain, dues à la proximité de grands centres.

2.1.6 Problématiques liées à la rivière Chaudière

2.1.6.1 Aléas fluviaux

Le bassin versant de la Chaudière, et plus particulièrement le secteur de la Moyenne-Chaudière entre Saint-Georges et Scott, est sujet aux inondations en eau libre et par embâcle de glace (MELCC, 2021a). D'autres aléas sont aussi identifiés et définis ci-dessous, mais moins documentés : érosion des berges, avulsion, cônes alluviaux. Dans ce projet, l'approche multialéa vise à tenir compte, au meilleur des connaissances disponibles, des effets de ces multiples aléas.

Inondations en eau libre dite « submersion »¹: Les inondations en eau libre font référence à une inondation causée par la hausse du niveau de l'eau dans une rivière, par exemple lors de périodes de crues éclair suivant de fortes précipitations ou lors de crues printanières avec la fonte des neiges et des glaces. Le paysage de la Chaudière est ajusté aux inondations dans un corridor de quelques centaines de mètres de large, qui constitue un espace de débordement naturel de la rivière, affectant des milieux agricoles, mais aussi en zones urbaines (Biron et coll., 2020). C'est particulièrement tangible dans la Moyenne-Chaudière, par exemple à Beauceville et Sainte-Marie (**Figure 4**). Cette contrainte est cartographiée par récurrence sur la majorité du territoire et inscrite au schéma d'aménagement de chacune des MRC du territoire. Toutefois, sa précision est variable (oui/non, vs. probabilité 50 %, 5 %, 1 %) et sa mise à jour est en cours par le gouvernement.

¹ Note : Puisque la submersion par embâcle n'a pu être modélisée, le terme « submersion » est utilisé de manière interchangeable dans le rapport pour signifier l'inondation en eau libre par processus de submersion ; il s'agit d'un terme technique mieux adapté.



Figure 4. Limites approximatives d'espace de liberté (en rouge) pour les secteurs de Beauceville (à gauche) et de Sainte-Marie (à droite) Source : Biron et coll., 2020

Inondations par embâcles de glace: Ces inondations résultent d'obstacles naturels ou humains créant « un amoncellement de glaces dans une section de rivière empêchant la libre circulation de l'eau » (MELCC, 2021b). En resserrant la capacité volumique du chenal (effet d'entonnoir), la rivière déborde en amont de l'embâcle. Depuis 1915, près d'une vingtaine d'inondations majeures sont survenues, auxquelles s'ajoutent des inondations mineures de plus en plus fréquentes (MELCC, 2021a). Selon le rapport de Morse et Turcotte (2018), le dommage annuel moyen historique associés aux évènements d'embâcles de glaces de 1991 à 2014 serait d'environ 890 000 \$. Actualisé sur 50 ans, la valeur des dommages espérés représenterait plus de 25 M \$.Les connaissances sur les embâcles s'améliorent, alors que plusieurs projets sont en cours (MSP, INRS, Université Laval, etc.). Sur l'ensemble du bassin, Chokmani et coll. (2020) ont produit un indice semi-quantitatif d'exposition pour chacun des segments hydrologiques homogènes de la rivière. Mais il n'existe pas de cartographie territoriale probabiliste. La récurrence est généralement interannuelle.

Érosion des berges, avulsion et cônes alluviaux: L'érosion des berges, les changements soudains du tracé de la rivière (avulsion) et la présence de dépôts sédimentaires en forme de cône à la sortie des reliefs en érosion (cônes alluviaux) sont peu documentés dans le bassin de la Chaudière. Toutefois, des indicateurs et témoignages (lors des activités consultatives) suggèrent que ces processus sont actifs dans la zone d'étude: des accumulations continues (voire accrues) en bancs dans le chenal principal, des berges sans végétation ni bandes riveraines et la présence de bras morts dans certains secteurs (par photointerprétation). Ces aléas sont difficiles à prévoir en raison du manque de connaissances. L'érosion et l'accumulation dans les cônes alluviaux se manifestent généralement sur une base annuelle continue, alors que les avulsions surviennent davantage lors d'épisodes torrentiels plus rares (fréquence interannuelle ou plus rare).

2.1.6.2 Causes principales des aléas fluviaux

Plusieurs phénomènes créent un bassin propice aux inondations et, plus particulièrement, aux abords du chenal principal de la rivière Chaudière.

Les caractéristiques géomorphologiques du bassin: Le secteur de la Moyenne-Chaudière agit comme un entonnoir pour l'eau provenant de la Haute-Chaudière et des sous-bassins versants de la rivière du Loup, de la rivière Famine et du Bras Saint-Victor. Ces tributaires ont des pentes assez élevées, réduisant les sections d'écoulement du lit mineur en aval. De plus, il y a peu de lacs pour amortir l'onde de crue » (MELCC, 2021a).

L'activité humaine accélérant les vitesses d'écoulement: Des pratiques dans divers secteurs favorisent l'écoulement du volume d'eau (précipitation, fonte des neiges) dans un temps plus court telles que les activités agricoles (créations ou linéarisation de cours d'eau agricoles et drainage surtout dans les secteurs de la moyenne Chaudière et Beaurivage), forestières (coupes à blanc, drainage et fossés forestiers), urbaines (imperméabilisation des surface), et développement du réseau routier (imperméabilisation, drainage). Ces pratiques contribuent à l'augmentation des débits dans la rivière Chaudière (TECSULT, 1994), provoquant une évacuation rapide des eaux vers la moyenne Chaudière, qui est un secteur plat à écoulement lent.

2.1.6.3 Historique des aléas

Inondations: Des témoignages d'épisodes d'inondations et d'embâcles sont répertoriés dans le bassin de la Chaudière depuis la colonisation, comme le révèle la base de données AQUARISC (Ouranos, 2015). Plus récemment, de tous les événements majeurs de sécurité civile recensés par le Ministère de la Sécurité publique (MSP) depuis le début des années 1980 dans le bassin versant, les inondations constituent l'aléa le plus problématique (60 % des événements) (Données Québec, 2020; **Figure 5**). Les municipalités les plus touchées par les inondations se trouvent majoritairement dans la Moyenne-Chaudière (Sainte-Marie: 13 % des inondations; Beauceville: 10 %; Vallée-Jonction: 7 %; Scott: 6 %), en sus de Lévis (9 %).

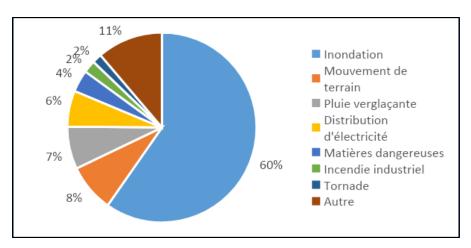


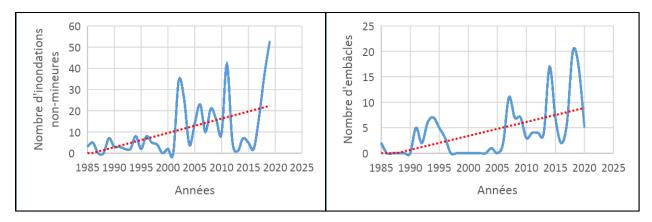
Figure 5. Distribution des événements de sécurité civile dans le territoire du bassin versant (1980-2020)

SOURCE DES DONNÉES : DONNÉES QUÉBEC : HISTORIQUE DES ÉVÉNEMENTS DE SÉCURITÉ CIVILE.

Embâcles: Du côté des embâcles dans la zone d'étude, la majeure proportion a été répertoriée sur la rivière Chaudière (62 % des événements recensés). La rivière Beaurivage arrive en seconde position, avec 13 % des embâcles.

Saisonnalité: Du point de vue de cycles annuels des inondations, 34 % des inondations ont eu lieu pendant le mois d'avril. En termes de proportion des inondations reçues, les mois de juillet (16 %), d'août (15 %) et d'octobre (10 %) suivent. Presque un embâcle sur deux s'est historiquement produit au mois d'avril (48 %), suivi des mois de mars (22 %), janvier (16 %) et février (13 %). En somme, le mois d'avril est le mois de l'année le plus critique, autant en termes d'embâcles que d'inondations en eau libre.

Tendance récente: L'analyse des données d'événements de sécurité civile permet de voir une évolution croissante du nombre d'inondations en eau libre et d'embâcles dommageables depuis 1985 (ligne pointillée rouge de la **Figure 6**). Il n'y a pas eu une seule année dans les 15 dernières où aucun des deux événements ne s'est produit.



Évolution du nombre d'inondations (gauche) et d'embâcles (droite) annuels (1985-2019)

SOURCE DES DONNÉES : DONNÉES QUÉBEC : HISTORIQUE DES ÉVÉNEMENTS DE SÉCURITÉ CIVILE.

2.1.6.4 Mesures techniques et technologiques de lutte contre les aléas fluviaux

Le problème des inondations en milieux urbains a d'abord été considéré avec la construction du barrage Sartigan en 1967, afin de retenir les glaces et le frasil de la rivière à cet endroit et d'empêcher la formation d'embâcle. Toutefois, « [un] petit réservoir s'est créé en amont du barrage, mais il contient si peu d'eau (1,7 m³) qu'il ne peut avoir d'influence significative sur la régularisation du débit de la rivière » (MELCC, 2021a). Conséquemment, le problème et les coûts des inondations persistent dans les municipalités (Biron et coll., 2020). D'autres aménagements ont aussi été mis sur pied : des murets et estacades à Beauceville et des murets et digues à Sainte-Marie.

<u>Un système automatisé de surveillance de la rivière Chaudière</u> est offert aux résidents et autorités administratives du bassin versant. Ce système permet de recevoir une alerte, soit dans une boîte courriel ou par messagerie texte, lors de variations importantes du niveau de la rivière Chaudière ou de ses affluents principaux. En tout, les données issues en temps réel de 16 stations hydrométriques sont exploitées et les notifications sont envoyées selon quatre échelons (surveillance, inondation mineure, inondation moyenne et inondation majeure), ce qui permet de mieux se préparer aux inondations (COBARIC, ssrc.cobaric.qc.ca).

2.2 HORIZON TEMPOREL

L'horizon temporel retenu pour cette étude est de 50 ans, soit de 2020 à 2070. Cet horizon est lié à un juste milieu entre une durée de vie réaliste des infrastructures rigides (30 à 50 ans), les projections climatiques (souvent jusqu'en 2100) et les perspective d'aménagement du territoire (15 à 20 ans). Ainsi, les scénarios d'adaptation considérés devront réduire les risques sur l'ensemble de la période. Dans les scénarios climatiques et économiques, deux sous-horizons temporels ont été utilisés: H1: les premiers 30 ans (2020-2050); et H2: les derniers 20 ans (2050-2070).

2.3 POPULATION D'INTÉRÊT

La population d'intérêt considérée pour l'estimation des coûts et des avantages des scénarios d'adaptation est la population et les autorités administratives des municipalités du bassin versant de la rivière Chaudière. Le choix se fait généralement sur la base des individus qui vont le plus bénéficier du projet. Dans ce cas-ci, la population et les autorités administratives œuvrant dans le bassin versant seraient les premières à bénéficier des mesures d'adaptation en vue de réduire les risques riverains.

2.4 PARAMÈTRES ÉCONOMIQUES

2.4.1 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 :

$$VAN = \frac{f_i}{(1+r)^i}$$

Où:

VAN: Valeur actualisée nette

f = flux monétaires (avantages ou coûts)

i : période à laquelle le flux monétaire est observé

r: 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, le taux d'actualisation choisi est régressif : de 4 % pour les premiers 30 ans, suivi de 2 % pour les derniers 20 ans. Il s'agit d'une approche recommandée par plusieurs auteurs, pour compte des générations futures (Montmarquette et Scott, 2007; Cropper, 2012; Gollier, 2011; Arrow et al., 2014). Puisque ce paramètre influence les résultats de l'ACA, une analyse de sensibilité avec un taux linéaire à 2 % et 6 % est réalisée pour vérifier si le résultat obtenu (soit la VAN) est robuste à un changement d'hypothèse.

2.4.2 Unité monétaire

Une autre hypothèse de cette étude est l'unité monétaire choisie, soit le dollar canadien de 2019. Il a été choisi en raison de la disponibilité des données économiques pour cette année de référence, notamment les valeurs foncières, mais aussi pour éviter la distorsion associée à l'année 2020 en raison de la pandémie.

2.4.3 Indicateurs économiques

Quant aux résultats de l'ACA, ils sont présentés à l'aide de la « valeur actualisée nette », soit la VAN. 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. Le ratio avantages-coûts (« ratio AC ») est aussi utilisé, lorsque cela est opportun, afin de présenter les résultats en terme relatif. Ceci permet généralement de favoriser les options les moins coûteuses parmi celles qui ont une VAN similaire.

En résumé, l'étude s'intéresse à l'ensemble du bassin versant de la rivière Chaudière, pour évaluer les solutions d'adaptation les plus avantageuses sur 50 ans du point de vue collectif, par une analyse économique de l'ensemble des coûts et avantages.

3. MOBILISATION DES PARTIES PRENANTES

La mobilisation des parties prenantes pour soutenir un dialogue constant lors du projet a permis, à chaque étape du projet, d'enrichir les travaux avec les préoccupations de la population d'intérêt et d'avoir accès aux données les plus près possible du site d'étude. Cette approche s'inscrit dans les <u>orientations stratégiques</u> <u>d'Ouranos</u>. Ce chapitre présente les rôles, la composition et les relations entre les groupes, la chronologie des activités et leurs retombées.

3.1 RÔLES, COMPOSITIONS ET RELATIONS ENTRE LES GROUPES

En sus d'un comité général de suivi de l'ensemble du projet (experts, représentants de certains ministères et bailleurs de fonds), les trois instances régionales de mobilisation étaient les suivantes :

- Le comité technique (CT): Au centre de la mobilisation des parties prenantes, le comité technique se compose de l'équipe de projet, soit des spécialistes d'Ouranos et du ROBVQ, du COBARIC et d'experts de l'université de Sherbrooke et de l'université Laval, et permet d'assurer la réalisation du projet.
- Le comité local de suivi (CLS) ²: Pour assurer un arrimage optimal aux initiatives et aux enjeux locaux, le CLS nourrit, appuie, conseille et oriente le CT. Il se compose de différents représentants d'unités administratives et d'initiatives majeures du territoire soient de deux MRC, de la ville de Lévis ou encore de la coordination du PRMHH Chaudière-Appalaches. Il valide et enrichit les choix méthodologiques et les hypothèses de l'analyse. Il agit comme porte d'entrée vers le milieu local afin de mobiliser l'instance de consultation.
- L'assemblée consultative de priorisation (ACP): Avec la participation de l'ensemble des membres de l'ACP, composé des aménagistes des 8 MRC et de 5 représentants municipaux, et grâce aux itérations assurées tout au long du projet avec le CLS, le processus de mobilisation et de consultation aura permis la définition et la caractérisation des mesures et des scénarios d'adaptation retenus pour la modélisation et l'analyse. De la même manière, les membres de l'ACP

² Initialement, l'étude de cas se concentrait sur Beauceville. Un élargissement à l'ensemble du bassin versant a été décidé en partenariat avec les parties prenantes et a occasionné une diversification des acteurs sollicités.

auront apporté plusieurs éléments intangibles nécessaires à une estimation de l'appréciation sociale relative à la mise en place potentielle des solutions étudiées.

Le **Tableau 1** précise la composition et le rôle des différents groupes d'intervenants dans le projet, alors que la **Figure 7** représente l'organigramme de projet.

Tableau 1. Composition des différents groupes d'intervenants et rôles de chacun d'entre eux, nombre de rencontres et retombées

Tableau 1. Composition des différents groupes d'intervenants et rôles de chacun d'entre eux, nombre de rencontres et retombées								
Structure régionale	Composition	Rôles	Nb. rencontres	Retombées				
CT – Comité Technique	 Ouranos (Modélisation économique, scénarios climatiques) COBARIC (Mobilisation, expertise terrain, géomatique) ROBVQ (Mobilisation, modélisation des niveaux d'eau) Université Sherbrooke (Modélisations hydrologique) UQAM (modélisation actuarielle) Université Laval (milieux humides) 	Assurer la coordination, la mise en œuvre et l'arrimage de chacune des composantes de l'étude	11	 Coordination Design de l'étude Production des résultats de modélisations Analyses 				
CLS – Comité Local de Suivi	 CRE Chaudière-Appalaches MRC Lotbinière/PRMHH Ville de Lévis MRC Nouvelle-Beauce Comité technique 	Accompagner la mobilisation et assurer le meilleur arrimage des hypothèses de travail aux réalités et attentes du territoire	5 (6 avec Beauceville)	 Validation des hypothèses et de la méthodologie Enrichissement méthodologique Choix sur la structure et la composition des groupes d'usagers pour l'ACP Validation des résultats et des choix pour la diffusion de ceux-ci 				
ACP – Assemblée Consultative de Priorisation	 MRC Lotbinière MRC Beauce-Sartigan MRC Les Appalaches MRC Les Etchemins MRC Le Granit MRC Robert-Cliche MRC de la Nouvelle-Beauce Lévis Saint-Victor Sainte-Clotilde-de-Beauce Sainte-Aurélie Saint-Alfred 	Transférer le savoir empirique, identifier et prioriser les solutions pouvant être mises en œuvre pour pallier à la problématique.	2	 Transmission de connaissances locales sur l'aléa et ses impacts Identification des éléments tangibles et intangibles complémentaires à inclure dans l'ACA Co-construction de mesures d'adaptation à considérer Priorisation des mesures pouvant être déployées 				

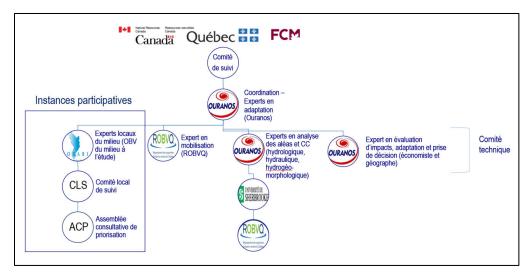


Figure 7. Organigramme de projet

3.2 CHRONOLOGIE DES ACTIVITÉS

La **Figure 8** représente la chronologie des principales rencontres composant le processus de mobilisation, de concertation et de co-construction. S'étalant sur trois ans, le projet a bénéficié des activités suivantes (voir aussi Annexe 2 pour la description détaillée des activités) :

- 6 réunions en comité local de suivi (CLS)
- 11 réunions en comité technique (CT)
- Une réunion hebdomadaire de l'équipe de projet (près de 120)
- 2 assemblées consultatives de priorisation (ACP), visant notamment la cartographie participative (**Figure 8**) et l'identification des préoccupations résiduelles et préférences relatives aux résultats.



Figure 8. Synthèse des rencontres et ateliers de mobilisation, concertation, co-construction et diffusion

3.3 RETOMBÉES

Les principales retombées de la mobilisation dans le cadre de cette étude ont été les suivantes :

- la confiance et le partage mutuel avec les acteurs du milieu concerné tout au long du projet
- l'identification des préoccupations
- la cartographie participative des impacts et scénarios d'adaptation (Figure 9)
- la calibration locale/régionale de fonctions d'impacts et l'accès aux données locales
- l'optimisation des solutions
- l'analyse résiduelle des intangibles et d'enjeux freinant la mise en œuvre de l'adaptation
- la priorisation des recommandations
- La sensibilisation des participants aux enjeux ainsi qu'au choix des solutions

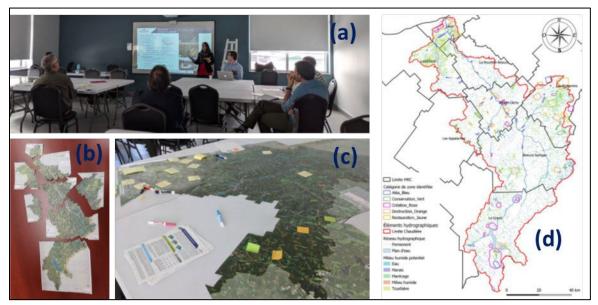


Figure 9. a, b, et c) Illustrations lors de l'activité de mars 2020 et d) exemple d'information issue la cartographie participative transposée dans un SIG

Également, un effort particulier a été déployé pour s'arrimer au processus de planification régionale de valorisation des milieux hydriques et humides (PRMHH) (**Figure 10**). En février 2021, un webinaire présentant les résultats préliminaires de l'ACA a soutenu l'adoption des objectifs de conservation des milieux hydriques et humides dans la mise à jour du plan directeur de l'eau (PDE) du COBARIC, ainsi que la démarche d'élaboration du PRMHH Chaudière-Appalaches.

Le PRMHH en 5 étapes – Contenu du plan

(Octobre 2019 à février 2022)

- 1. Préparation et amorce de la démarche
- 2. Portrait du territoire (oct. 2019 à mai 2020)
- 3. Diagnostic des MHH (déc. 2019 à fév. 2021)
- 4. Engagement de conservation des MHH (mars 2021 à sept. 2021)
- 5. Stratégie de conservation (août 2021 à décembre 2021)
- 6. Finalisation, approbation et adoption des plans (octobre 2021 à février 2022)

Projet ACA-FCM

(Juin 2019 à octobre 2020)

- Modélisation hydrologique et hydraulique

 MHH et climat futur (juin 2019 à mars 2020 – prolongé à juin 2020)
- 2. Mobilisation des parties prenantes (juin 2019 à juillet 2019)
- 3. Scénarisation des possibles plans de conservation et de restauration des MHH (juin 2019 à mars 2020)
- 4. Réalisation des ACA (mars 2020 à décembre 2020)
- 5. Diffusion des résultats (août 2020 à décembre 2020)

Figure 10. Arrimage des projets de PRMHH et d'ACA

En résumé, l'une des conditions de réussite du projet reposait sur l'implication active de l'ensemble des acteurs ciblés sur le territoire du bassin versant lors des activités du comité technique, du comité local de suivi et de l'assemblée consultative. Ces contributions ont maintenu la confiance et ont été bénéfiques à bien des égards. Elles contribueront certainement en cas de mise en œuvre des solutions d'adaptation.

4. 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'analyse et l'évaluation des risques. La section 4.1 présente la méthodologie basée sur l'approche multialéa. La section 4.2 aborde l'analyse des aléas, notamment la modélisation des débits en climat futur menée par les partenaires de l'Université de Sherbrooke (Leconte et Bizhanimanzar, 2020) et leur transformation en niveaux d'eau par une méthode géomatique (voir Annexe D). La section 4.3 examine l'exposition des actifs, activités et personnes à risque dans la zone d'étude, suivie d'une appréciation de la vulnérabilité (section 4.4). La section 4.5 conclut sur une appréciation multirisque des enjeux liés aux aléas fluviaux sur le bassin versant de la rivière Chaudière.

4.1 MÉTHODOLOGIE: L'APPROCHE MULTIALÉA

L'analyse de risque se base sur une approche multialéa (exposition à de multiples aléas qui évoluent dans le temps) avec changements climatiques. 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.

La liste des aléas identifiés (section 2.1) comprend l'inondation en eau libre, l'inondation par embâcles de glace, l'érosion des berges, l'avulsion (changement soudain du tracé du cours d'eau) et les cônes alluviaux (accumulation de sédiments au pied des versants). Ces phénomènes dépendent d'événements extrêmes d'écoulement de l'eau. Toutefois, les connaissances sur ces aléas varient à la fois en climat historique et futur et cela en limite la comparaison. Ainsi, les deux aléas assez fréquents et pour lesquels les connaissances sont avancées (inondations en eau libre et érosion des berges) ont été traités de manière probabiliste, alors que les autres ont été traités de manière qualitative et dans l'analyse de risque résiduel. Dans l'ensemble, le projet s'appuie sur une chaîne de modélisation hydrologique-géostatistique et hydrogéomorphologique, pour dénombrer les actifs, activités et personnes à risque, pour réaliser un portrait des risques (**Figure 11**).

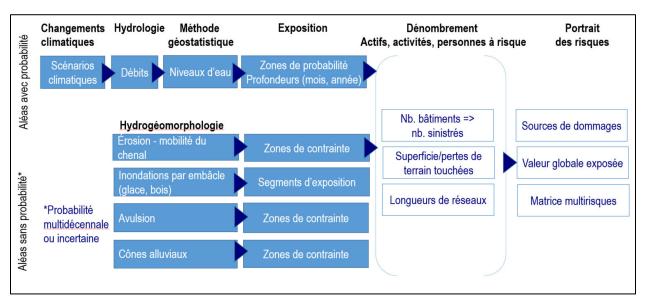


Figure 11. Résumé du processus d'analyse multirisque basé sur une chaîne de modélisation hydrologique-géostatistique et hydrogéomorphologique

4.2 ANALYSE DES ALÉAS

Cette section décrit l'analyse des inondations en climat futur, et des autres aléas fluviaux identifiés.

4.2.1 Inondations en climat futur

Cette section présente d'abord un résumé de l'analyse des débits en climat futur dans le bassin de la Chaudière. Ces travaux ont été réalisés par Leconte et Bizhanimanzar (2020), de l'Université de Sherbrooke, dont le rapport final est disponible publiquement. Ensuite, ces débits ont servi d'intrant pour la cartographie des submersions en climat futur par l'équipe de projet, dont la méthode et les résultats sont décrits.

4.2.1.1 Scénarios climatiques

Pour estimer les conditions en climat futur, des scénarios climatiques ont été produits basés sur des simulations des modèles climatiques régionaux (MCR). Les MRC ont été choisis pour la région d'étude relativement petite, puisqu'ils reproduisent des informations à une résolution spatiale de 12 à 50 kilomètres, soit plus fine que les modèles climatiques globaux (MCG). Les simulations ont été tirées de la base de données du projet CORDEX-NA (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment – North America), un effort international qui pilote les MRC avec les sorties

des MCG du projet CMIP5 (Coordinated Model Intercomparison Project Phase 5). L'ensemble de dix-neuf simulations climatiques utilisé inclut des projections de deux scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (GES) du GIEC (RCP – Representative concentration pathways): 1) le RCP 4.5 représente un futur avec une augmentation modérée des émissions des GES, suivi par une réduction, alors que 2) le RCP 8.5 représente un futur avec une augmentation continue des émissions de GES. Les simulations ont été post-traitées selon les meilleures pratiques par Ouranos (Rondeau-Genesse et Braun, 2020).

4.2.1.2 Méthode de modélisation hydrologique et géostatistique

Modélisation des débits

Cette étape visait à capter au mieux les effets 1) de chacun des complexes de milieux humides (de type connecté ou isolé) et 2) des changements climatiques sur le bilan hydrologique de la rivière Chaudière et 3) des scénarios d'adaptation sur les débits. Pour y arriver, un modèle hydrologique SWAT a été opérationnalisé. La calibration repose sur 5 secteurs observés (station hydrométrique, DEH) de manière séquentielle, afin de tenir compte de l'hétérogénéité des paramètres à l'échelle de l'ensemble du bassin versant (Haute-Chaudière, Moyenne-Chaudière, Basse-Chaudière, Famine et Beaurivage). Au total, 1064 sous-bassins versants structurent le réseau d'écoulement simulé depuis le MNT.

Pour l'analyse des milieux humides, des simulations de scénarios extrêmes (suppression entière par type de milieu humide – connecté ou isolé, puis de l'ensemble) dans les sous-bassins de la Beaurivage et de la Famine a permis d'évaluer les variations sur les probabilités de dépassement annuel (PDA – 50 %, 20 %, 10 %, 5 %, 1 % et 0,3 %). Les probabilités de dépassement annuel représentent la probabilité qu'un territoire soit inondé au cours d'une année donnée.

Pour les changements climatiques, les projections climatiques ont été entrées dans le modèle, afin de simuler les débits pour une période totale de 1955 à 2100. En concordance avec l'<u>Atlas hydroclimatique du Québec méridional</u> (MELCC, 2018) et les horizons temporels du projet (section 2.2), les mêmes (PDA) ont été calculées mensuellement pour trois horizons de temps (2021-2050, 2041-2070, et 2071-2100, référence: 1971-2000), pour les deux scénarios climatiques (RCP 4.5 et 8.5) et les 10° et 90° percentiles de 10 projections régionales de CORDEX-NA (sélectionnées pour représenter la distribution d'ensemble, voir Leconte et Bizhanimanzar, 2020). Ces opérations ont été répétées pour les divers scénarios d'occupation du sol agissant sur les débits (SQ, MHH_ACC; MHH_EFF – voir chapitre 5), portant le total à 651 simulations de débits, telles que rapportées à l'Annexe D.

Cartographie des niveaux d'eau

Le territoire de la rivière Chaudière a vu le déploiement de nombreux projets visant à appuyer la production de cartes des zones inondables afin de renforcer la sécurité des personnes en fournissant une information de qualité suffisante pour identifier les territoires à risque. Ces données ne sont toutefois pas encore toutes disponibles. Parmi ces projets, les travaux menés par l'Université de Concordia dans le cadre d'INFO-Crue (MELCC - 2018-2025) et faisant suite aux travaux d'évaluation préliminaire des risques d'inondation (EPRI-MSP) ont permis le développement et l'application d'une méthode de cartographie des inondations large échelle pouvant être déployée sur tout le bassins versants (Choné et coll., 2020). Pour y arriver, les données débitmétriques ont été converties en informations sur la submersion par une méthode géomatique.

La méthode repose sur l'hypothèse de relations linéaires entre hauteur et débit au sein des secteurs de modélisation de la DEH (atlas hydroclimatique) dont la longueur n'excède pas 12 km. Elle nécessite, en plus des données débitmétriques issues de la modélisation hydrologique, les données 1) de niveaux d'eau produites par l'Université de Concordia dans le cadre du projet INFO-Crue, 2) de débit (matrice) au centre du chenal du Lac Mégantic à l'exutoire de la rivière dans le Saint Laurent et- et 3) Une couche de polygones représentant la segmentation souhaitées et raisonnable pour considérer les relations débit-niveau linéaires (**Figure 12**). Les données lidar sont essentielles pour produire les informations de submersion et les couches intermédiaires (accumulation de flux, distances hydrologiques –bassin versant, ...)

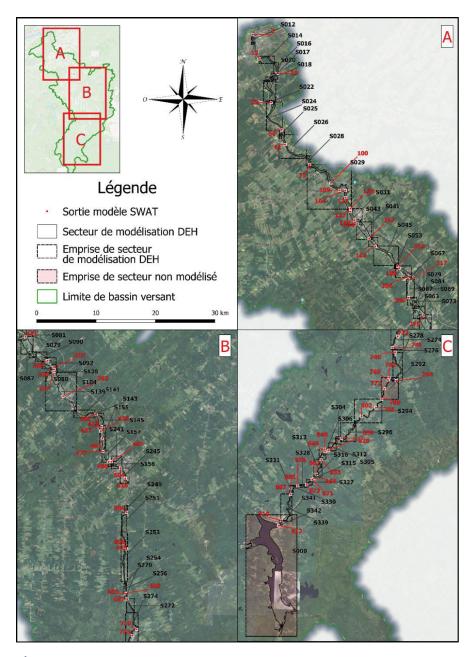


Figure 12. Segmentation de la modélisation

Cette méthode comporte de multiples avantages et inconvénients présentés ci-dessous.

Contourner l'absence de modélisation hydraulique : Il faut reconnaître que l'expertise la plus avancée repose sur des pratiques de modélisation hydraulique (ex. HEC-RAS). Toutefois, les efforts pour acquérir des données bathymétriques à l'échelle de l'ensemble du bassin versant n'étaient pas plausibles. Aussi, la méthode géomatique a été sélectionnée dans ce contexte d'analyse économique et dont les résultats ne visaient pas la réglementation. Elle permet d'éviter l'utilisation de données bathymétriques, normalement nécessaires en modélisation hydraulique 1D/2D pour

caractériser la section d'écoulement du lit mineur (lit traversé par le débit plein bord ; estimé à une récurrence 50 % (1:2).

Limite spatiale des niveaux avec changements climatiques: Au moment de l'étude, seules les données de niveaux d'eau sur le chenal principal de la Chaudière étaient disponibles. En conséquence, sur le reste du territoire (les affluents, Famine, Beaurivage), les dénombrements liés à l'inondation en eau libre sont considérés relativement aux cartographies inscrites aux schémas d'aménagement. Cela introduit un biais conservateur du dénombrement et une analyse de sensibilité a permis de tester la robustesse des résultats face à cette incertitude.

Contourner l'enjeu du calcul sur tout un bassin versant: La méthode est considérablement moins lourde qu'un approche hydraulique classique du point de vue des ressources informatiques et du temps nécessaire à la production des modèles hydrauliques, de leur calibration et de leur fonctionnement (calcul). Ceci dit, même avec cette méthode rapide et la priorisation du chenal principal, la capacité de calcul informatique en géomatique a représenté un facteur limitant dans la production des résultats. Cette contrainte a entraîné une réduction nécessaire de la résolution du Lidar à 2m x 2m afin d'accélérer le temps de calcul.

Validité des relations locales hauteur / débit : L'hypothèse principale de la méthode s'appuie sur l'existence de relations linéaires et donc l'inexistence de phénomènes de turbulence, voire d'hystérésis. La méthode large échelle (hydraulique inverse) lisse dès son application ces phénomènes de non stationnarité aussi il est apparu raisonnable et conservateur de considérer cette hypothèse valide suite à la réutilisation des couches produites par l'Université de Concordia. De rapides calculs de comparaison ont fourni des résultats satisfaisants de l'ordre de quelques centimètres de différence sur la plaine inondable par rapport aux données d'entrée. Faute de temps, l'analyse de sensibilité n'a malheureusement pas pu être effectuée sur la méthode.

4.2.1.3 Résultats

Rôle des milieux humides

Contribution importante des milieux humides dans la régulation des écoulements :

Les simulations de scénarios extrêmes sur certains sous-bassins (Beaurivage et Famine), soit la suppression par catégorie puis de tous les milieux humides a permis de mettre en avant le rôle extrêmement important que jouent ces derniers. En effet, ils font varier de 31 % à 42 % les valeurs de débits de récurrence 2 ans, et 33 % à 53 % des valeurs de débits de récurrence 100 ans. Ainsi, dans l'ensemble, la présence des milieux humides influence grandement les débits des sous-bassins Beaurivage et Famine.

Des milieux humides riverains pour réduire les débits de pointe: Par ailleurs, la destruction de l'ensemble des milieux humides entraîne une augmentation des débits de pointe (variation de débits à l'échelle des heures). Une majorité de l'augmentation de ces débits de pointe s'explique par le rôle des milieux humides riverains en particulier. Suivant la destruction de ces milieux, la relation entre la variation de débits et de récurrence dépend cependant de leur emplacement, des superficies considérées, mais aussi des caractéristiques du sous-bassin versant luimême (physiographie, géologie, couverture végétale, etc.).

Des milieux humides forestiers pour réduire les événements extrêmes: Du côté des milieux humides isolés, souvent situés en milieu forestier, leur destruction induit une augmentation des débits événements extrêmes. Cela reflète la perte de leur capacité de stockage. Pour une récurrence de 50 % (1:2), environ 7 % d'augmentation des débits est induite par cette destruction, alors que pour une récurrence de 1 % (1:100), environ 5 % d'augmentation des débits est induite par cette destruction. La différence s'explique par le facteur du volume de ruissellement (faible pour 1:2, fort pour 1:100). Cela souligne que la capacité de stockage des milieux isolés dans le bassin est ajustée pour contenir les événements extrêmes interannuels, mais peu pour les événements extrêmes de plus grande envergure. Plus de détails sur le rôle des milieux humides dans la régulation des écoulements saisonniers sont fournis dans le rapport (Leconte et Bizhanimanzar, 2020, pages 43 à 46).

Des arguments pour des corridors riverains et la protection

Un autre paramètre important étudié dans le cadre de ces scénarisations préalables aura été celui de la localisation des milieux humides vis-à-vis de l'exutoire des bassins versants. Les relations mises en évidence sont complexes, mais cohérentes vis-à-vis de la littérature. Ainsi la création d'une unité de milieu humide isolé aura plus d'impact sur la réduction du débit de pointe que celle d'un milieu humide connecté, d'autant plus si elle est créée en aval hydraulique des sous bassins versants de tête, avant les secteurs vulnérables. Les milieux humides connectés voient une efficacité croissante sur la réduction du débit à mesure qu'ils sont placés sur un cours d'eau d'ordre inférieur (chenal principal). Un autre avantage est que ces milieux peuvent réduire les vulnérabilités en augmentant les espaces naturels en bordure de cours d'eau et donc en réduisant l'occupation humaine.

En somme, ces résultats renforcent les arguments pour 1) l'instauration de bandes riveraines et milieux humides aux abords du chenal principal et ses affluents majeurs et 2) la protection ou restauration des milieux humides en aval des sous bassins de tête, dans la moyenne et la basse Chaudière.

Impacts anticipés des changements climatiques

Augmentation du débit de pointe maximal instantané: Selon le modèle, les changements climatiques entraînent une augmentation des débits de pointe d'au minimum une dizaine (en amont) à plusieurs dizaines de m³/s (Moyenne et Basse-Chaudière) de 2021 à 2050 (**Figure 13**; **Figure 14**). Cette tendance se poursuit dans l'horizon H2 (2041-2070).

Devancement des crues printanières, particulièrement pour 2021-2050: L'analyse suggère un signal clair sur le devancement des crues printanières: de la fin avril actuellement, elles apparaîtront plutôt dans la première quinzaine d'avril (**Figure 13**). Ceci est relié au réchauffement des températures, en particulier hivernales.

Augmentation des débits hivernaux en Moyenne et Basse-Chaudière: Les débits hivernaux seront aussi plus importants aux horizons futurs (H1:2021-2050, H2:2041-2070), particulièrement marqué dans le secteur de la Moyenne et de la basse Chaudière, soient les secteurs les plus vulnérables aux inondations (**Figure 13**).

Efficacité des scénarios d'adaptation

Ces résultats sont traités dans l'efficacité des scénarios présentés au chapitre 5 et à l'annexe D.

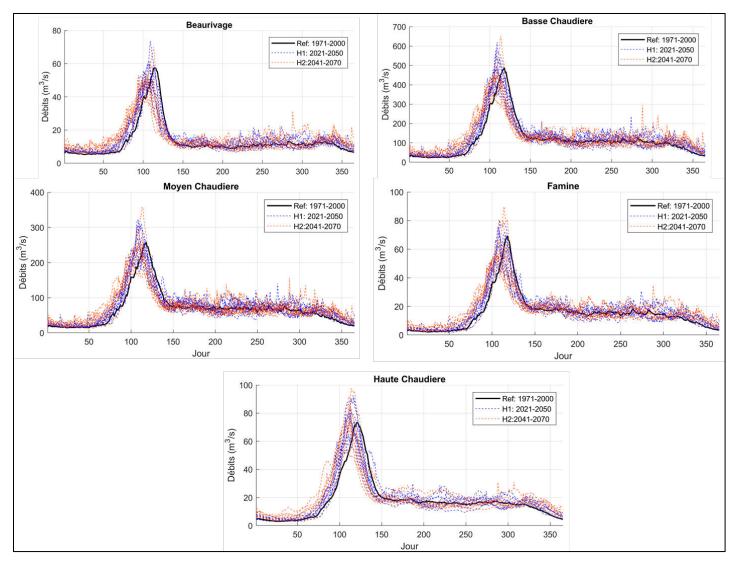
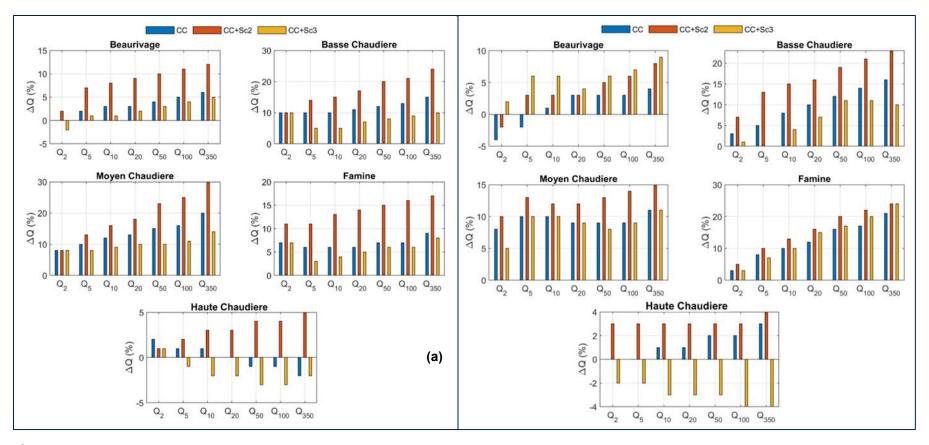


Figure 13. Effet des changements climatiques sur le régime hydrologique de la rivière Chaudière (tous scénarios et modèles confondus)

Source : Leconte et Bizhanimanzar (2020) _Note : le 100ème jour est le 10 avril.



Analyse fréquentielle des crues, selon l'horizon (a) Horizon 1 : 2021 à 2040; (b) Horizon 2 : 2041 à 2070, pour le bassin de la Chaudière (tous scénarios et modèles confondus)

Source : Leconte et Bizhanimanzar (2020)

En résumé, la réduction des milieux humides augmenterait les débits de pointe de manière significative, et l'ajout de milieux isolés autant que riverains (surtout en aval) offre un potentiel pour réduire les événements extrêmes, quoique limité. D'un autre côté, les changements climatiques, surtout par des changements dans la dynamique saisonnière, augmenteront les débits de pointe

4.2.2 Autres aléas fluviaux non probabilistes

Les aléas d'avulsion, de cônes alluviaux et d'embâcles ont causé des dommages par le passé dans la zone d'étude. La manifestation de ces aléas est reliée aux événements hydrométéorologiques extrêmes, mais les connaissances ne permettent pas d'associer les PDA aux aléas. Leur cartographie étant inexistante, le dénombrement des actifs, activités et personnes à risque n'est pas possible. Une analyse qualitative de ces risques résiduels permettra de vérifier la concordance des recommandations avec la présence de ces aléas

4.3 EXPOSITION DES ACTIFS AUX ALÉAS

Le seul aléa avec suffisamment de connaissances pour faire l'objet d'un dénombrement est la submersion. Il s'agissait de mesurer l'exposition des infrastructures, terrains et bâtiments qui se trouvent actuellement dans les zones inondables, basées sur la cartographie des zones de contrainte des schémas d'aménagement et de développement des organismes municipaux. Ainsi, ce dénombrement n'inclut pas l'effet des changements climatiques. Pour synthétiser ce dénombrement, les zones inondables sont segmentées en quatre régions : le chenal principal de la rivière Chaudière, le bassin-versant de la rivière Famine, le bassin-versant de la rivière Beaurivage et un regroupement de l'ensemble des autres affluents du chenal principal. La valeur des actifs est basée sur les évaluations foncières de 2019, tandis que les routes sont dénombrées, mais non monétisées. La **Figure 15** et le **Tableau 2** présentent les actifs exposés à la submersion par régions d'intérêt dans le bassin de la rivière Chaudière, ainsi que les valeurs associées à ces actifs.

Dans la zone d'étude, un total de 5134 hectares et 1389 bâtiments sont exposés à la submersion, représentant une valeur totale de 273,8 M\$ à risque, dont la vaste majorité se trouve dans les zones inondables du chenal principal (86 % ou 235 M\$, Figure 15). L'enjeu dominant provient du secteur résidentiel (42 % des actifs), avec un total de 972 résidences, soit environ 2235 sinistrés potentiels (Tableau 2).

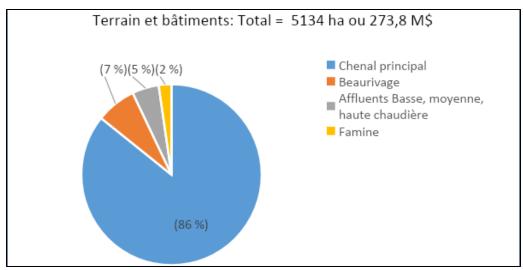


Figure 15. Répartition de la valeur des actifs à risque de submersion, par régions d'intérêt dans le bassin de la rivière Chaudière

Tableau 2. Dénombrement et valorisation des actifs à risque d'inondation, par régions d'intérêt dans le bassin de la rivière Chaudière

Actifs exposés à la submersion, en zone inondable	Chenal principal	Bassin versant de la rivière Famine	Bassin versant de la rivière Beaurivage	Autres affluents	Total		
Superficie totale (ha)	941	495	1 068	2 630	5134		
Valeur totale (bâtiments)	224 113 700 \$	3 672 000 \$	9 463 400 \$	3 195 700 \$	240 444 800 \$		
Valeur totale (terrains + bâtiments)	234 758 734 \$	6 253 257 \$	19 665 027 \$	13 128 244 \$	273 805 263 \$		
Agricole							
Terrain – prod. animale	95	7	35	38	175		
Terrain – prod. végétale	58	10	17	81	166		
Terrains – autres	105	10	82	25	222		
Valeur – Agricole	3 425 183 \$	1 645 323 \$	9 408 196 \$	7 470 105 \$	21 948 808 \$		
Forestier & exploitation minière							
Nombre de terrain	31	1	17	66	115		
Superficie des terrains	90	9	38	304	441		
Valeur – For. et Min.	222 975 \$	26 664 \$	142 428 \$	948 163 \$	1 340 229 \$		
Terrain vague							
Nombre de terrain	395	37	87	67	586		
Superficie des terrains	221	16	26	42	305		
Valeur – terrains vacants	6 996 876 \$	909 271 \$	651 003 \$	1 602 195 \$	10 159 345 \$		
Résidentiel							
Nombre de terrain	1275	79	485	176	2 015		
Nombre de bâtiments	804	30	89	49	972		
Valeur – Résidentiel	102 581 900 \$	1 552 100 \$	7 976 800 \$	2 871 700 \$	114 982 500 \$		
Commercial, restauration, hébergement, services							
Nombre de terrain	25	2	3	6	36		
Nombre de bâtiments	138	1	3	0	142		
Valeur – Commercial	51 473 200 \$	10 600 \$	183 900 \$	0 \$	51 667 700 \$		

Actifs exposés à la submersion, en zone inondable	Chenal principal	Bassin versant de la rivière Famine	Bassin versant de la rivière Beaurivage	Autres affluents	Total			
Nombre de terrain	9	4	0	5	18			
Nombre de bâtiments	7	2	0	0	9			
Valeur – Industriel	9 220 800 \$	1887 000 \$	0\$	0\$	11 107 800 \$			
Institutionnel				,				
Nombre de terrain	3	0	0	0	3			
Nombre de bâtiments	15	0	0	0	15			
Valeur – Institutionnel	9 105 000 \$	0\$	o \$	0\$	9 105 000 \$			
Patrimoine								
Nombre de terrain	5	2	26	8	41			
Nombre de bâtiments	187	3	7	2	199			
Valeur - Patrimoine	22 933 600 \$	222 300 \$	1 229 200 \$	302 600 \$	24 687 700 \$			
Parc et récréation					<u> </u>			
Nombre de terrain	15	0	0	8	23			
Nombre de bâtiments	16	0	0	1	17			
Valeur - Récréatif	24 824 600 \$	0\$	0\$	21 400 \$	24 846 000 \$			
Transport et infrastructure								
Nombre de terrain	60	0	3	0	63			
Nombre de bâtiments	32	0	3	0	35			
Valeur - Transport	3 974 600 \$	0\$	73 500 \$	0\$	4 048 100 \$			
Réseau routier et ferroviaire (km)								
Routes municipales	42	3	2	8	55			
Routes provinciales	15	1	0	5	21			
Autres routes	0	1	1	5	6			
Chemin de fer	1	0	0	0	1			
Total - Transport	58	4	3	18	83			

4.3.1 Résultats par type d'actifs

- Résidentiel: Avec une valeur totale de 115,0 M\$, l'enjeu résidentiel domine le dénombrement dans le bassin versant de la Chaudière. Il s'agit de 972 bâtiments (excluant ceux déjà délocalisés en date d'octobre 2020), soit un équivalent de plus de 2235 personnes exposées. Parmi les ménages concernés, 83 % se situent aux abords du chenal principal (ou 102,6 M\$), puis dans le bassin versant de la Beaurivage (9 % ou 8,0 M\$)
- Agricole: Les terres agricoles exposées totalisent 1540 ha et une valeur de 21,9 M\$. Le secteur agricole est particulièrement à risque dans le bassin versant de la rivière Beaurivage et aux abords des autres affluents du chenal principal (excluant la rivière Famine). Pour le bassin de la rivière Beaurivage, près des deux tiers (62 %) de la superficie des zones inondables est d'occupation agricole, représentant une valeur à risque de 9 M\$, soit près de la moitié (48 %) de la valeur des actifs à risque dans ce bassin. Pour les autres affluents, les terrains agricoles représentent 20 % des superficies en zone inondable, d'une valeur de 7,5 M\$.
- Commercial, industriel et institutionnel: Ces trois catégories comprennent 166 bâtiments (71,9 M\$), dont la vaste majorité (96 %) est située aux abords du chenal principal. Parmi ces derniers, plus de 4 bâtiments sur 5 (83 %) est un commerce. Parmi les terrains et bâtiments institutionnels, on retrouve notamment trois écoles primaires (deux à Sainte-Marie et une à Scott), ainsi que deux bâtiments institutionnels qui pourraient être stratégiques dans la gestion des urgences (Hôtel de ville de Sainte-Marie, salle communautaire de Notre-Dame-des-Pins).
- Transport: Aux abords du chenal principal, environ 57 km de réseau routier et plus d'un kilomètre de réseau ferroviaire se situe en zone inondable. Plus de sept kilomètres sur dix font partie du réseau municipal et 20 % étant de juridiction provinciale dans cette région (Figure 16). Les zones inondables des bassins de la rivière Famine et Beaurivage totalisent respectivement 4,1 et 3 km de réseau routier à risque, avec une prédominance pour les routes municipales. Le regroupement des zones inondables des autres affluents totalise 18 km de routes à risque. La proportion des routes municipales (43%) est moindre que le long du chenal principal, tandis qu'une part importante du réseau est constitué d'autres types de routes (38 %).
- Patrimonial, récréotourisme et autres : 199 bâtiments désignés ou à potentiel patrimonial se situent en zones inondables, cumulant une valeur foncière de 24,7 M\$. Parmi ceux-ci, 187 se localisent aux abords du chenal principal. Du côté récréotouristique, on dénombre 23 terrains et 17 bâtiments d'une valeur de 24,8 M\$, situés presque en zone inondable du chenal principal. Aussi, près de 3 km de piste cyclable (Route verte et Sentier jarrets noirs) sont exposés, mais leur valeur n'a pas été quantifiée. Les terrains vagues occupent une bonne partie de la superficie à risque le long du chenal principal (23 %). Le total des terrains vagues exposés représente pas moins de 10,2 M\$, toutes régions confondues.

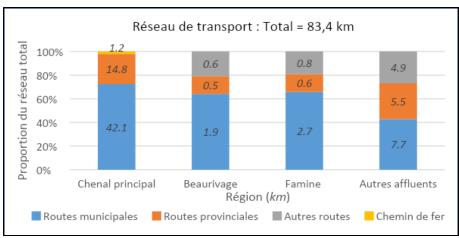


Figure 16. Dénombrement du réseau routier et ferroviaire à risque de submersion, par région d'intérêt dans le bassin de la rivière Chaudière

4.3.2 Résultats par régions d'intérêt dans le bassin de la rivière Chaudière

La répartition de la valeur des actifs par région est rapportée dans la **Figure 17** et la **Figure 18**.

- Chenal principal de la Moyenne et la Basse-Chaudière: La valeur totale des actifs exposés est de 234,8 M\$ aux abords du chenal principal. Les secteurs résidentiel (44 %) et commercial (22 %) représentent plus de 150 M\$. Suivent les bâtiments patrimoniaux et les terrains récréotouristiques (environ 10 % chacun). Le secteur agricole représente 3 M\$ d'actifs à risque.
- Bassin versant de la Beaurivage: La valeur totale des actifs à risque est de 19,7 M\$ dans le sous-bassin de la Beaurivage. L'enjeu agricole domine, avec 48 % des valeurs (9,4 M\$). L'enjeu résidentiel suit de proche avec 41 % des valeurs (8,0 M\$), en particulier dans le secteur de Saint-Étienne.
- Bassin versant de la rivière Famine: La valeur totale des actifs à risque est de 6,3 M\$ dans le sous-bassin de la rivière Famine. Les valeurs se répartissent en trois enjeux principaux: le secteur industriel (30 % ou près de 2 M\$), agricole (26 % ou 1,6 M\$) et résidentiel (25 % ou 1,6 M\$).
- Autres affluents: La valeur totale des actifs à risque est de 13,1 M\$ dans les régions des affluents. Les actifs agricoles à risque prennent des proportions notables (7,5 M\$, soit 57 % des valeurs) dans ces régions. Les actifs résidentiels occupent près du quart des valeurs exposées (22 %), alors que les terrains vagues et forestiers ou miniers cumulent 19 %. Cette région compte la plus forte proportion de secteur forestier et minier (près de 1 M\$ ou 7% des actifs de cette région).

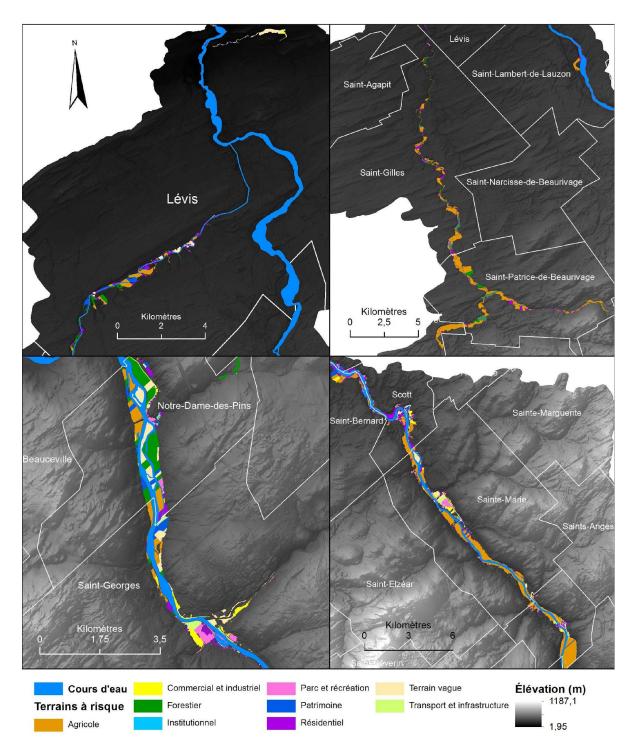


Figure 17. Localisation des actifs à risque pour a) Saint-Étienne (rivière Beaurivage) et Lévis, b) Saint-Gilles et Saint-Patrice (rivière Beaurivage), c) Saint-Georges à Notre-Dames-des-Pins (chenal principal) et d) Vallée-Jonction à Scott (chenal principal)

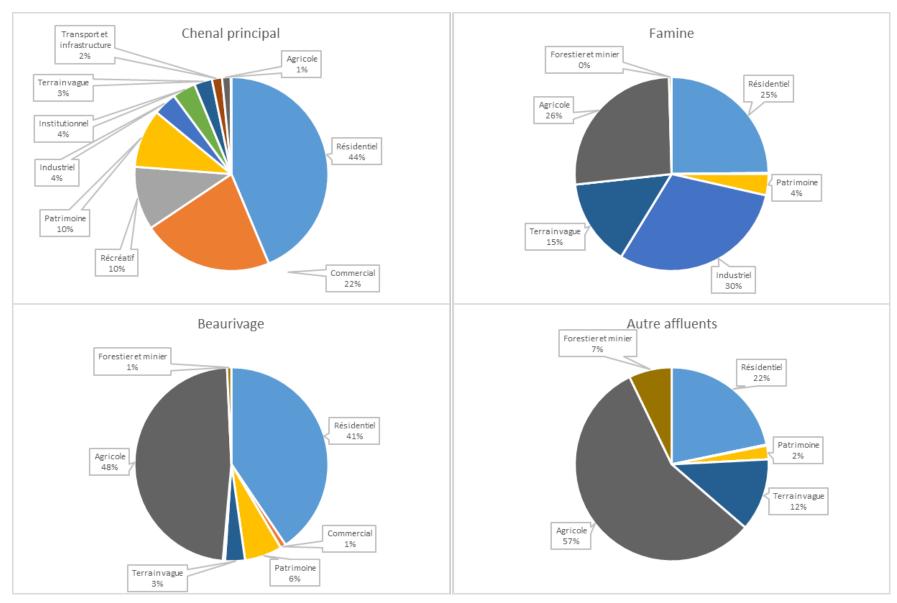


Figure 18. Répartition de la proportion de la valeur totale des actifs, selon le type d'usage et le secteur géographique

4.4 VULNÉRABILITÉ AUX IMPACTS DES ALÉAS

L'analyse de la vulnérabilité aux aléas fluviaux du bassin versant de la rivière Chaudière se base sur les indices répertoriés par l'<u>Atlas de la vulnérabilité aux aléas hydroclimatiques de la population québécoise</u> (Barette et coll.) pour les 203 aires de diffusion statistiques (AD) qui couvrent le bassin versant. La vulnérabilité se définit selon l'Atlas comme une fonction de la sensibilité des aires de diffusion socioéconomiques et de sa capacité à faire face aux aléas. Les tableaux détaillés se situent en Annexe 2.

4.4.1 Sensibilité socio-économique

La sensibilité socio-économique repose principalement sur l'âge des résidents, le taux d'emploi, et le revenu des ménages. Selon l'Atlas de vulnérabilité, dans les AD qui se trouvent le long du corridor de la rivière Chaudière, ce sont 24% de ce territoire qui présentent une sensibilité forte ou très forte (**Figure 19**). Ce corridor a une sensibilité qui excède de beaucoup celle de l'ensemble du bassin versant (6 % des AD ont une sensibilité forte ou très forte).

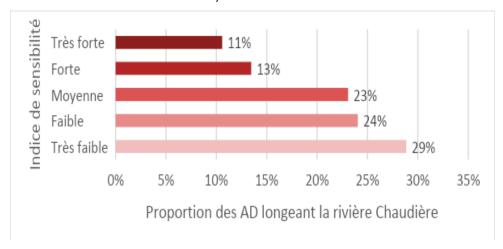


Figure 19. Distribution des indices de sensibilité aux aléas hydrométéorologiques, AD longeant la Chaudière

• Une forte sensibilité sociale: Plusieurs facteurs accentuent la sensibilité des populations aux aléas fluviaux bordant la rivière Chaudière: 1) l'âge: une personne sur quatre (26 %) est d'âge sensible (enfants et personnes âgées); 2) l'éducation: une proportion équivalente n'a aucun certificat, diplôme ou grade (25 %); 3) une personne sur trois (33%) vit seule et près de 16 % des ménages sont composés de familles monoparentales. Les deux facteurs qui atténuent la sensibilité sont la faible proportion de personnes immigrantes récentes (0,42 %) et la faible proportion de personne ne connaissant pas une langue officielle (0,09 %).

- Une forte sensibilité physique: Trois paramètres créent rehaussent l'indice de sensibilité: 30 % des individus se trouvent dans un logement locatif et près d'une résidence sur deux (47 %) a été construite avant 1975; certaines aires de diffusion voient cette proportion aussi élevée que 98 %. De plus, une résidence sur 20 (4,91 %), en moyenne, a besoin de rénovations majeures.
- Une faible capacité financière: Avec plus d'une personne sur trois (34 %) qui ne fait pas partie de la population active, près de 17 % des locataires utilisant 30 % ou plus du revenu du ménage à l'habitation et une personne sur sept qui se trouve dans une situation de faibles revenus, les communautés seront financièrement affectées de façon criante par les aléas. La proportion maximale de personnes à faible revenus atteint presque 6 personnes sur 10 (57%) au sein du corridor principal de la rivière dans certaines AD.

Il existe une grande hétérogénéité dans ces indicateurs, mais les foyers urbains sont les principaux secteurs sensibles (voir aussi Annexe E).

4.4.2 Capacité à faire face

La capacité à faire face lors d'intervention peut être évaluée selon la distance aux infrastructures d'urgence, tels les établissements de santé, casernes des pompiers ou postes de police. Selon L'Atlas de Vulnérabilité, la capacité à faire face est faible à très faible sur 76 % (155 sur 203 AD) du territoire : 155 des 203 AD du bassin (76%) et elle est équivalente dans le corridor aux abords de la rivière Chaudière (74 %) (**Figure 20**).

• L'éloignement des services d'urgence : Pour les communautés bordant la rivière, la distance d'un poste de police (en moyenne de 7 km, max. 25 km) et celle d'un centre hospitalier (en moyenne 18,5 km, max. près de 44 km) sont les deux critères qui diminuent la capacité de faire face. De plus, cet éloignement des centres hospitaliers n'est pas particulièrement compensé par l'accessibilité à d'autres établissements de santé (en moyenne à plus de 5 km). La proximité des casernes de pompiers et les pharmacies (toutes deux en moyenne à plus de deux kilomètres) atténuent le portrait.

Ainsi, l'étalement de la population sur le territoire, propre aux communautés situées en dehors des grands centres au Québec, crée un éloignement face aux services essentiels pour faire face aux inondations.

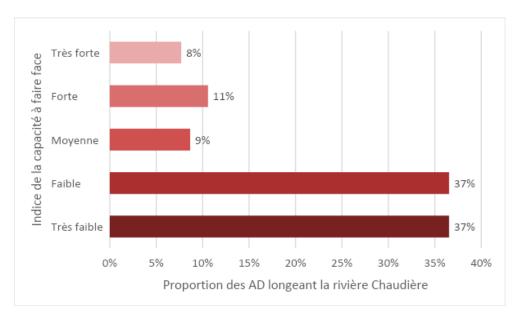


Figure 20. Distribution des indices de capacité à faire face aux aléas hydrométéorologiques, AD longeant la Chaudière

Cependant, les auteurs de l'Atlas soulignent que cette analyse est limitée, l'enjeu étant souvent la disponibilité des données pour bien évaluer cette capacité à faire face. La définition de capacité à faire face devrait être élargie pour y inclure d'autres caractéristiques propres au territoire et des facteurs de résilience souvent invoqués dans la littérature.

- L'expérience institutionnelle des autorités du bassin versant à répondre aux aléas fluviaux, en particulier face à la régularité des inondations en eau libre ou par embâcle, ainsi que la réglementation provinciale en vigueur des mesures de secours minimaux lors d'urgence (centre d'hébergement, système d'alerte, plans particulier d'urgence pour les inondations), rehaussent la capacité à faire face.
- Les mesures de traitement de risque technique ou technologique déjà en place : des barrages, murets, et estacades et mesures technologiques (systèmes d'alerte et d'information) ont été mis sur pied atténuer les conséquences et contribuent à la capacité à faire face (voir section 2.1.6.4).
- La résilience naturelle de l'écosystème: près de la moitié des rives de la rivière Chaudière ont un indice de qualité de bande riveraine de moyennes à excellente, permettant de diminuer l'exposition et la vulnérabilité des terres et activités lors de crues élevées (Pépin, 2016).

4.5 MATRICE MULTIRISQUE

4.5.1 Méthodologie

La matrice de risque est un outil classique en gestion de risque qui vise à prioriser les enjeux selon le degré de probabilité et le degré de conséquences (ex. ISO 31000:2018). Les seuils de ces deux axes sont exprimés au **Tableau 3** et les niveaux de risques au **Tableau 4**. En l'absence de directive d'aménagement provinciale, les seuils de probabilités (%) ont été arrimés aux principes de gestion du territoire basé sur l'exposition ayant cours depuis le plan d'action en matière de sécurité civile relatif aux inondations du MSP (2018) et du Plan de protection du territoire face aux inondations 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 indicateur de dénombrement pour les autres (ex. routes). Pour les actifs exposés aux aléas non-probabilistes, comme les cônes alluviaux, les probabilités sont considérées faibles et homogènes, basés sur les témoignages recueillis. 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 qui se compareraient à l'échelle provinciale.

Tableau 3. Seuils des probabilités et conséquences de la matrice multirisque

Probabilité	Conséquences
Faible: <1 % (< 1:100)	Mineures : < 10% actifs exposés
Moyenne: 1-5 % (1:20-1:100)	Modérées : 10-25% actifs exposés
Forte : >5 % (> 1:20)	Sévères: >25% actifs exposés ou infrastructures
	essentielles

Tableau 4. Niveaux de risque selon les combinaisons de probabilité et conséquences

Niveau de risque	Probabilité	Conséquences	
I. Faible	Faible	Mineures	
	Faible	Modérée	
II. Modéré	Faible	Sévères	
II. Modere	Moyenne	Mineures	
	Forte	Mineures	
	Moyenne	Modérées	
III. Important	Moyenne	Sévères	
	Forte	Modérées	
IV. Majeur	Forte	Sévères	

4.5.2 Résultats

La matrice multirisque est présentée au Tableau 5

Risques majeurs: L'analyse suggère que l'enjeu prioritaire de plus fort risque est la zone riveraine aux abords du chenal principal et en particulier le secteur résidentiel, qui est non seulement exposé aux inondations en eau libre, mais aussi à certains endroits aux inondations lors d'embâcles de glace et parfois à l'érosion des berges. Ce secteur, longeant en bonne partie la rivière, est le siège de conséquences importantes pour la communauté, tant du point de vue économique (ex. pertes de revenus) que social (ex. stress). Le secteur industriel à l'embouchure de la rivière Famine est aussi concerné par cette priorité. Le secteur agricole est aussi exposé à de fortes conséquences dans les régions du chenal principal, de la Famine et de Beaurivage (seuil >25 % des actifs exposés). Enfin, 3 écoles primaires et certains bâtiments institutionnels essentiels (ex. hôtel de ville Sainte-Marie) se trouvent exposés aux inondations.

Risque important: Aux abords du chenal principal, les secteurs commercial et récréatif occupent une part intermédiaire du dénombrement (10-25 % des actifs), mais la forte probabilité d'occurrence de l'aléa génère un risque important. De même, dans le secteur des affluents, l'enjeu résidentiel occupe une part intermédiaire du dénombrement avec une forte probabilité d'occurrence. Enfin, malgré les limites des connaissances, certaines zones d'étendue restreinte et à forte probabilité d'occurrence aux embâcles de glace présentent un risque considéré important. La poursuite de l'acquisition de connaissances raffinera cette évaluation.

Risque modéré: Le secteur patrimonial, toutes régions confondues, représente un enjeu faiblement dénombré, mais exposé aux inondations de forte probabilité d'occurrence. Dans cette catégorie se retrouvent aussi le secteur industriel et des zones agricoles aux abords du chenal principal. L'aléa d'érosion des berges a une probabilité inconnue, mais a le potentiel d'avoir des conséquences sur une grande partie du territoire et est donc considéré un risque modéré. L'acquisition de connaissance et la surveillance s'avèrent nécessaires pour aller plus loin, notamment pour identifier les risques majeurs pour des systèmes ou bâtiments essentiels qui pourraient y être exposés (ex. étangs aérés Saint-Victor).

Risque mineur: Certains bâtiments résidentiels à faible exposition se retrouvent dans cette catégorie, tout comme des terrains vacants, et d'autres enjeux marginaux (forestier, transport, institutionnel). Les zones d'avulsion (visibles notamment par la présence de bras morts) et de cônes alluviaux s'étendent sur des superficies assez localisées et les probabilités sont inconnues. Ce risque est considéré mineur mais l'acquisition de connaissances est nécessaire.

	Sévères >25% actifs exposés par secteur Infrastructures essentielles			-Résidentiel chenal principal, Famine, Beaurivage exposés à de multiples aléas Inondations: -Agricole Beaurivage, Famine et Affluents -Industriel Famine -3 écoles primaires, bâtiments institutionnels essentiels
	Modérées 10-25% actifs exposés	Érosion des berges*		Inondations: -Résidentiel Affluents -Commercial chenal principal -Récréatif chenal principal Exposition aux embâcles de glace ***
dnences	Mineures < 10% actifs exposés	Inondations: -Résidentiel chenal principal faible exposition -Autres enjeux exposés aux inondations Cônes alluviaux** Zones d'avulsion**	Inondations: -Résidentiel chenal principal exposition moyenne	Inondations: -Industriel chenal principal -Agricole chenal principal -Patrimonial tous secteurs confondus
Conséquenc		Faible <1 % (< 1:100)	Moyenne 1-5 % (1:20-1 :100)	Forte >5 % (> 1:20)

Probabilité d'occurrence d'ici 50 ans

*Probabilité incertaine considérée faible, mais conséquences modérées, la vaste étendue potentielle et la faible proportion de bandes riveraines

^{**}Probabilité incertaine considérée faible, estimation de conséquences mineures vu l'étendue potentielle limitée

^{***}Probabilité incertaine de notoriété forte (annuelle ou interannuelle), estimation de conséquences modérées vu l'étendue potentielle restreinte à certains secteurs

En résumé, l'analyse de l'aléa d'inondation en eau libre projette une augmentation des risques en climat futur (2020-2050), soit une augmentation des débits et l'expansion conséquente de la zone d'inondation, à l'exception du secteur de la Haute Chaudière où la zone d'inondation en eau libre reste stable. Par contre, malgré les relocalisations déià effectuées, l'enjeu résidentiel domine dénombrement des actifs et activités à risque, soit 42 % de la valeur totale des actifs, estimée à 273 805 M\$. Le secteur du corridor longeant le chenal principal contient la vaste majorité des actifs exposés (86 %). Et c'est sans compter le dénombrement lié aux embâcles puisque les connaissances sont en développement. Par ailleurs, les autres risques majeurs portent sur les enjeux agricoles fortement exposés dans les régions Beaurivage et Famine, ainsi qu'une zone industrielle à l'embouchure de la Famine. La vulnérabilité de la zone d'étude est plutôt forte, tant par sa forte sensibilité socio-économique (conditions démographique, parc bâti vieillissant, faible capacité financière), que sa faible capacité à faire face (distance à certains services d'intervention d'urgence). Enfin, le manque de connaissance sur les aléas d'érosion des berges, d'avulsion et de cônes alluviaux est préoccupant puisqu'ils pourraient s'exacerber face à une variation des événements hydrométéorologiques.



5.1 MÉTHODOLOGIE

Comme détaillée dans le <u>guide méthodologique</u> (Boyer-Villemaire et al., 2021), la construction des scénarios se base sur un processus collaboratif en plusieurs étapes impliquant les comités du projet (le comité local de suivi, le comité technique d'experts et l'assemblée consultative de priorisation). En voici les étapes.

Définition du scénario de référence et ses impacts: Le scénario de référence identifie les pratiques courantes et les impacts actuels liés aux aléas, en sus de quantifier l'état de référence de l'environnement. Les principaux impacts et secteurs de dommages à inclure dans l'ACA ont été identifiés lors des activités participatives, dans la littérature (ex. Penning-Rowsell et al., 2013; Circé et al., 2016) et un projet similaire en cours sur le bassin de la rivière Richelieu (https://www.ijc.org/fr/lcrr/plan-de-travail).

Inventaire des mesures potentielles: Basé sur une analyse de la littérature et une concertation avec des ingénieurs, biologistes et autres experts, une liste de mesures de réduction des risques fluviaux a permis de décrire leur faisabilité (topographique, hydrologique, utilisation du sol) et de modéliser les coûts des mesures (paramètres de conception et coûts unitaires).

Sélection, conception, spatialisation des combinaisons de mesures: À partir de l'inventaire, les dimensions, emplacements, et assemblages des mesures en scénarios furent déterminés grâce aux experts et expertes du comité technique, mais aussi par une activité de cartographie participative pour certaines mesures structurelles nécessitant l'acceptabilité des propriétaires.

Estimation de l'efficacité des scénarios: Seul l'aléa de submersion a fait l'objet d'une estimation quantitative de l'efficacité des mesures. L'efficacité a été modélisée par l'Université Sherbrooke à partir d'un modèle hydrologique, puis d'un traitement géostatistique sur le chenal principal uniquement (voir chapitre 4.2.1 et Leconte et Bizhanimanzar, 2020). L'efficacité des scénarios sur les aléas dont la modélisation était incomplète - soit l'érosion, la submersion des affluents et les embâcles - est analysée de façon qualitative au chapitre 6.5.3. Enfin, pour tous les scénarios, la proportion de réduction des dommages du scénario de référence (SQ) indique aussi l'efficacité économique des scénarios (tous les secteurs d'impacts confondus).

Estimation des coûts des mesures: L'estimation des coûts des mesures incluses dans chaque scénario provient d'un processus de validation avec des ingénieurs et experts en conception d'ouvrages au Canada. Les coûts estimés comprennent l'ensemble du cycle de vie des mesures, de la conception, la réalisation, l'entretien, le démantèlement si nécessaire, en sus des coûts d'opportunité essentiels à la réalisation des mesures (ex. coût de renonciation issue de la perte d'usage d'une propriété agricole ou résidentielle).

Identification des impacts des scénarios: La sélection des catégories d'impacts provient de l'analyse de la littérature et d'une validation lors des activités participatives. Les trois critères d'inclusion étaient 1) l'importance relative pour l'étude de cas, 2) la méthode de quantification disponible dans d'autres études et 3) la disponibilité des données nécessaires. Les hypothèses détaillées, sources de données et méthodes de quantification se situent dans le chapitre 6 d'analyse économique (voir aussi guide méthodologique, Boyer-Villemaire et al., 2021).

Les catégories d'impacts sélectionnées et liées aux analyses de risque sont présentées au Tableau 6.

Tableau 6. Catégories d'impacts et de coûts et lien avec l'analyse de risque

Tablea	bleau 6. Catégories d'impacts et de coûts et lien avec l'analyse de risque				
	Catégories	Description	Intrants issus de l'analyse de risque		
A	Impacts agricoles	Dommages aux cultures (pertes de revenus) Coûts de nettoyage de débris en champs	Probabilités mensuelles d'étendue d'eau affectant chacun des modèles de ferme		
C&I	Impacts commerciau x et industriels	Coûts des dommages aux bâtiments par la submersion (structure et contenu)	Probabilité annuelle de profondeur d'eau pour chaque bâtiment		
R	Impacts résidentiels	Dommages aux résidences par la submersion (structure et contenu)	Probabilité annuelle de profondeur d'eau pour chaque bâtiment		
		Dépenses engendrées par les évacuations	Probabilités de profondeur d'eau (converties en nombre de bâtiments puis en nombre de sinistrés.es)		
PS	Impacts	Dépenses complémentaires	Probabilités de profondeur d'eau		
	psycho- sociaux	Soins de santé	(converties en nombre de bâtiments puis en nombre de		
	SOCIAUX	Perte de productivité individuelle	sinistrés.es)		
		Perte de qualité de vie			
М	Impacts municipaux	Dépenses en gestion des urgences et nettoyage des débris	Probabilité annuelle de profondeur d'eau pour les bâtiments et terrains		
Éco n.	Impacts économique s	Dommages aux institutions par la submersion (structure et contenu)	Probabilité annuelle de profondeur d'eau pour chaque bâtiment		
Env.	Impacts	Séquestration du carbone	\\\\\\		
	environnem entaux	Qualité de l'eau : sédiment et nutriments (N, P)	Variable (selon les changements d'utilisation du sol liées aux mesures)		
		Biodiversité	,		
СМ	Coûts des mesures	Conception, réalisation, entretien	Variable (voir Tableau 6)		
СО	Coûts d'opportunit é des mesures	Coûts de renonciation des pertes ou des contraintes à l'usage d'une propriété	Variable (voir les coûts de la mesure) (voir Tableau 6)		

5.2 SCÉNARIO DE RÉFÉRENCE (SQ)

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 peuvent être évalués. La quantification économique des dommages qui lui sont associés est cruciale. Ceci permet de comprendre le potentiel de coûts à éviter (et donc les bénéfices des divers scénarios d'adaptation). La quantification monétaire exhaustive est présentée au chapitre 6.2.

5.2.1 Définition du scénario de référence – le statu quo (SQ)

Le scénario de référence représente le statu quo (SQ) où les pratiques actuellement mises en œuvre se poursuivent, sans aucune autre intervention majeure. Sur le territoire du bassin versant de la rivière Chaudière, trois pratiques actuelles ont été considérées :

- Démolitions des lots suite aux inondations du printemps 2019: Les échanges avec le COBARIC ont permis d'identifier les lots ayant obtenus une autorisation de démolition de la part des municipalités, en réponse aux inondations survenues au printemps 2019. Au total, 646 lots (en date d'octobre 2020) ont été retiré de la modélisation économique, soit 459 à Sainte-Marie, 94 à Scott, 13 à Vallée-Jonction (total de 566 dans la MRC Nouvelle-Beauce), 76 à Beauceville (MRC Robert-Cliche) et 4 à Notre-Dame-des-Pins (MRC Beauce-Sartigan).
- La perte nette de milieux humides: L'ACP a permis d'identifier une perte nette de milieux humides dont la destruction a déjà été autorisée sur le territoire de la ville-MRC de Lévis. Pour la modélisation hydrologique, certains milieux humides ont été convertis en surfaces anthropiques, en accord avec les plans de conservations et d'urbanisme de la ville pour les 30 prochaines années. Le scénario de statu quo (SQ) prévoit donc une perte nette des milieux humides de l'ordre de 2,37 km², au profit des zones urbaines avec des compensations hors bassin versant (intra-MRC) suivant la Loi concernant la conservation des milieux humides et hydriques.
- L'indemnisation des dommages liés à la submersion : actuellement, les dommages et mesures de rétablissement liés à la submersion en milieu agricole, résidentiel, commercial ou industriel et municipal sont compensés à hauteur de certains montants par des programmes provinciaux :
 - Le programme d'aide financière et d'indemnisation lors d'une inondation du Ministère de la Sécurité Publique (MSP);
 - Les programmes d'assurance pour les dommages aux cultures pour les producteurs assurés par la Financière agricole du Québec (FADQ).

En résumé, le statu quo utilisé pour le scénario de référence se définit comme la poursuite : 1) des autorisations de destruction de MHH en vertu du plan d'urbanisme de la ville de Lévis, 2) des autorisations de démolitions des lots suite aux inondations du printemps 2019 et 3) de l'approche règlementaire d'indemnisation des dommages liés à la submersion.

5.2.2 Identification des impacts de la submersion

Les coûts liés à la submersion proviennent principalement de quatre facteurs :

- L'inclusion d'un actif dans la zone d'étendue de submersion;
- Des dommages liés à la profondeur d'eau sur une surface ou affectant un bâtiment donné;
- La probabilité liée à la manifestation de l'événement durant un mois plutôt que l'autre;
- La durée de la submersion est un facteur important, mais ne pouvait être modélisée.

Les catégorie d'impacts présentés au **Tableau 3** en sont affectés par la submersion :

- Le secteur agricole :
 - les dommages aux cultures: l'inondation, surtout lors des saisons estivale et automnale, peut entraîner une perte de rendement et donc de revenus nets sur l'année.
 - o **les coûts de nettoyage des débris dans les champs agricoles**, les producteurs ont des coûts d'opérations additionnels pour remettre la terre en état d'être cultivée.
- Le secteur commercial et industriel :
 - les dommages structurels aux bâtiments: selon le niveau d'eau atteint dans un bâtiment, les bâtiments subissent un certain taux d'endommagement par rapport à leur valeur.
 - o les **dommages aux contenus des bâtiments** : selon le niveau d'eau atteint, une proportion de l'inventaireest endommagée. Pour d
- Le secteur résidentiel
 - o les **dommages structurels aux bâtiments** : selon le niveau d'eau atteint dans un bâtiment et la présence ou l'absence d'un sous-sol, les bâtiments subissent un certain taux d'endommagement par rapport à leur valeur.
 - o les **dommages aux contenus des bâtiments** : selon le niveau d'eau atteint, une proportion de du contenu des résidences est endommagée.
 - o l'assistance aux personnes évacuées: lorsqu'une résidence principale est évacuée, cela engendre des coûts d'hébergement et d'entretien minimal (nourriture, habits), qui dépend du nombre de sinistrés.

o être sinistré.e en raison de la perte de sa résidence engendre une perte de productivité (ex. journées pour gérer l'administration du dossier d'indemnisation), une perte de qualité de vie (ex. stress, perturbation du sommeil), des coûts de soins de santé (ex. soins le système public), et dépenses complémentaires (ex. Soins non couverts par le système de santé publique).

• Le secteur municipal :

o la **gestion des urgences et le nettoyage des débris** sur les voies publiques : lorsque des résidences principales sont évacuées ou que les voies municipales sont inondées, cela engendre des coûts d'opération d'urgence pour rétablir les usages

• Le secteur public :

- les dommages structurels aux bâtiments institutionnels et à leur contenu : voir secteur commercial et industriel;
- o l'interruption des services publics rendus par les institutions (ex. écoles, hôpitaux, hôtels de ville) cause des dommages indirects de nature sanitaire, sociale et économique, mais ne pouvait être modélisée en l'absence du facteur de durée des inondations.

5.2.3 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 cette étude de cas vise à quantifier les bénéfices environnementaux procurés à la société en modélisant les flux de différents services écosystémiques à l'intérieur de la zone d'étude. Évaluer la totalité des avantages pourvus 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, 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.

5.2.3.1 Méthodologie

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 21**), 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 ré-échantillonée 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.

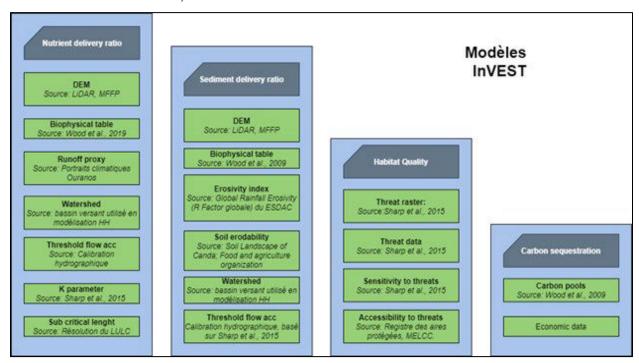


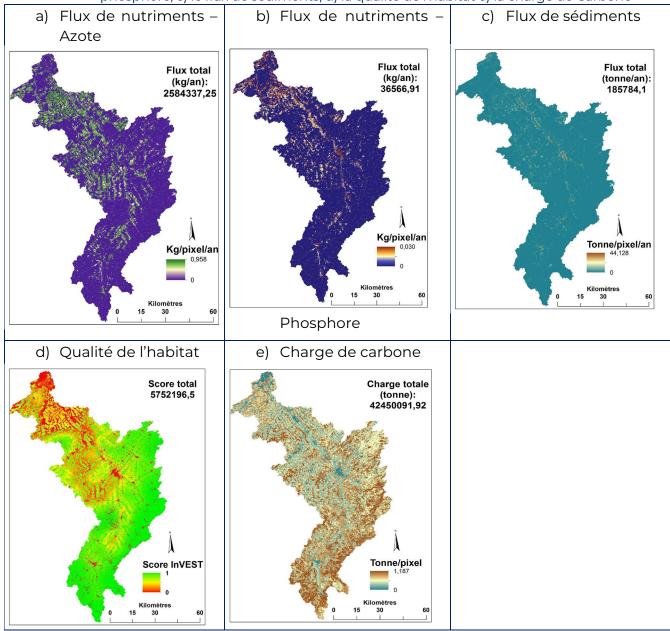
Figure 21. Modèles InVEST utilisés pour établir l'état de référence de l'environnement, détaillés par leurs paramètres d'entrés et leur source de données

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 par intégration sur la zone d'étude. À partir de ce statu quo, il sera possible de construire les différents scénarios d'adaptation afin de les comparer et évaluer les solutions gagnantes du point de vue environnemental.

5.2.3.2 Résultats

Les résultats cartographiés de la modélisation des services écosystémiques pour l'état de référence sont présentés au **Tableau 7**.

Tableau 7. Quantification de l'état de référence de l'environnement pour a) le flux d'azote, b) le flux de phosphore, c) le flux de sédiments, d) la qualité de l'habitat e) la charge de Carbone



Qualité de l'eau

Les deux premières cartes (a et b), produites par le modèle de transport des nutriments, permettent d'observer la distribution spatiale de l'exportation des nutriments d'azote et de phosphore vers les cours d'eau sur une base annuelle. La troisième carte (c), produite par le modèle de transport des sédiments, illustre la distribution spatiale de l'exportation des sédiments vers les cours d'eau sur une base annuelle.

Pour ces trois produits matriciels issus de la modélisation, les flux annuels de particules ont été agrégés à l'échelle de la zone d'étude et forment le cadre de référence biophysique pour la qualité de l'eau. Ces résultats agrégés indiquent qu'annuellement, environ 2 584 337,25 kg d'azote, 36 566,91 kilogrammes de phosphore et 185 784,1 tonnes de sédiment sont drainés vers les cours d'eau du bassin versant de la rivière Chaudière.

Les cartes de transport des nutriments démontrent que les foyers principaux de drainage des nutriments sont les parcelles agricoles riveraines au chenal principal, notamment dans les municipalités de Saint-Georges, Beauceville, Saint-Joseph-de-Beauce et Sainte-Marie. La portion du bassin versant située dans les Basses-terres du Saint-Laurent et les premiers contreforts appalachiens, où l'agriculture y est plus intensément pratiquée (COBARIC, 2014), représente également un foyer de drainage substantiel des nutriments. Ce patron de distribution spatial des flux est aussi visible sur la carte de transport des sédiments, mais il est davantage focalisé dans les zones développées et les noyaux urbains des mêmes municipalités de Saint-Georges, Beauceville, Saint-Joseph-de-Beauce et Sainte-Marie.

Qualité de l'habitat

La quatrième carte (d) est produite par le modèle de qualité de l'habitat et présente la distribution spatiale d'un pointage (score) de qualité de l'habitat. Ce pointage est un proxy conçu par InVEST et fait référence à la capacité de l'écosystème à fournir des conditions appropriées pour la persistance des individus et des populations (Sharp et al., 2015), mais ne fait référence à aucune autre mesure de biodiversité particulière.

Les résultats de cette modélisation à la carte d) indiquent que si les milieux urbains et agricoles sont des espaces dégradés de manière généralisée à l'échelle de la zone d'étude, c'est principalement dans la région de Lévis en queue de bassin versant - et plus généralement dans la portion des Basses-terres du Saint-Laurent et des premiers contreforts appalachiens - qu'ils semblent exercer une pression importante sur la qualité de l'habitat. Le score total de capacité de l'écosystème à fournir des conditions appropriées pour la persistance des individus et des populations s'élève à 5752196,5 (sans unité).

La cinquième carte (e) est produite par le modèle de séquestration du carbone et représente la distribution spatiale du contenu en carbone des différentes classes d'utilisation du sol à t = SQ. Il s'agit donc d'une cartographie du stockage (charge) en carbone et non d'une cartographie de la séquestration du carbone. La séquestration ou perte - du carbone fait plutôt référence à la différence nette de stockage du carbone entre une carte d'utilisation du sol actuelle et future du même contexte géographique. Lorsqu'une carte future est fournie au modèle, celui-ci peut produire la carte de séquestration.

Dans les résultats de la modélisation à la carte e), la répartition des hautes concentrations de carbone correspond en grande partie à la localisation des milieux forestiers et arbustifs. Selon les résultats, ceux-ci peuvent contenir jusqu'à 1,2 tonne de carbone par pixel (10 m²), alors que les milieux agricoles et anthropiques sont largement dépourvus de puits de carbone. On peut ainsi observer sur la carte que les plus importants regroupements de puits de carbone sont répartis dans les régions forestières du plateau surcreusé des Appalaches et du massif des Montagnes Blanches (COBARIC, 2014), où le développement anthropique est moins présent. La charge totale modélisée (stockGE) de carbone contenue dans la zone d'étude pour l'état de référence est de 42 450 091, 92 tonnes.

5.3 PARAMÈTRES DES SCÉNARIOS D'ADAPTATION

5.3.1 Combinaison des mesures

Les scénarios d'adaptation combinent une ou plusieurs mesures ayant comme objectif de réduire les probabilités de récurrence des aléas ou leurs impacts sur les actifs et activités à risques. Généralement, les mesures s'attaquent spécifiquement à l'un ou à l'autre de ces objectifs. À la vue d'analyses préliminaires, il est possible de combiner ou d'ajouter certaines mesures aux scénarios, dans le but de réduire le coût d'implantation ou d'opportunité, ou d'augmenter la capacité à réduire le risque ou les conséquences des inondations. En effet, les scénarios sont co-construits de façon itérative, en intégrant les différentes assemblées consultatives et décisionnelles décrites au chapitre 3.

Dans l'étude de cas du bassin versant de la Chaudière, les mesures ayant servi à l'élaboration des scénarios sont présentées au **Tableau 8**.

 Tableau 8.
 Liste des mesures constituant les scénarios d'adaptation

Tableau 8. Liste	ableau 8. Liste des mesures constituant les scénarios d'adaptation			
Catégorie	Mesure	Description		
Immunisation collective par infrastructures rigides	Digue	Réaménagement des terrains pour permettre l'endiguement des berges et la construction de murets en milieux urbains.		
	Élévation des bâtiments résidentiels ou commerciaux	Rehaussement du premier plancher - d'une hauteur de 4 pieds - lorsque le cumulatif des dommages espérés du bâtiment dépasse 100 000 \$, soit l'aide financière proposée par le MSP pour ce type de travaux (2019).		
Immunisation individuelle des bâtiments	Relocalisation des bâtiments résidentiels	Relocalisation des résidences lorsque le cumulatif des dommages espérés du bâtiment dépasse 100 000 \$ ou 50 % du coût de reconstruction à neuf du bâtiment, soit le plafonnement de l'aide financière du MSP pour les inondations successives (2019).		
	Retrait des actifs de valeur aux sous-sols résidentiels	Mesure comportementale d'immunisation des sous-		
	Végétalisation des lots démolis	Plantation d'arbustes, feuillus et conifères dans les espaces de lots démolis suites aux inondations du printemps 2019.		
	Bandes riveraines	Bandes riveraines de 15 m composées de 2 rangées d'arbustes et 4 rangées de saules hybrides récoltés pour pâte ou biomasse, avec une marge brute de 35 %.		
Infrastructures vertes	Restauration de MHH	Restauration de milieux humides et hydriques dans les espaces aux prédispositions physiographiques favorables et socialement acceptables.		
	Corridor inondable	Application de contraintes à l'aménagement dans les zones de grand courant et les zones d'intervention spéciale. Selon la prédisposition physiographique des espaces, l'ensemble des propriétés est converti soit en MHH, en zones arbustives, arborées ou en cultures fourragères.		

La façon dont chacune de ces mesures a été intégrée dans un ou plusieurs scénarios est décrite au chapitre 5.4, alors que la section suivante (5.3.2) abordera de façon succincte les coûts liés à chaque mesure.

5.3.2 Coûts des mesures

Le coût total de mise en œuvre des scénarios provient de la somme des coûts des mesures (cf. rapport méthodologique). Les valeurs unitaires des mesures viennent de la littérature, validée avec des experts en infrastructure rigide ou naturelles. La ventilation de ces chiffres répertorie trois grandes catégories formant le coût des mesures (CM):

- les coûts de conception : une proportion du coût d'implantation pour des plans et devis (optionnel)
- *les coûts d'implantation*: les ressources humaines (main d'œuvre) et matérielles (roches, plantes, machinerie, y compris dépenses de mitigation et surveillance des impacts) pour l'implantation
- *les coûts d'entretien* : une proportion du coûts d'implantation visant à maintenir le niveau d'efficacité optimal de la mesure à une fréquence choisie au cours de la période d'étude

Aucune dépense de démantèlement n'a été considérée dans cette étude, ni aucune valeur résiduelle. Dans les scénarios, en l'absence d'enjeux de santé ou sécurité dans la rivière, l'approche conservatrice du moindre coût consiste à laisser la nature procéder à un démantèlement passif des ouvrages. Ces postes ont permis de construire des fonctions de coûts unitaires, à multiplier par les variables biophysiques ou de conception liées au site d'étude. Ces coûts proposés se basent sur une ventilation détaillée des postes de dépenses, autant que possible, mais doivent être pris à titre indicatif. L'objectif visait à comparer des grandes catégories de mesure et que l'usager puisse reprendre ces tableaux et changer les paramètres et coûts pour mieux refléter leur contexte (voir guide méthodologique). Ils ne remplacent en rien des plans et devis d'experts dans les domaines respectifs.

Les coûts d'opportunité (CO) associés aux mesures ont aussi été considérés. Ils proviennent du coût de renonciation à certains usages, liés par exemple à la perte de propriété résidentielle ou agricole, ou à la restriction des cultures en zones inondables. Ces coûts permettent d'anticiper les dépenses pour compenser les coûts d'option liés aux mesures. Pour le secteur agricole, le coût d'opportunité venant de la perte de propriété se base sur la valeur moyenne des terres agricoles pour la région Chaudière-Appalaches-Sud, soit 10 560 \$/ ha selon le dernier bulletin Transac-TERRES (FADQ, 2020), tandis que le coût d'opportunité venant de la restriction des cultures se base sur la valeur actualisée des revenus nets futurs générés par les productions agricoles en place. Pour les autres secteurs (résidentiels, commerciaux et industriels, institutionnels), le coût d'opportunité venant de la perte de propriété se base sur la valeur foncière des immeubles (bâtiments et lots). Quoique l'évaluation foncière soit encore considérée inférieure à la valeur marchande des propriétés foncières dans plusieurs municipalités, elle constitue tout de même la source la plus fiable d'évaluation disponible.

Les coûts spécifiques à chaque mesure sont précisés au **Tableau 9**. Selon leur fréquence annuelle, tous ces coûts sont par la suite actualisés sur une période de 50 ans (4 % pour les premiers 30 ans et 2 % pour les derniers 20 ans).

Tableau 9. Coûts unitaires, coûts d'opportunités et coûts totaux par mesure

Mesures	Coûts unitaires des				
	mesures (CM)	d'opportunité (CO)	sur 50 ans	commentaires	
Restauration de	Conception : 10 374 \$/ha	Pertes d'usage des	• MHH-acc & MHH-dis: 0 \$	CM : MELCC (2020) et experts du milieu CO : CRAAQ (2020)	
milieux humides et	Implantation : 13 832\$/ha	terres agricoles :	*		
hydriques :	Entretien et admin.:	10 560 \$/ha			
• MHH-acc : 550 ha	3458 \$/ha aux 10 ans	Perte d'usage autres	'usage autres • MHH-eff: 83,522 M \$*, * Voir la no		
• MHH-dis : 550 ha		terrains: Valeur	dont:	de tableau	
• MHH-eff: 2 737 ha		foncière du lot	CM : 59,1416 M \$		
(corridor inondable)			CO: 24,3804 M \$		
Verdissement des lots démolis	Conception et implantation :		• MHH-acc & MHH-dis: 335 400 \$	CM: Basé sur l'outil de simulation des	
• MHH-acc : 20 ha	16 782 \$/ ha			impacts économiques de pratiques agroforestières	
• MHH-dis : 20 ha	Entretien :	-	• MHH-eff: 9,553 M \$		
• MHH-eff : 824 ha	352 \$ /ha				
				(Vézina et coll., 2019)	
Bandes riveraines de 15	Conception et	Pertes d'usage des	• MHH-dis : 287 200 \$,	CM: Basé sur l'outil de	
m	implantation :	terres agricoles :	dont:	simulation des	
• MHH-dis : 0,213 km ²	1,48 \$/m²	10 560 \$/ha	CM:312200\$-214700\$	impacts	
• MHH-eff: 63 km ²	Entretien :	Pertes d'usage des	(récolte)	économiques de pratiques	
	0,03 \$/m² les 5 premières	terrains urbains: 0 \$	CO: 189 700 \$	agroforestières	
	années		• MHH-eff: 74,062 M \$,	(Vézina <i>et coll.</i> , 2019)	
	Récolte de bois		dont:	CO: CRAAQ (2020)	
	(bénéfices) :		CM: 92,28 M\$ - 63,468	(====,	
	0,166 \$/m² aux 5 ans		M\$ (récolte)		
			CO: 45,251 M \$		
Corridor inondable –	Démolition des lots :	Perte d'usage des	• MHH-eff:	CM : Dutemple (2019)	
milieux urbains	17 500 \$/ lot	terrains urbains : Valeur foncière du	15,175 M \$	CO : MAMH (2019)	
• MHH-eff : 1028 lots		lot			

Mesures	Coûts unitaires des mesures (CM)	Coûts d'opportunité (CO)	Coûts totaux actualisés sur 50 ans	Source et commentaires
Corridor inondable – restriction au fourrage • MHH-eff: 770 ha	-	Perte de revenu suite à la conversion en fourrage : 4400	• MHH-eff: 2,4146 M \$	CO : CRAAQ (2020)
Retrait des actifs aux		\$/ha		Mesure à coût nul,
sous-sols				testé en analyses de
• IMM_ind : 108 résidences	-	-	-	sensibilité
Relocalisation des	Démolition des lots :		• IMM-ind: 8,216 M \$,	CM : Dutemple (2019);
résidences	17 500 \$/ lot		dont:	MAMH (2019)
• IMM_ind : 75 résidences	Achat de nouvelle propriété : Valeur foncière du lot	-	Démolition : 809 300 \$ Nouvelle propriété: 7,41 M\$	
Élévation des commerces • IMM_ind : 12 commerces	Élévation du premier plancher: 100 000 \$/ commerce	-	-	CM : MSP (2019)
Digues • IMM-coll : 6 digues	Conception et implantation: de 69 800 \$ à 1,142 M \$ /digue Entretien: 10 % annuel Durée de vie: 30 ans	-	• IMM-coll: 197,783 M \$	CM: Adapté de Tecsult (1994)

^{*}Les coûts totaux de la restauration des MHH sont nuls, sous l'hypothèse que le règlement de compensation pour atteinte aux MHH permet de couvrir l'ensemble des coûts de restauration d'une superficie équivalente à celle des MHH détruits (550 ha). Comme le scénario MHH-eff prévoit une augmentation nette de MHH (aucune destruction), les coûts de restauration sont comptabilisés. Voir la discussion à la section 7.3 au sujet de cette hypothèse.

5.4 DESCRIPTION DES SCÉNARIOS

Dans un premier temps, les scénarios d'adaptation étudiés pour le bassin versant de la rivière Chaudière sont présentés au **Tableau 10**.

Les scénarios ayant comme préfixe IMM 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 cible, celui au suffixe « COL » focalisant sur la réduction du risque pour l'ensemble de la communauté, alors que celui au suffixe « IND » s'attarde aux bâtiments individuels. Ce dernier prévoit notamment le retrait des actifs et activités comportant un risque jugé trop élevé et de diminuer les conséquences sur les bâtiments qui sont moins exposés au risque. En contraste, les deux scénarios au préfixe « MHH » mettent l'emphase sur l'apport des milieux humides à dans la régulation des aléas. Ces milieux jouent un rôle extrêmement important dans la réduction des débits extrêmes, réagissant comme des éponges qui absorbent une partie des précipitations très élevées ou de la fonte rapide des glaces. Le suffixe « ACC » fait référence au scénario acceptable pour les communautés, alors que le suffixe « EFF » vise l'efficacité des mesures et, par conséquent, est beaucoup plus ambitieux. Enfin, le suffixe « DIS » fait référence à une redistribution spatiale optimisée entre les MHH des scénarios MHH-acc et MHH-eff.

À noter que l'ensemble des mesures des scénarios sont implantées graduellement sur 10 ans.

Tableau 10. Scénarios étudiés dans l'ACA, nomenclature et description

Tableau 10.	scenarios etudies dans i	rACA, nomenclature et description		
Symbole	Nom	Description		
1. SQ	Statu quo	Signifie une perte nette de MHH pour le BV.		
Infrastruct	ures vertes			
2. MHH- ACC	MHH acceptable	Signifie zéro perte nette de MHH pour le BV; Implique un minimum de changements d'utilisation du sol ou une optimisation des espaces existants; Tient compte des perspectives de développement des territoires prévues.		
3. MHH- EFF	MHH efficace	Gain net de MHH pour le BV; Présence naturelle de milieux humides dans le corridor inondable; Bandes riveraines de 15m sur les milieux anthropiques et agricoles; Importants changements dans l'utilisation du sol.		
Infrastruct	ures grises			
4. IMM- COLL	Immunisation collective	Protection des collectivités à l'aide de multiples digues en zone urbaine; Non considéré pour la modélisation hydrologique.		
Infrastruct	ure verte et immunisation	individuelle		
	MHH acceptable et immunisation individuelle	Combinaison du scénario MHH-acc et les mesures d'immunisation individuelle des bâtiments résidentiels et commerciaux IMM-IND Non considéré pour la modélisation hydrologique.		
6. MHH_dis + IMM-IND	MHH distribués et immunisation individuelle	Combinaison des mesures d'immunisation individuelle des bâtiments résidentiels et commerciaux (IMM-IND), avec une distribution des MHH mitoyenne entre les niveaux dits acceptables et efficaces (zéro perte nette par sous BV) et l'ajout de bandes riveraines de 15m en milieu agricole en zone inondable 0-2 ans. Non considéré pour la modélisation hydrologique.		

Milieux humides et hydriques acceptables (MHH-acc)

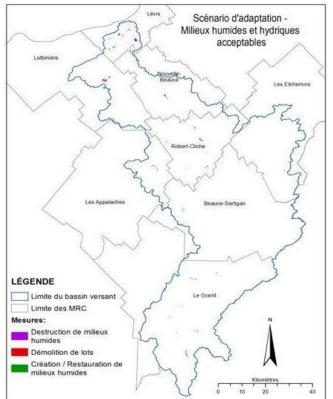
Pour la mise en place du PRMHHH avec compensation inter-MRC, le postulat de base pour le scénario de milieux humides et hydriques acceptables (MHH-acc) est celui d'un équilibre entre la perte et le gain de 5,5 km² de milieux humides sur l'ensemble du bassin versant de la Chaudière (Figure 22). Il prévoit la poursuite du scénario de référence (voir section 5.2.1), en plus du verdissement d'une proportion des lots démolis.

Démolitions de lots et espace verts:

Ce scénario prévoit la démolition de 646 lots ayant obtenus une autorisation en date d'octobre 2020. De plus, il prévoit le verdissement de 0.20 km² de ces lots.

Perte de MHH: Ce scénario prévoit la destruction de 2,4 km² de MHH, en accord avec les plans d'urbanisme de la ville de Lévis. Il prévoit la destruction de 3,1 km² supplémentaires en vertu des perspectives de développement urbain et agricole des autres MRC, identifiés lors de l'ACP (**Figure 22**).

Gain de MHH: Pour balancer la destruction de MHH, ce scénario prévoit la restauration de 5,5 km², dans les espaces ciblés par les aménagistes lors de l'ACP et pour lesquels des prédispositions physiographiques ont été identifiées (encaissement, topographie, etc.).



·	MHH (km²)		Lots (unités ou km²	
MRC	Gain	Perte	Démolition	Esp. verts
Robert-Cliche	1,0	0,7	76	
Lévis	1,3	2,4		
Les Etchemins	ı	0,1		
Les Appalaches	0,7	-		
La NouvBeauce	0,6	0,4	566	0,2
Beauce-Sarti.	0,3	0,0	4	
Le Granit	1,7	0,3		
Lotbinière	-	1,7	·	, in the second second
Total:	5,5 Km ²	5,5 km ²	646 unités	0,2 km ²

Figure 22. Localisation mesures du scénario MHHacc dans le bassin versant et leurs répartitions par MRC

Coût des mesures : Le coût du scénario est de 0,335 M\$, comprenant la réalisation et l'entretien de la mesure d'espaces verts uniquement. Les coûts totaux de destruction

et de restauration des MHH sont considérés comme étant entièrement couverts par le Règlement sur la compensation pour l'atteinte aux MHH. L'hypothèse sous-jacente est que le développement économique et agricole entraînant la perte d'une superficie donnée de MHH est suffisamment rentable pour financer la restauration d'une superficie équivalente de MHH, en vertu du règlement sur la compensation pour l'atteinte aux MHH. Voir la discussion à la section 7.3 au sujet de cette hypothèse. Le **Tableau 11** rapporte les différents coûts associés à ce scénario.

Tableau 11. Ventilation des coûts, scénario MHH-ACC

Coût des mesures	Coûts sur 50 ans
Réalisation et entretien	
Verdissement des lots démolis	-335 400 \$
Restauration de MHH	-
Destruction de MHH	-
Coût d'opportunité	-
Bénéfices connexes des mesures	-
Coûts totaux	:-335 400 \$

Efficacité: Le scénario a des effets hydrologiques modestes, mais ne compense pas l'augmentation liée aux changements climatiques et au développement urbain (Tableau 12). Ceci se traduit par une faible capacité à éviter les dommages économiques liés à la submersion de la rivière Chaudière, soit 0,5 % des coûts d'ensembles liés au scénario de référence. Les terres agricoles du secteur de la basse Chaudière bénéficient majoritairement de la réduction des dommages liés à la submersion (voir section 6.3.1 pour les résultats économiques complets). Le scénario parvient effectivement à réduire légèrement les pics de crues de l'ensemble des périodes de retour analysées dans ce secteur. Par contre, l'impact hydrologique du scénario MHH-acc est le plus significatif pour le secteur hydrographique de la rivière Beaurivage, où l'on observe une augmentation 7,7 % à 0,1 % des pics de crue de période de retour de 2 ans (50 % de probabilité) à 20 ans (5 % de probabilité). L'effet combiné des changements climatiques et d'utilisation du territoire amènerait donc une amplification préoccupante des crues de faible récurrence pour ce secteur. En l'absence de modélisation hydraulique sur les affluents, il n'a cependant pas été possible de quantifier et monétiser cet impact préoccupant. Il sera néanmoins traité de façon qualitative au chapitre 6.5.3.

Tableau 12. Bilan net de superficies de MHH et pourcentage de variation des débits des crues sous différentes périodes de retour pour le scénario MHH-acc, par rapport au scénario de référence.

Secteur	Bilan net de MHH (km²)	Débits de cru	es par pério	de de retour	
		Q2	Q20	Q100	Q350
Basse Chaudière -Lévis	-1,8	-2.4 %	-0,8 %	-0,1 %	0,3 %
Basse Chaudière - Autre	1,5	2, 70			
Moyenne Chaudière	0,6	0,4 %	0,1 %	0 %	-0,1 %
Haute Chaudière	0,8	-0,4 %	-0,4 %	-0,4 %	-0,4 %
Beaurivage	-1,1	7,7 %	0,1 %	-2,9 %	-4,7 %
Famine	-0,1	-1,8 %	0,2 %	0,9 %	1,5 %

Source: Leconte et Bizhanimanzar, 2020.

À noter que la procédure de changement d'utilisation du sol, les choix de modification d'utilisation du territoire et la synthèse des surfaces par catégorie sont présentées à l'Annexe F.

5.4.1 Milieux humides et hydriques efficaces (MHH-eff)

Le scénario de milieux humides et hydriques efficaces (MHH-eff) est le plus ambitieux en terme d'aménagement des milieux naturels (**Figure 23**). Il va au-delà des objectifs de conservation de zéro perte nette et combine ainsi deux grandes catégories de mesures, soit le corridor inondable et les bandes riveraines. Comme aucune destruction de MHH n'est permise, la perte de superficie de prévue sous le scénario de référence pour la ville de Lévis n'est pas poursuivie et les MHH sont conservés.

Corridor inondable: Cette mesure applique des contraintes strictes à l'aménagement dans les zones inondables de grand courant et les zones d'intervention spéciale. Selon leur prédisposition physiographique, les terres agricoles incluses dans ces zones sont converties soit en MHH (27,40 km²) ou contrainte aux cultures fourragères

(7,70 km²). Les autres terrains (résidences. commerces. industries, institutions, terrains vagues, etc.) inclus dans ces majoritairement zones sont convertis en espaces verts (verdissement 8.24 km²: de restauration de 1.75 km2 en MHH), impactant un total de 1028 lots. La répartition des superficies converties à travers le BV et les MRC est présentée à la Figure 23.

3	(X)
La Novelle Genolo	
	the Europeans
Les Appalaches	Beaucr Surticion
	13
Le Grand	فسنراح
Umite MRC Umite Chaudière Élèments hydrographiques Réseau hydrographique	\$
Permenent Plan d'eau Elèments Mitrit, EFF Bandes riveraines Corridor d'inondabilité	20 40 km

	Corridor inondable (km²)			Bandes riveraines (km²)		
MRC	мнн	Fourrage	Espace vert	Agricole	Autre	
Robert-Cliche	4,0	1,4	1,6	8,3	0,9	
Lévis	6,8	0,1	0,4	2,4	2,0	
Les Etchemins	2,1	0,3	0,4	2,1	0,7	
Les Appalaches	0,04	0,01	0,03	3,2	0,01	
La Nouv Beauce	0,6	1,7	3,8	11,3	1,2	
Beauce-Sarti.	0,6	1,3	1,6	9,8	1,6	
Le Granit	2,0	0,3	0,2	4,7	1,5	
Lotbinière	13,0	2,6	0,2	12,8	0,5	
Total :	29,1	7,7	8,2	54,7	8,3	

Figure 23. Localisation mesures du scénario MHH-eff dans le bassin versant et leurs répartitions par MRC

Bandes riveraines: Cette mesure régularise et bonifie l'application de la politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables. Elle vise à implanter des bandes riveraines de 15 mètres sur l'ensemble des cours d'eau permanents et intermédiaires, ainsi que sur les plans d'eau, du bassin versant. Au total, il s'agit d'une superficie de 63 km² de bandes riveraines, dont 81 % se trouvent en milieu agricole. Ceci implique une perte d'usage agricole sur une superficie totale de 5 080 hectares. Les bandes riveraines modélisées sont composées de 2 rangées d'arbustes et 4 rangées de saules hybrides, lesquels offrent des bénéfices de récolte pour pâte ou biomasse, avec une marge brute de 35 %.

À noter que la procédure de changement d'utilisation du sol, les choix de modification d'utilisation du territoire et la synthèse des surfaces par catégorie sont présentés à l'Annexe F.

Coût des mesures: Le scénario entraîne des coûts de 464,033 M\$. Ceux-ci sont d'abord répartis en coûts de réalisation et d'entretien des bandes riveraines (92,3 M\$) et du corridor inondable (83,86 M\$) pour la restauration de MHH (59,1 M\$), la démolition des lots en milieu urbain (15,18 M\$) et leur verdissement (9,55 M \$). Ensuite, le scénario entraîne des coûts d'opportunité importants (351,3 M\$), subdivisés en perte d'usage pour 1 028 propriétés dans le corridor inondable (279,3 M\$), en perte d'usage agricole dans les bandes riveraines (45,25 M\$) et en perte de revenus due à la restriction aux cultures fourragères dans le corridor inondable (2,41 M\$). La mesure bande riveraine apportent toutefois des bénéfices connexes, venant de la transformation en pâte ou biomasse du bois des saules hybrides, d'une valeur de 63,48 M\$ sur 50 ans. Le **Tableau** 13 rapporte les différents coûts associés au scénario.

Tableau 13. Ventilation des coûts, scénario MHH-EFF

Coût des mesures	Coût sur 50 ans
Réalisation et entretien	-176 149 700 \$
Bandes riveraines	-92 279 900 \$
Restauration de MHH	-59 141 600 \$
Corridor inondable – Démolition des lots	-15 175 200 \$
Corridor inondable – Verdissement	-9 553 000 \$
Coût d'opportunité	-351 352 300 \$
Bandes riveraines – milieu agricole	-45 251 200 \$
Corridor inondable – Restauration de MHH en milieu agricole	-24 380 400 \$
Corridor inondable – Restriction des cultures	-2 414 600 \$
Corridor inondable – milieu urbain	-279 306 100 \$
Bénéfices connexes des mesures	63 468 700 \$
Bandes riveraines - récolte de bois	63 468 700 \$
Coûts totaux sur 50 ans :	-464 033 300 \$

Efficacité du scénario: Comparé aux scénario MHH-acc, ce scénario a une plus grande incidence sur la réduction des débits de crues de l'ensemble des secteurs hydrographiques du bassin versant, à l'exception de la moyenne Chaudière (**Tableau 14**). Combiné au retrait de nombreux actifs à risque dans le corridor inondable, le scénario permet d'éviter 71% des dommages du scénario de référence, liés à la submersion de la rivière Chaudière. Les résultats économiques complets sont présentés à la section 6.3.2.

Tableau 14. Pourcentage de variation des débits des crues sous différentes périodes de

retour pour le scénario MHH-eff, par rapport au scénario de référence.

Secteur	Débits de crues par période de retour					
	Q2	Q20	Q100	Q350		
Basse Chaudière	-4,1 %	-5,4 %	-5,9 %	-6,2 %		
Moyenne Chaudière	0,4 %	0,2 %	0,2 %	0,1 %		
Haute Chaudière	-0,6 %	-0,7 %	-0,8 %	-0,8 %		
Beaurivage	-5,9 %	-7,2 %	-7,7 %	-8,1 %		
Famine	16,9 %	2,6 %	-2,8 %	-6,1 %		

Source: Leconte et Bizhanimanzar, 2020.

5.4.2 Immunisation collective (IMM-coll)

Le scénario d'immunisation collective vise à protéger l'ensemble de la collectivité exposée aux aléas, c'est-à-dire de rendre les communautés étanches aux aléas à l'aide d'ouvrages permettant de réduire les risques d'inondations. Les actifs et activités à risque ne sont pas délocalisés ni immunisés individuellement et les prévisions hydrologiques de débits et niveaux d'eau ne sont pas sujets à dévier du scénario SQ, mais en ceinturant la rivière de digues et de murets, il est possible d'éviter les débordements sur les actifs et activités à risque. Ce type de mesures a couramment été employé au Québec en bordure de cours et plans d'eau qui étaient particulièrement affectés lors des crues printanières, notamment pour protéger les bâtiments construits en milieux humides jouxtant les plans d'eau et faisant naturellement office de zone inondable et d'éponge pour les terres. La **Figure 24** présente cette mesure.

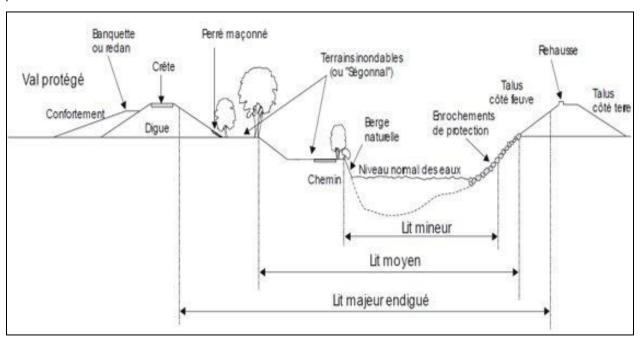


Figure 24. Représentation d'un ouvrage de digue Source : P. MÉRIAUX; I.BEGIC; PRÉSENTATION GEMAPI 27112015)

Endiguement des berges en centre urbains: Plus spécifiquement au bassin versant de la rivière Chaudière, ce scénario mise sur des digues et revêtements dans les centres urbains de six municipalités: Sainte-Marie, Scott, Vallée-Jonction, Saint-Joseph, Notre-Dame-des-Pins et Saint-Georges. La conception des ouvrages et leurs coûts sont basés sur le rapport de Tecsult (1994).

Coût des mesures: Les six digues, présentées dans le **Tableau 15**, entraînent des coûts totaux de 197,783 M\$. Ces coûts concernent la conception, la réalisation et l'entretien annuel de chaque ouvrage. Comme la durée de vie utile de chaque ouvrage est de 30 ans, les coûts de conception et de réalisation occurrent deux fois sur la période analysée. Les paramètres de coûts ainsi que l'ampleur des travaux propres à chaque municipalité sont tirés du rapport Tecsult (1994), indexé en \$ 2019.

Tableau 15. Ventilation des coûts, scénario immunisation collective

Municipalité	Coûts actualisés sur 50 ans
Sainte-Marie	-117 200 782 \$
Scott	-46 334 751 \$
Vallée-Jonction	-20 603 535 \$
Saint-Joseph	-6 208 728 \$
Saint-Georges	-4 463 849 \$
Notre-Dame-des-Pins	-2 971 774 \$
Coûts totaux :	-197 783 400 \$

Efficacité: En l'absence de modélisation hydrologique pour ce scénario, une efficacité de réduction des dommages de la submersion de 100 % en milieu urbain et de 0 % en milieu agricole a été attribuée au diques. En milieu urbain, il faut préciser que le seuil de conception des digues était de 1:100, donc l'estimation d'une efficacité complète est optimiste ; les événements excédents 1 % pourraient causer des dommages. En milieu agricole, la protection envisagée par l'aménagement de digues en centres urbains est peu probable, d'où une efficacité estimée nulle. Sous ces hypothèses d'efficacité, le scénario permet d'éviter 90 % des dommages du scénario de référence, liés à la submersion de la rivière Chaudière. Il est important de noter que l'ampleur des dommages évités attribuables à ce scénario est cependant surestimée, en raison de la portée très locale de l'efficacité des diques ainsi que des normes de débordement des ouvrages. Selon le rapport du comité d'experts indépendant chargé de trouver une solution aux inondations de la rivière Chaudière (2020), l'ouvrage de digue proposé par Tecsult à Sainte-Marie aurait vraisemblablement été dépassé par les inondations de 2019, même avec une revanche de 0,60 m. Les résultats économiques complets sont présentés à la section 6.3.3.

5.4.3 Milieux humides et hydriques acceptables et immunisation individuelle (MHH-acc + IMM-ind)

Ce premier scénario optimisé reprend intégralement celui de milieux humides et hydriques dits acceptables par le milieu (MHH-acc), bonifié par des mesures d'immunisation individuelle des bâtiments résidentiels et commerciaux (IMM-ind, voir **Tableau 16**). En provenance du scénario MHH-acc, ce scénario vise donc zéro perte nette de milieux humides à l'échelle de BV, la poursuite des pratiques actuelles du scénario de référence (voir section 5.2.1), en plus de la mise en œuvre des perspectives de développement des MRC et du verdissement d'une proportion des lots démolis. Venant des mesures d'immunisation individuelle (IMM-ind), le scénario vise une réduction de l'exposition du secteur résidentiel et du secteur commercial.

Mesures du scénario MHH-acc

Démolitions de lots et espace verts: Tel que pour le SQ, ce scénario prévoit la démolition de 646 lots ayant obtenus une autorisation des municipalités en date d'octobre 2020. De plus, il prévoit le verdissement d'une superficie de 0,20 km² de ces lots.

Perte de MHH: Tel que pour le SQ, ce scénario prévoit la destruction de 2,4 km² de MHH, en accord avec les plans d'urbanisme de la ville de Lévis. Il prévoit la destruction de 3,1 km² supplémentaires en vertu des perspectives de développement urbain et agricole des autres MRC, identifiés lors de l'ACP (**Figure 22**).

Gain de MHH: Pour balancer la destruction de MHH, ce scénario prévoit la restauration de 5,5 km², dans les espaces ciblés par les aménagistes lors de l'ACP et pour lesquels des prédispositions physiographiques ont été identifiées (encaissement, topographie, etc.).

Mesures d'immunisation individuelle

Retrait des actifs de valeur des sous-sols résidentiels: Mesure comportementale d'immunisation des sous-sols des résidences, par le retrait de l'ensemble des actifs de valeur. Cette mesure est appliquée à l'ensemble des résidences exposées aux inondations futures, pour les récurrences 2 ans (50 %) à 350 ans (0,035%). Selon notre modélisation, cette mesure toucherait jusqu'à 108 résidences. Elle est considérée à coût nul, une hypothèse cependant testée en analyse de sensibilité (6.5.1.1).

Relocalisation des bâtiments résidentiels: Relocalisation des résidences lorsque le cumulatif des dommages espérés du bâtiment dépasse 100 000 \$ ou 50 % de la valeur du bâtiment, soit le plafonnement de l'aide financière du MSP. Selon notre modélisation, cette mesure relocaliserait graduellement 75 résidences en zone 0-20 ans, modélisée en climat futur. Le coût d'achat de la nouvelle propriété est inclus à cette mesure et fixé à la valeur foncière de l'immeuble relocalisé.

Élévation des bâtiments commerciaux: Rehaussement du premier plancher des commerces, d'une hauteur de 4 pieds, lorsque le cumulatif des dommages espérés du bâtiment dépasse 100 000 \$, soit l'aide financière proposée par le MSP (2019) pour ce type de travaux. Selon notre modélisation, cette mesure rehausserait graduellement 12 commerces en zone 0-20 ans, modélisée en climat futur.

Coût des mesures: Ce scénario entraîne des coûts de 9,2 M\$, majoritairement liés à la relocalisation des résidences (8,216 M\$) et au soulèvement du premier plancher des commerces (0,659 M\$) et dans une moindre mesure, au verdissement des lots démolis (0,335 M\$). Tel que mentionné pour le scénario MHH-acc, les coûts totaux de destruction et de restauration des MHH sont considérés comme étant entièrement couverts par le règlement sur la compensation pour l'atteinte aux MHH. L'hypothèse sous-jacente est que le développement économique et agricole entraînant la perte d'une superficie donnée de MHH est suffisamment rentable pour financer la restauration d'une superficie équivalente de MHH, en vertu du règlement sur la compensation pour l'atteinte aux MHH. Voir la discussion à la section 7.3 au sujet de cette hypothèse. Le **Tableau 16** rapporte les différents coûts associés à ce scénario.

Tableau 16. Ventilation des coûts, scénario MHH-acc + IMM-ind

Coût des mesures	Coûts sur 50 ans
Réalisation et entretien	-9 211 300 \$
Verdissement des lots démolis (MHH-acc)	-335 400 \$
Restauration de MHH (MHH-acc)	-
Destruction de MHH (MHH-acc)	-
Relocalisation des résidences (IMM-ind) –	
Démolition des lots	-809 300 \$
Achat de nouvelles propriétés	-7 407 600 \$
Élévation des commerces (IMM-ind)	-659 000 \$
Coût d'opportunité	-
Bénéfices connexes des mesures	-
Coûts totaux :	-9 211 300 \$

Efficacité: En l'absence de modélisation hydrologique pour ce scénario, l'efficacité sur la réduction des pics de crue est basée sur celle du scénario MHH-acc seul. L'hypothèse sous-jacente est que la relocalisation graduelle des résidences en zone 0 – 20 ans n'a aucun impact hydrologique. Ainsi, la combinaison du scénario MHH-acc et des mesures d'immunisation individuelle aux bâtiments résidentiels et commerciaux permettent d'éviter 44 % des coûts du scénario de référence lié à la submersion de la rivière Chaudière. La majorité de la réduction des coûts provient des mesures individuelles (43,5 %, voir section 6.3.4). Les secteur agricole, industriel et

institutionnel sont cependant laissés pour compte, puisqu'aucune mesure d'immunisation ou de réduction de l'exposition ne leurs sont appliqués. L'effet combiné des changements climatiques et des changements d'utilisation du territoire sous ce scénario amène également une amplification préoccupante des crues de faible récurrence pour le secteur de la rivière Beaurivage (**Tableau 12**). En l'absence de modélisation hydraulique sur les affluents, il n'a cependant pas été possible de quantifier et monétiser cet impact préoccupant. Il sera néanmoins traité de façon qualitative au chapitre 6.5.3.

5.4.4 Milieux humides et hydriques distribués et immunisation individuelle (MHH-dis + IMM-ind)

Le scénario de *Milieux humides et hydriques distribués et immunisation individuelle* (MHH_dis + IMM_ind) reprend intégralement les mesures du scénario précédent (MHH_acc + IMM_ind) en modifiant la distribution spatiale des MHH restaurés et ajoutant une mesure de bandes riveraines de 15 mètres spécifique au milieu agricole en zone 0-2 ans. Ce scénario vise zéro perte nette de milieux humides à l'échelle des sous-bassins hydrographiques (à l'exception de la ville de Lévis) plutôt qu'à l'échelle du bassin versant complet, la poursuite des pratiques actuelles du scénario de référence (voir section 5.2.1), en plus de la mise en œuvre des perspectives de développement des MRC et du verdissement d'une proportion des lots démolis et de l'immunisation individuelle des bâtiments résidentiels et commerciaux.

Mesures d'aménagement de milieux naturels (du scénario MHH-dis)

La répartition de la superficie des quatre mesures d'aménagement de milieux naturels, par MRC du bassin versant est présentée au **Tableau 17**.

Tableau 17. Répartition des mesures du scénario MHH-dis, par MRC

	мнн	(km²)	Lots (unités, km²)		Bandes riv. (km²)
MRC	Gain	Perte	Démolis	Esp. verts	
Robert-Cliche	0,01	0,7	76	-	0,11
Lévis	1,9	2,4	-	-	0,003
Les Etchemins	0,4	0,1	-	-	-
Les Appalaches	-	-	-	-	-
La NouvBeauce	0	0,4	566	0,2	0,06
Beauce-Sarti.	0,9	0,0	4	-	0,02
Le Granit	0,6	0,3	-	-	0,02
Lotbinière	1,7	1,7	-	-	-
Total:	5,5 Km ²	5,5 km ²	646 u.	0,2 km ²	0,21 km ²

Démolitions de lots et espace verts: Tel que pour le SQ, ce scénario prévoit la démolition de 646 lots ayant obtenus une autorisation des municipalités en date d'octobre 2020. De plus, il prévoit le verdissement d'une superficie de 0,20 km² de ces lots.

Perte de MHH: Tel que pour le SQ, ce scénario prévoit la destruction de 2,4 km² de MHH, en accord avec les plans d'urbanisme de la ville de Lévis. Il prévoit la destruction de 3,1 km² supplémentaires issue des perspectives de développement urbain et agricole des autres MRC, identifiés lors de l'ACP.

Gain de MHH: Pour compenser la destruction de MHH, ce scénario prévoit la restauration de 5,5 km², avec une distribution mitoyenne entre les niveaux dits acceptable (MHH-acc) et efficace (MHH-eff). Les MHH provenant du scénario MHH-eff sont utilisés pour atteindre un objectif de zéro perte nette de milieux humides à l'échelle des sous bassins - plutôt qu'à l'échelle du bassin versant complet- et une répartition égale entre la restauration dans les lieux sinueux connectés au chenal principal et ailleurs dans le bassin versant (ruisseaux, affluents, milieux urbains, milieux forestiers).

Bandes riveraines: Afin d'offrir une protection supplémentaire contre la submersion et l'érosion des terres agricoles aux abords du chenal principal, le scénario prévoit l'implantation de bandes riveraines de 15 mètres au milieu agricole inclus dans la zone inondable future 0-2 ans. La superficie des bandes riveraines atteint 0,213 km² et sont composées de 2 rangées d'arbustes et 4 rangées de saules hybrides, lesquels offrent des bénéfices de récolte pour pâte ou biomasse, avec une marge brute de 35 %.

Mesures d'immunisation individuelle – voir page 77.

Coût des mesures: Ce scénario entraîne un coût total de 9,498 M\$, majoritairement liés à la réalisation et l'entretien des mesures, soit pour la relocalisation des résidences (8,216 M\$), l'élévation du premier plancher des commerces (0,659 M\$) et les bandes riveraines (0,312 M \$). Tel que mentionné pour le scénario MHH-acc, les coûts totaux de destruction et de restauration des MHH sont considérés comme étant entièrement couverts par le règlement sur la compensation pour l'atteinte aux MHH (voir la discussion à la section 7.3 au sujet de cette hypothèse). La mesure de bandes riveraines entraîne également des coûts d'opportunité de 0,189 M\$ liés à la perte d'usage de terres agricoles, compensés cependant par les bénéfices de 0,214 M \$ venant de la récolte de bois de saules hybrides présents dans les BR. Le **Tableau 18** rapporte les différents coûts associés à ce scénario

Tableau 18. Ventilation des coûts du scénario MHH-dis + IMM-ind

Coût des mesures	Coûts sur 50 ans
Réalisation et entretien	-9 523 500 \$
Verdissement des lots démolis (MHH-acc)	-335 400 \$
Relocalisation des résidences –	
Démolition des lots (IMM-ind)	-809 300 \$
Achat de nouvelles propriétés	-7 407 600 \$
Relocalisation des résidences –	-7 407 600 \$
Nouvelles propriétés (IMM-ind)	
Élévation des commerces (IMM-ind)	-659 000 \$
Bandes riveraines	-312 200 \$
Coût d'opportunité	-189 700 \$
Bandes riveraines	-189 700 \$
Bénéfices connexes des mesures	214 700 \$
Bandes riveraines	214 700 \$
Coûts totaux :	-9 498 500 \$

Efficacité : L'efficacité sur la réduction des pics de crue est basée sur celle du scénario MHH-acc + IMM-ind. Ainsi, les deux scénarios permettent d'éviter autant de coûts liés à la submersion du chenal principal, soit 44 % du scénario de référence. Les bandes riveraines et MHH aux abords du chenal principal prévus au scénario MHH-dis permettent d'éviter légèrement plus de coûts au secteur agricole (+29 000\$) et dégagent des bénéfices additionnels liés à la qualité de l'eau (+615 700 \$). Les résultats économiques complets sont présentés à la section 6.3.5. L'hypothèse d'efficacité équivalente entre les deux scénarios devrait cependant être validée par modélisation hydrologique. Le scénario MHH-dis vise un objectif de zéro perte nette de MHH par sous bassin, impliquant une redistribution des MHH restaurés dans le secteur Basse Chaudière vers le secteur Beaurivage. Par rapport au MHH-acc, cette redistribution pourrait atténuer l'augmentation prévue sous le scénario MHH_acc des débits de crues de la rivière Beaurivage, mais diminuer l'efficacité sur les pics de crues du secteur basse Chaudière (Tableau 19). De façon préoccupante, il serait important de valider si la diminution de MHH dans le secteur basse Chaudière contribue à augmenter significativement les pics de crues de ce secteur.

Tableau 19. Comparaison des bilans nets de MHH entre le scénario MHH-dis et MHH-acc et pourcentage de variation des débits des crues sous différentes périodes de retour pour le scénario MHH-acc, par rapport au scénario de référence.

	Bilan net de MHH (km²)		Débits de crues par période de retour, MHH-acc			
Secteur	MHH-dis	МНН-асс	Q2	Q20	Q100	Q350
Basse Chaudière -Lévis	-1,8	-1,8	-2,4 %	-0,8 %	-0,1 %	0,3 %
Basse Chaudière - Autre	0,4	1,5	-2,4 70	0,0 70	0,1 70	0,0 70
Moyenne Chaudière	0,5	0,6	0,4 %	0,1 %	0 %	-0,1 %
Haute Chaudière	0,8	0,8	-0,4 %	-0,4 %	-0,4 %	-0,4 %
Beaurivage	0,0	-1,1	7,7 %	0,1 %	-2,9 %	-4,7 %
Famine	0,0	-0,1	-1,8 %	0,2 %	0,9 %	1,5 %

Source : Bilan de MHH : Calcul des auteurs; débits de crues : Leconte et Bizhanimanzar, 2020.

5.5 SYNTHÈSE DES SCÉNARIOS

Le **Tableau 20** synthétise la description des scénarios et le **Tableau 21** résume les impacts identifiés des scénarios.

Tableau 20. Synthèse des paramètres, coûts et efficacités des scénarios

Tableau 20.		es, coûts et efficacités des 	Coûts des	Efficacité
Scénario	Mesures	Localisation/dimensio ns	mesures actualisés 50 ans	(% des coûts du SQ)
SQ: Scénario de référence,	remboursements	Jusqu'à 535 résidences et 1350 hectares agricoles inondées		-
statu quo	Démolition de lots	646 lots		
1. MHH-ACC : Milieux humides et	SQ + Destruction/ Restauration de MHH	5,5 / 5,5 km ²		-0,5 %
hydriques acceptables	Verdissement des lots	0,2 km ²	0,335 M\$	0,0 70
	Bandes riveraines	63,0 km ²	74,062 M\$	
2. MHH-EFF: Milieux humides et	Corridor inondable - Réaménagement des milieux urbains	1028 lots démolis 8,2 km² d'espaces vert	304,034 M\$	71 %
hydriques efficaces	- Restriction aux cultures fourragères		2,414 M\$	
	- Restauration des MHH	27,4 km ²	83,522 M\$	
3. IMM-COLL: Immunisatio n collective	Digues	Sainte-Marie, Saint- Joseph, Scott, Vallée- Jonction, Saint-Georges, Notre-Dame-des-Pins	197,783 M\$	90 %
	MHH-acc +		0,335 M\$	
4. MHH-acc + IMM-ind : MHH	Retrait des actifs aux sous- sols résidentiels	108 résidences	-	
acceptables et	Relocalisations résidentielles	75 résidences	8,217 M\$	44 %
immunisation individuelle	Élévation des commerces	12 commerces	0,659 M\$	
	SQ +			
5. MHH-dis +	Destruction/ Restauration de MHH	5,5 / 5,5 km ²	-	
IMM-ind: MHH distribués et	Bandes riveraines	0,2 km ²	0,287 M\$	
	Retrait des actifs aux sous- sols résidentiels	108 résidences	-	44 %
immunisation individuelle	Relocalisations résidentielles	75 résidences	8,217 M\$	
individuelle	Élévation des commerces	12 commerces	0,659 M\$	

Tableau 21. Résumé des impacts anticipés de chacun des scénarios par rapport au scénario de référence

Scénarios	Agricole	Commercial et industriel	Résidentiel	Psycho- social	Municipal	Économique	Environ- nemental
	Pertes de terres	Dommages	Pertes de terrains	Soins de santé, Dépenses complément aires	Dépenses en gestion des	Perte de du productivité due à la fermeture des routes	Séquestration du carbone
	Dommages aux cultures	aux bâtiments	Dommages aux bâtiments	Perte de productivité	urgences et nettoyage des débris		Qualité de l'eau
	Nettoyage des champs		Évacuation	Perte de qualité de vie			Biodiversité
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-ACC + IMM-IND: Milieux humides et hydriques acceptables + immunisation individuelle	+ ou -	+++	+++	+++	++	+	++
5. MHH-DIS + IMM-IND: Milieux humides et hydriques distribués et immunisation individuelle	++	+++	+++	+++	++	+	++

6. ANALYSE ÉCONOMIQUE

Le volet économique de l'analyse se concentre sur la quantification en valeur monétaire des coûts et avantages du scénario de référence et des différents scénarios d'adaptation, sur un horizon temporel donné. La première section de ce chapitre (6.1) décrit la méthodologie employée afin de quantifier les coûts et avantages, par les catégories d'impacts identifiés préalablement (voir chapitre 5.2). La section 6.2 présente ensuite la valeur monétaire de l'ensemble des coûts et avantages estimés sur un horizon temporel de 50 ans pour le scénario de référence, soit l'état de référence du système à partir duquel les coûts et avantages des scénarios d'adaptation sont ensuite évalués et présentés séparément à la section 6.3. Afin de comparer leur performance économique sur une base commune, la somme sur 50 ans des coûts et avantages de chaque scénario d'adaptation est calculée par rapport au scénario de référence et rapportée en 2 deux indicateurs en \$ constant de 2019: 1) la valeur actuelle nette (VAN) et le ratio coûts-avantages. Ces indicateurs permettent de comparer entre eux les scénarios d'adaptation à la section 6.4 et ainsi formuler une conclusion préliminaire. Afin d'évaluer la robustesse des résultats, trois analyses complémentaires sont effectuées à la section 6.5. Il s'agit des analyses de sensibilité (6.5.1), dont l'objectif est de tester la sensibilité de la VAN des scénarios suite à une variation de certains paramètres, suivi d'une analyse de redistribution par acteurs (6.5.2), permettant de qualifier de façon approximative l'équité des scénarios et finalement de l'analyse des risques et enjeux résiduels (6.5.3) dont la monétisation des impacts n'a pas été réalisée. Une synthèse des résultats des analyses et une conclusion finale sont présentées à la section 6.6.

6.1 MÉTHODOLOGIE

Tel qu'indiqué au chapitre 5.2.2, six catégories d'impacts des scénarios d'adaptation ont été sélectionnés afin de quantifier la valeur monétaire (monétisation) de leurs coûts et/ou avantages par rapport au scénario de référence, sur une période de 50 ans. Le Tableau 22 spécifie les méthodes de quantification, les hypothèses, l'étendue des valeurs, ainsi que les sources de données choisies dans le cadre cette analyse coûtsavantages. Les tableaux détaillés des valeurs (ex. modèles de rotation, probabilité mensuelle d'inondation, charge et flux des services écosystémiques selon les scénarios) se trouvent à l'Annexe G (voir aussi le quide méthodologique). Les dommages liés aux inondations ont été comptabilisés selon l'approche classique des dommages annuels moyens (DAM, voir guide méthodologique). L'approche actuarielle fréquence-sévérité peut cependant 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 du guide méthodologique 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.

Tableau 22. Paramètres de monétisation des impacts

	Impact	Méthode de quantification	Hypothèses	Données	Valeurs	Sources
	Dommage aux cultures	Prix de marché	La perte de rendement varie selon le mois, la superficie et	-Probabilité d'inondation mensuelle par horizon climatique	1 à 82 %	Leconte et Bizhanimanzar, 2020
			le type de culture	-Perte de rendement mensuelle -Modèle de rotation des cultures	0 à 100 % 0 à 100 %	Penning-Rowsell et al., 2013, adapté par le CLS FADQ, 2019, adapté par le CLS
				-Marge sur coûts variables, par budget / ha	238 à 1000 \$/ha	CRAAQ, 2018a,b,c,d 2019a,b,c
Agricole	Coût de nettoyage de débris en champs	Prix de marché Enquête terrain	Le coût varie selon le mois, la superficie et le type de culture	-Probabilité d'inondation mensuelle -Modèle de rotation des cultures -Salaire horaire -Coût horaire machinerie -Travail manuel/superficie /mois inondé/culture -Travail machinerie/superficie /mois inondé/culture	1 à 47 % 0 à 100 % 15 \$/h 30,69 \$/h 0 à 20 h/ha selon le mois, la culture 0 à 10 h/ha selon le mois, la culture	Leconte et Bizhanimanzar, 2020 FADQ, 2019, adapté par le CLS Enquête, validation CLS CRAAQ, 2014 Enquête, validation CLS Enquête, validation CLS
m. & Indust.	Coûts des dommages aux bâtiments par la submersion	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	-Profondeur d'eau au centroïde du lot - % d'endommagement à la structure selon le type de bâtiment - % d'endommagement au contenu selon le type	0 à 2 m 0 à 100 % 0 à 100 %	MAMH, 2019; Leconte et Bizhanimanzar, 2020 CMI Lac Champlain et Rivière Richelieu, in prep. CMI Lac Champlain et Rivière Richelieu, in
Comm.			bâtiment et selon le type de bâtiment	de bâtiment		prep.)

	Impact	Méthode de quantification	Hypothèses	Données	Valeurs	Sources
	Dommages aux résidences par la submersion	Courbes de profondeur d'eau- dommages	La valeur monétaire des dommages subis à la structure des bâtiments et leurs contenus varie selon	-Profondeur d'eau au centroïde du lot - % d'endommagement à la structure selon le type de bâtiment	0 à 2 m 0 à 100 %	MAMH, 2019 ; Leconte et Bizhanimanzar, 2020 Bonnifait, 2005
			la profondeur d'eau atteinte dans le bâtiment et selon le type de bâtiment	- % d'endommagement au contenu selon le type de bâtiment	O à 100 %	CMI Lac Champlain et Rivière Richelieu, in prep.
	Dépenses engendrées			-Courbe de profondeur d'eau-durée d'évacuation	0 à 365 jrs	FEMA 2009
Résidentiel	par les évacuations			- Montant quotidien prévu au programme d'aide financière	20\$/jr, ou 1000\$/mois/ré sidence principale si RDC atteint	MSP, 2009
	Dépenses et pertes chez les sinistré s	Transfert de valeurs	La prévalence supplémentaire de certains troubles de	-Profondeur d'eau au centroïde du lot	0 à 2 m	MAMH, 2019 ; Leconte et Bizhanimanzar, 2020
			santé chez l'adulte exposé aux inondations engendre une perte	-Nombre d'adultes / ménage	1,56 adulte/ménag e	Recensement 2016
Psychosocial			de productivité, une perte de qualité de vie, des dépenses complémentaires et des dépenses en soins de santé supplémentaires	-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
	Dépenses en gestion des urgences	Transfert de valeur	Les dépenses de gestion des urgences (frais administratif, de	-Dommages résidentiels à la structure	(voir plus haut)	(voir plus haut)
			voirie et de service d'incendie) représentent une proportion supplémentaire aux dommages résidentiels	-Facteur multiplicateur	10,70 %	Penning-Rowsell, 2014
	Dépenses en nettoyage des débris	Transfert de valeur	Les dépenses de nettoyage des débris représentent une	-Dommages résidentiels à la structure	(voir plus haut)	(voir plus haut)
pal			proportion supplémentaire aux dommages	-Volume de débris/m² de bâtiment inondé	21 à 36 m² par bâtiment inondé	CMI Lac Champlain et Rivière Richelieu, in prep.
Municipal			résidentiels basée sur le volume et les coûts de nettoyage	-Coûts de nettoyage	14,37 \$/m²	CMI Lac Champlain et Rivière Richelieu, in prep.
	Coûts des dommages	Courbes de profondeur	La valeur monétaire des dommages subis	-Profondeur d'eau au centroïde du lot	0 à 2 m	MAMH, 2019 ; Leconte et Bizhanimanzar, 2020
a.	aux bâtiments institutionne	d'eau- dommages	à la structure des bâtiments et leurs contenus varie selon la profondeur d'eau atteinte dans le bâtiment et selon le type de bâtiment	- % d'endommagement à la structure selon le type de bâtiment	0 à 100 %	Bonnifait, 2005
Économie	Is par la submersion			- % d'endommagement au contenu selon le type de bâtiment	O à 100 %	CMI Lac Champlain et Rivière Richelieu, in prep.)

	Impact	Méthode de quantification	Hypothèses	Données	Valeurs	Sources
	Séquestratio n du carbone	Transfert de valeur	La valeur du service = charge de carbone séquestrée annuellement x valeur annuelle du	-Différence de charge entre scénario de référence et scénarios d'adaptation	3506 à 19634 t carbone (0,01% à 0,05 %)	Ce projet, modélisation par InVEST
			coût social du carbone	-Coût social du carbone/décennie (extrapolation linéaire)	50,5 à 105,42 \$/t (2020 à 2070)	ECCC, 2016
	Qualité de l'eau	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	N:-328 486 à - 3 845 kg/an (- 0,1% à -13 %) P:-16 049 à - 131 kg/an (-0,4% à -44 %) Séd:-12 044 à +58 t/an (-6 % à +0,03%)	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
Environnement	Biodiversité	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	-933 à +90 423 (-0,02% à +2%)	Ce projet, modélisation par InVEST
Enviro				-Valeur par acre de création d'un habitat terrestre arboré	451,30 \$CAD	Borisova-Kidder, 2006

6.2 VALEUR MONÉTAIRE DU SCÉNARIO DE RÉFÉRENCE (SQ)

Tel que présenté au chapitre 5.2, le scénario de référence est caractérisé par la poursuite: 1) des autorisations de destruction de MHH en vertu du plan d'urbanisme de la ville de Lévis, 2) des autorisations de démolitions des lots suite aux inondations du printemps 2019 et 3) de l'approche réglementaire d'indemnisation des dommages liés à la submersion. Les coûts et avantages liés à ces pratiques sont calculés par poste d'impacts pour un aléa fluvial: la submersion du chenal principal de la rivière Chaudière (**Tableau 23**). En raison de leur modélisation incomplète, les aléas d'érosion, d'embâcles et de submersion des affluents ont été exclus de la monétisation du scénario de référence. Ces aléas sont toutefois considérés qualitativement au chapitre 6.5.3.

Tableau 23. Valeur monétaire des coûts du scénario de référence

	Valeur actualis	ée sur 50 ans
Impacts par secteur	RCP 4.5	RCP 8.5
Résidentiel	-19 652 500 \$	-21 846 000 \$
Dommages aux résidences par la submersion	-19 354 600 \$	-21 516 400 \$
Dépenses engendrées par les évacuations	-297 900 \$	-329 600 \$
Psychsocial	-8 173 000 \$	-9 031 600 \$
Dépenses complémentaires (Dépenses en alcool et tabagisme)	-73 100 \$	-80 800 \$
Soins de santé (Traitements, hospitalisations, médications, etc.)	-183 500 \$	-202 800 \$
Perte de productivité (Temps rémunéré)	-3 002 000 \$	-3 317 400 \$
Qualité de vie	-4 914 400 \$	-5 430 600 \$
Agricole	-3 878 800 \$	-4 208 100 \$
Dommage aux cultures -Rotation type - Basse Chaudière	-3 093 600 \$	-3 323 300 \$
Dommage aux cultures -Production intensive	-64 800 \$	-67 700 \$
Dommage aux cultures -Rotation type - Moyenne Chaudière	-63 000 \$	-52 000 \$
Dommage aux cultures -Pâturage	-26 700 \$	-28 000 \$
Nettoyage des débris -Rotation basse Chaudière	-606 400 \$	-711 400 \$
Nettoyage des débris -Production intensive	-5 400 \$	-7 000 \$
Nettoyage des débris -Rotation moyenne Chaudière	-8 400 \$	-7 000 \$
Nettoyage des débris -Pâturage	-10 500 \$	-11 700 \$
Commercial et industriel	-3 771 200 \$	-4 886 600 \$
Commercial	-3 220 700 \$	-4 111 800 \$
Institutionnel	-550 500 \$	-774 800 \$
Municipalité	-1 621 900 \$	-1 815 200 \$
Nettoyage des débris par la municipalité (quartiers résidentiels)	-140 400 \$	-156 000 \$
Gestion des urgences	-1 481 500 \$	-1 659 200 \$
Économie	-2 241 000 \$	-2 605 200 \$
Institutionnel	-2 241 000 \$	-2 605 200 \$
Valeur actuelle nette totale :	-39 338 400 \$	-44 392 700 \$

Actualisés sur une période de 50 ans, les sommes des coûts associés au scénario de référence totalisent respectivement 39,338 M\$ et 44,393 M\$ sous les scénarios hydro-climatiques médians du Representative Concentration Pathways (RCP) 4.5 et 8.5 (GIEC, Definition of Terms Used Within the DDC Pages). Les coûts supplémentaires associés au RCP 8.5 sont principalement conduits par une augmentation des coûts au secteur résidentiel (44 %) et du secteur commercial et industriel (22 %). Pour des raisons de simplification, les analyses suivantes concernent uniquement le scénario hydro-climatique médian du RCP 4.5. Au chapitre 6.5.1, une analyse de sensibilité est produite afin de tester la robustesse des résultats sous les scénarios situés aux extrêmes des distributions hydro-climatiques, soit le 10° percentile du RCP 4.5 et le 90° percentile du RCP 8.5.

Impacts résidentiels et psychosociaux

Tels que le dénombrement des actifs et activités à risque du chapitre 4.3 permettait de l'anticiper, le secteur résidentiel représente les coûts les plus importants (-19 652 500 \$ dont 13, 85 M \$ en dommages à la structure des bâtiments) liés aux inondations des municipalités aux abords de la rivière Chaudière, sous le scénario de référence. En effet, le secteur résidentiel absorbe à lui seul la moitié des coûts futurs liés à aléa de submersion de la rivière Chaudière (**Tableau 23**) et ce, malgré le retrait de 646 lots démolis ou à démolir (en date d'octobre 2020) de la modélisation économique. La majorité (75 %) des coûts de ce secteur est attribuable aux 89 bâtiments résidentiels situés en zone inondable future 0 -20 ans, obtenue par modélisation hydrologique et géostatistique (**Tableau 24**). Notons également que la plus grande étendue d'eau modélisée impacterait jusqu'à 538 bâtiments résidentiels.

De plus, l'approche actuarielle permet d'estimer une probabilité d'environ 57 % que la valeur actualisée des dommages à la structure des bâtiments dépasse la valeur de 13,85 M \$ calculée à l'aide des dommages annuels moyens. Ce résultat soutient l'importance de tenir compte des scénarios extrêmes pouvant générer des dommages très élevés dans la prise de décision. Voir l'annexe D du <u>guide méthodologique</u> décrivant l'approche actuarielle et les dommages cumulatifs aux structures résidentiels résultants.

Tableau 24. Dommages au secteur résidentiel par zone inondable, RCP 4.5

Zone inondable modélisée	Nombre de bâtiments	Dommage annuel espéré par bâtiment	Valeur actualisée des dommages sur 50 ans	Contribution à la VAN du secteur
100 à 5 % (0 - 20 ans)	89	-5 600 \$	-14 705 200 \$	75%
5 à 1 % (20 – 100 ans)	264	-600 \$	-4 556 500 \$	23%
1 à 0,3 % (100 - 350 ans)	185	-100 \$	-390 800 \$	2%
Total:	538	-6 300 \$	-19 652 500 \$	100%

En plus des dommages matériels et des dépenses engendrées par les évacuations du secteur résidentiel, des coûts psychosociaux de l'ordre de 8,173 M \$ incombent également aux sinistrés. Pour chaque dollar de coûts actualisés au secteur résidentiel, environ 0,42 \$ s'ajoute donc en raison des coûts et des pertes supplémentaires vécues par les sinistrés. Ensemble, les impacts résidentiels et psychosociaux absorbent 71 % des coûts actualisés du scénario de référence, liés à la submersion de la rivière Chaudière. Les 29 % restants se séparent de façon presqu'égale entre 3 autres secteurs : agricole, commercial & industriel et municipalité & économie, pour environ 3,8 M \$ chaque.

Impacts agricoles

Les impacts agricoles des inondations se traduisent par une perte de revenu net des productions agricoles (dommage aux cultures) d'environ 3,2481 M\$, tandis que le coût de nettoyage de ces productions atteint près de 631 000 \$, soit environ 1/5 des pertes de revenu net. Ensemble, le coût actualisé sur une période de 50 ans des dommages aux cultures et du nettoyage des débris totalise environ 3,879 M \$, soit 10 % du coût total de submersion associé au scénario de référence. Au **Tableau 23**, on remarque que les coûts du secteur agricole sont presqu'entièrement (>95 %) concentrés dans le sous bassin hydrographique de la basse Chaudière. Ceci s'explique par la présence d'environ 636 hectares (sur 642 ha ou 99 %) de terres cultivées en zone 0-2 ans dans le secteur hydrographique de la basse Chaudière. En effet, les dommages générés par les parcelles cultivées en zone inondable 0 -2 ans s'élèvent à environ 2,757 M\$, ce qui représente 71 % des coûts totaux du secteur agricole lié à la submersion. Notons également que la plus grande étendue d'eau modélisée impacterait jusqu'à 1372 hectares de cultures agricoles.

Tableau 25. Dommages au secteur agricole par zone inondable, RCP4.5

Zone inondable modélisée	Superfici e inondée	Part du secteur Basse Chaudière	Dommage annuel espéré par hectare inondé	Valeur actualisée des dommages sur 50 ans	Contribution à la VAN du secteur
0 à 50 % (0 - 2 ans)	642 ha	99 %	146 \$/ha	-2 757 000 \$	71%
50 à 5 % (2 - 20 ans)	588 ha	94 %	65 \$/ha	-1 093 200 \$	28%
5 à 1 % (20 - 100 ans)	89 ha	82 %	10 \$/ha	-25 800 \$	1%
1 à 0,3 % (100 – 350 ans)	53 ha	86 %	2 \$/ha	-2 800 \$	0,1%
Total:	1 372 ha	-	222 \$/ha	-3 878 800 \$	100%

Impacts commerciaux et industriels

Avec un coût actualisé sur 50 ans de 3,771 M\$, les impacts de la submersion au secteur commercial et industriel contribuent au coût total de la submersion du scénario référence de façon presque équivalente au secteur agricole, soit environ 10 %. Les coûts attribuables aux bâtiments commerciaux sont par contre 6 fois plus élevés que les coûts attribuables aux bâtiments industriels (**Tableau 23**). Selon notre modélisation des zones inondables futures, jusqu'à 100 bâtiments commerciaux pourraient être inondés contre seulement 6 bâtiments industriels (**Tableau 26**). Parmi les 100 commerces touchés, 13 d'entre eux se trouvent en zone inondable 0 – 20 ans et contribuent à plus de la moitié (54 %) de la valeur actuelle nette des coûts du secteur commercial. Les 59 commerces en zone inondable 0 -100 ans contribuent également significativement (46 %) à la valeur actuelle des coûts du secteur commercial.

Tableau 26. Dommages au secteur commercial et industriel par zone inondable, RCP 4.5

Tableda 20. Dominiages da sectedir commercial et madsener par zone mondable, rei 1.5					
Zone inondable modélisée	Nombre de bâtiments	Dommage annuel espéré par bâtiment	Valeur actualisée des dommages sur 50 ans	Contribution à la VAN du secteur	
		Commercial			
100 à 5 % (0 - 20 ans)	13	-4700 \$	-1 752 300 \$	54%	
5 à 1 % (20 – 100 ans)	59	-900 \$	-1 465 600 \$	46%	
1 à 0,3 % (100 – 350 ans)	28	-4 \$	2 700 \$	0%	
Total :	100	-5 600 \$	-3 220 700 \$	100%	
		Industriel			
100 à 5 % (0 - 20 ans)	2	-8 400 \$	-492 900 \$	90%	
5 à 1 % (20 – 100 ans)	4	-500 \$	-57 600 \$	10%	
1 à 0,3 % (100 – 350 ans)	-	-	-	-	
Total:	6	-8 900 \$	- 550 500 \$	100%	

Autres impacts -municipalité et économie

Les autres coûts du scénario de référence sont associés au secteur municipal (gestion des urgences et nettoyage des débris: -1 621 900 \$) et au secteur économique (bâtiments institutionnels: -2 241 000 \$). Ensemble, ces deux secteurs comptent pour environ 10 % du coût total de la submersion du scénario référence. Selon notre modélisation des zones inondables futures, jusqu'à 10 bâtiments institutionnels pourraient être inondés, dont deux églises et un bureau de poste en zone 0-20 ans alors que deux écoles primaires et trois fondations et œuvres de charité en zone 0-100 ans. Au-delà des dommages directs aux matériels et aux structures, l'inondation des bâtiments institutionnels peut engendrer une importante perturbation de leurs services causant des impacts sanitaires, socio-culturels et économiques non négligeables. Dans la présente analyse coûts-avantages, il n'a été possible de monétiser ces impacts indirects, mais le risque associé à l'exposition des bâtiments institutionnels, en particulier des 2 écoles primaires, est préoccupant.

Tableau 27. Dommage aux bâtiments institutionnels (secteur économique) par zone inondable, RCP 4.5

Zone inondable modélisée	Nombre de bâtiments	Dommage annuel espéré par bâtiment	Valeur actualisée des dommages sur 50 ans	Contribution à la VAN du secteur
100 à 5 % (0 - 20 ans)	4	-10 300 \$	-1 613 800 \$	72%
5 à 1 % (20 – 100 ans)	6	-3 900 \$	-627 200 \$	28%
1 à 0,3 % (100 – 350 ans)	-	-	-	-
Total:	10	-17 500 \$	-2 241 000 \$	100%

6.3 RÉSULTATS ÉCONOMIQUES DES SCÉNARIOS D'ADAPTATION

À partir de la valeur monétaire du scénario de référence (6.2), ce chapitre présente la performance économique des scénarios d'adaptation en y comparant leurs coûts et avantages respectifs sur une période de 50 ans. Deux indicateurs sont utilisés afin de comparer les scénarios sur une base commune, soit 1) la valeur actuelle nette (VAN) et le ratio coûts-avantages. Du point de vue collectif, un scénario d'adaptation est préférable au scénario de référence si sa VAN est positive et le ratio coûts-avantages supérieur à 1, autrement, le statu quo s'impose. En cas de conclusion contradictoire entre les deux indicateurs économiques, la VAN est préférée au ratio coûts-avantages.

6.3.1 Milieux humides et hydriques acceptables (MHH-acc)

Le scénario de milieux humides et hydriques (MHH-acc) vise zéro perte nette de milieux humides et continue de voir une augmentation des milieux urbains et agricoles, au profit de la réduction de la superficie des milieux arbrisseaux et forestiers. Autrement dit, ce scénario, dit plus acceptable par les communautés, voit la mise en œuvre des plans d'urbanisme tel qu'ils étaient prévus en 2019. Le **Tableau 28** présente la valeur monétaire sur une période de 50 ans des coûts et avantages de ce scénario, par rapport au scénario de référence, ainsi que les deux indicateurs de performance économique : la VAN et ratio coûts-avantages.

Tableau 28. Valeurs actualisées des coûts et avantages de MHH-acc, par rapport au scénario de référence (\$2019)

reterence (\$2019)		
Impacts par secteur	Valeur actualisée des coûts et avantages sur 50 ans	Proportion de coûts évités p/r au coût total du SQ
Résidentiel	48 700 \$	0,12%
Dommages aux résidences par la submersion	47 100 \$	
Dépenses engendrées par les évacuations	1 600 \$	
Psychsocial	7 600 \$	0,02%
Dépenses complémentaires (Dépenses en alcool et tabagisme)	100 \$	
Soins de santé (Traitements, hospitalisations, médications, etc.)	200 \$	
Perte de productivité (Temps rémunéré)	2 800 \$	
Qualité de vie	4 500 \$	
Agricole Agricole	104 400 \$	0,27%
Dommage aux cultures	87 500 \$	
Nettoyage des débris	16 900 \$	
Commercial et industriel	17 100 \$	0,04%
Commercial	15 300 \$	
Institutionnel	1800\$	
Municipalité	4 200 \$	0,01%
Nettoyage des débris par la municipalité (quartiers résidentiels)	200 \$	
Gestion des urgences	4 000 \$	
Économie	4 000 \$	0,01%
Institutionnel	4 000 \$	
Total des coûts évités p/r au SQ :	186 000 \$	0,47%
Environnement	922 600 \$	n/a
Séquestration du carbone	251 800 \$	
Qualité de l'eau	671 200 \$	
Biodiversité	-400 \$	
Coût des mesures	-335 400 \$	n/a
Conception, réalisation entretien	-335 400 \$	
Coût opportunité	- \$	
Bénéfices connexes	- \$	
Valeur actuelle nette totale :	773 200 \$	
Ratio coûts-avantages :	3,31 \$	

Coûts évités de la submersion. Étant donné les effets hydrologiques modestes du scénario de milieux humides acceptables (chapitre 5.4.1), les bénéfices en terme de coûts évités par rapport au scénario de référence (SQ) ont une valeur positive, mais négligeable, de 186 000\$ pour l'ensemble des catégories d'impacts analysés sur une période de 50 ans (**Tableau 28**). Ensemble, ces bénéfices ne représentent que 0,47 % des coûts du scénario de référence. Le secteur agricole obtient des bénéfices proportionnellement plus grands par rapport au scénario de référence (0,27 %) que les secteurs résidentiel & psychosocial (0,12 %), commercial & industriel (0,04%) et municipalité & économie (0,02 %). En effet, le scénario MHH-acc apporte une meilleure efficacité de réduction des débits de crues dans le secteur hydrographique de la basse Chaudière (**Tableau 12**), où la grande majorité des dommages au secteur agricole sont concentrés (**Tableau 25**).

Bénéfices environnementaux. Le scénario MHH-acc permet un gain environnemental significatif en terme de qualité de l'eau (671 200 \$) et de séquestration du carbone (251 000 \$), mais introduit une légère perte de qualité de l'habitat faunique d'une valeur de 400 \$. Cette dernière observation s'explique par le fait que la création de milieux urbains et agricoles, venant de la mise en œuvre des plans d'urbanisme, surpasse les bénéfices engendrés par la création de milieux humides et hydriques. L'efficacité de ce scénario en gain sur la qualité de l'eau s'explique quant à elle par l'implantation de milieux humides au cœur de certaines zones urbaines et agricoles à haut potentiel de drainage des nutriments. Ce sont dans ces endroits que les milieux humides accomplissent de façon la plus optimale leur fonction de rétention. De la même manière, ces milieux sont également plus efficaces pour capter le carbone que les milieux urbains ou agricoles, ce qui se traduit par une efficacité marquée dans la séquestration du carbone.

Coûts des mesures. Sur une période de 50 ans, le coût des mesures du scénario MHH-acc s'élève à 0,335M\$, en raison de la réalisation et de l'entretien du verdissement dans les espaces de lots démolis afin de créer des parcs urbains. Sous l'hypothèse de base que le développement économique et agricole portant atteinte au MHH est suffisamment rentable pour couvrir l'ensemble des coûts (conception, réalisation, entretien et coûts d'opportunité) de création et réhabilitation d'une superficie équivalente de MHH – par le biais du règlement sur la compensation pour l'atteinte aux MHH - aucun coûts lié à la création, réhabilitation ou destruction de MHH ne sont donc considérés (voir la discussion à la section 7.3 au sujet de cette hypothèse).

Indicateurs économiques. La somme des coûts et bénéfices du scénario MHH-acc par rapport au scénario de référence indique une faible valeur actuelle nette positive d'environ 773 200 \$ et un ratio coûts-avantages supérieur à 1, soit 3,31 \$. Ce dernier indicateur peut être interprété comme le retour sur l'investissement pour les municipalités du bassin versant de la rivière Chaudière: si elles investissaient 100 \$ dans ce scénario, elle en retirerait 331 \$ en bénéfices. La performance économique de ce scénario est donc rentable du point de vue collectif.

Limite de l'analyse. Bien que le scénario soit rentable du point de vue collectif, en l'absence de mesures visant à réduire l'exposition des actifs à risque, la réduction des coûts liés aux inondations de la rivière Chaudière est faible, voire négligeable. De plus, l'effet combiné des changements climatiques et des changements d'usage du sol permet d'envisager une augmentation des débits de crues de faible récurrence pour le secteur de la rivière Beaurivage sous ce scénario (**Tableau 12**) et donc une augmentation des coûts liés aux inondations pour les municipalités aux abords de la rivière Beaurivage. En l'absence de modélisation hydraulique sur les affluents, il n'a cependant pas été possible de quantifier et monétiser cet impact préoccupant. Il sera néanmoins traité de façon qualitative au chapitre 6.5.3.

6.3.2 Milieux humides et hydriques efficaces (MHH-eff)

Le scénario de milieux humides efficaces est le plus ambitieux, avec une augmentation marquée des milieux humides et des milieux arbrisseaux. Ce scénario vise à exploiter pleinement la capacité des MHH pour réduire considérablement les risques. Il combine deux grandes catégories de mesures issues :

- 1- de l'application de la politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables (mesure « bandes riveraines » de 15 m);
- 2- de l'application des zones d'intervention spéciales et de l'application de contraintes à l'aménagement dans les zones de grand courant de la base de données des zones inondables (mesure « corridor d'inondabilité »).

Le **Tableau 29** présente la valeur monétaire sur une période de 50 ans des coûts et avantages de ce scénario, par rapport au scénario de référence, ainsi que les deux indicateurs de performance économique : la VAN et ratio coûts-avantages.

Tableau 29. Valeurs actualisées des coûts et avantages de MHH-eff, par rapport au scénario de référence (\$2019)

de reference (\$2019)		
Impacts par secteur	Valeur actualisée des coûts et avantages sur 50 ans	Proportion de coûts évités p/r au coût total du SQ
Résidentiel	12 914 200 \$	32,8%
Dommages aux résidences par la submersion	12 728 800 \$	
Dépenses engendrées par les évacuations	185 400 \$	
Psychosocial	5 356 200 \$	13,6%
Dépenses complémentaires (Dépenses en alcool et tabagisme)	47 900 \$	
Soins de santé (Traitements, hospitalisations, médicaments, etc.)	120 300 \$	
Perte de productivité (Temps rémunéré)	1 967 400 \$	
Qualité de vie	3 220 600 \$	
Agricole	3 073 200 \$	7,8%
Dommage aux cultures	2 551 400 \$	
Nettoyage des débris	521 800 \$	
Commercial et industriel	3 328 100 \$	8,5%
Commercial	2 861 500 \$	
Institutionnel	466 600 \$	
Municipalité	1 270 200 \$	3,2 %
Nettoyage des débris par la municipalité (quartiers résidentiels)	93 300 \$	
Gestion des urgences	1 176 900 \$	
Économie	1 969 200 \$	5,0%
Institutionnel	1 969 200 \$	
Total des coûts évités p/r au SQ :	27 911 100 \$	71 %
Environnement	66 835 600 \$	n/a
Séquestration du carbone	771 800 \$	
Qualité de l'eau	66 059 900 \$	
Biodiversité	3 900 \$	
Coût des mesures	-464 033 300 \$	
Conception, réalisation et entretien	-176 149 700 \$	
Coût opportunité	-351 352 300 \$	
Bénéfices connexes	63 468 700 \$	
Valeur actuelle nette totale :	-369 286 600 \$	
Ratio coûts-avantages :	0,34 \$	

Coûts évités de la submersion. Étant donné l'incidence notable de ce scénario sur la réduction des débits de crues (**Tableau 12**), mais surtout sur la réduction de l'exposition des bâtiments à risque dans le corridor inondable (**Tableau 30**), les bénéfices en terme de coûts évités par rapport au scénario de référence (SQ) ont une valeur positive s'élevant à 27,9 M\$ pour l'ensemble des catégories d'impacts analysés sur une période de 50 ans (**Tableau 29**). Ensemble, ces bénéfices représentent 71 % des coûts du scénario de référence, dont 65 % attribuable aux retrait des actifs à risque et 35 % attribuable au contrôle de l'aléa (réduction des débits de crue). Les résultats sont principalement conduits par les coûts évités au secteur résidentiel et au secteur psychosocial d'une valeur de 18,270 M\$, lesquels représentent à eux seuls 46 % des coûts totaux du scénario de référence. Le secteur agricole, commercial et industriel, et municipalité et économie, contribuent de façon presqu'équivalente avec une réduction d'environ 8 % des coûts du scénario de référence.

Tableau 30. Retrait des actifs à risque du scénario MHH_eff, par secteur

Secteur	Unité retirée	Contribution à la valeur actuelle des coûts évités (avantages)		
Résidentiel		Résidentiel	11 494 200 \$	
	824 bâtiments	Psychosocial	4 899 400 \$	
		Municipalité	1 161 300 \$	
		Total :	17 554 900 \$	
Commercial & industriel	176 bâtiments	3	065 900 \$	
Institutionnel	20 bâtiments	1 878 600 \$		
Agricole	7 066 hectares	2 966 300 \$		
	Total :	25	3 465 700 \$	
Proportion p/r	au coût total du SQ :		64,7%	

Bénéfices environnementaux. Le scénario MHH-eff permet un important gain environnemental en terme de qualité de l'eau (66,059 M\$), de séquestration du carbone (771 800 \$) et de biodiversité (3 900 \$). Ensemble, la valeur des bénéfices environnementaux s'élève à plus de 66 M\$ par rapport au scénario de référence. Le gain considérable en qualité de l'eau généré par ce scénario s'explique par la couverture spatiale ambitieuse de l'implantation des bandes riveraines et des milieux humides en bordure du chenal principal. Les fonctions écologiques de rétention des matières fertilisantes, de stabilisation des berges et de rétention des sédiments sont ainsi optimisées à l'échelle du bassin versant. La combinaison de ces services écologiques se traduit en modélisation par une diminution importante des quantités de particules transportées vers les usines de traitement et donc en un coût évité équivalent.

Coûts des mesures. Sur une période de 50 ans, le coût des mesures du scénario MHH-eff s'élève à 464,033 M\$. La ventilation des coûts par type de mesures est présentée au **Tableau 14**. Rappelons que ceux-ci sont d'abord répartis en coûts de réalisation et d'entretien de 3 mesures : bandes riveraines (92,3 M\$), restauration de MHH (59,1 M\$) et corridor inondable en milieu urbain (24,7 M\$; 60% pour la démolition des lots). Ensuite, le scénario entraîne un lot de coûts d'opportunité (351,3 M\$), subdivisés en perte d'usage des terrains urbains (valeur foncière de 279,3 M\$) et en perte de superficie agricole (bande riveraine, MHH et corridor : 72,046 M\$). La mesure bande riveraine apportent toutefois des bénéfices connexes, venant de la récolte du bois des saules hybrides la constituant, d'une valeur de 63,48 M\$ sur 50 ans. L'ensemble des coûts par mesure sont détaillés au **Tableau 13**.

Indicateurs économiques. La somme des coûts et bénéfices du scénario MHH-eff par rapport au scénario de référence indique une valeur actuelle nette négative et très élevée d'environ 369,286 M\$ et un ratio coûts-avantages inférieur à 1, soit 0,34 \$. Ce dernier indicateur peut être interprété comme le retour sur l'investissement pour les municipalités du bassin versant de la rivière Chaudière: si elles investissaient 100 \$ dans ce scénario, elle n'en retirerait que 34 \$ en bénéfices. La performance économique de ce scénario n'est donc pas rentable du point de vue collectif. Malgré les bénéfices économiques remarquables du scénario en termes de coûts évités de submersion et de services écologiques, l'importance relative du coût de ses mesures est trop élevée pour assurer sa rentabilité.

6.3.3 Immunisation collective (IMM-coll)

Le scénario d'immunisation collective vise à protéger l'ensemble de la collectivité à risque, c'est-à-dire de rendre les communautés étanches aux aléas, à l'aide de six digues implantées en centres urbains. Le **Tableau 31** présente la valeur monétaire sur une période de 50 ans des coûts et avantages de ce scénario, par rapport au scénario de référence, ainsi que les deux indicateurs de performance économique : la VAN et ratio coûts-avantages.

Tableau 31. Valeurs actualisées des coûts et avantages de IMM_coll, par rapport au scénario de référence (\$2019)

de reterence (\$2019)		
Impacts par secteur	Valeur actualisée des coûts et avantages sur 50 ans	Proportion de coûts évités p/r au coût total du SQ
Résidentiel	19 652 500 \$	50,0%
Dommages aux résidences par la submersion	19 354 600 \$	
Dépenses engendrées par les évacuations	297 900 \$	
Psychosocial	8 173 000 \$	20,8%
Dépenses complémentaires (Dépenses en alcool et tabagisme)	73 100 \$	
Soins de santé (Traitements, hospitalisations, médications, etc.)	183 500 \$	
Perte de productivité (Temps rémunéré)	3 002 000 \$	
Qualité de vie	4 914 400 \$	
Agricole	0\$	0,0%
Dommage aux cultures	0\$	
Nettoyage des débris	0\$	
Commercial et industriel	3 771 200 \$	9,6%
Commercial	3 220 700 \$	
Institutionnel	550 500 \$	
Municipalité	1 621 900 \$	4,1%
Nettoyage des débris par la municipalité (quartiers résidentiels)	140 400 \$	
Gestion des urgences	1 481 500 \$	
Économie	2 241 000 \$	5,7%
Institutionnel	2 241 000 \$	
Total des coûts évités p/r au SQ :	35 459 600 \$	90,1%
Environnement	0\$	n/a
Séquestration du carbone	- \$	
Qualité de l'eau	- \$	
Biodiversité	- \$	
Coût des mesures	-197 783 400 \$	
Conception, réalisation et entretien	-197 783 400 \$	
Coût opportunité	- \$	
Bénéfices connexes	- \$	
Valeur actuelle nette totale :	-162 323 800 \$	
Ratio coûts-avantages :	0,18 \$	

Coûts évités de la submersion. Étant donné l'absence de modélisation hydrologique pour le scénario IMM-coll, le calcul des coûts évités liés à la submersion se base sur une efficacité maximale de l'ensemble des secteurs en milieux urbains. Les bénéfices en termes de coûts évités par rapport au scénario de référence (SQ) ont donc une valeur positive de 35,459 M \$ pour l'ensemble des catégories d'impacts analysés sur une période de 50 ans (**Tableau 31**). Ensemble, ces bénéfices représentent 90 % des coûts du scénario de référence. Le part de 10 % des coûts restants appartient au secteur agricole, dont l'immunisation envisagée par l'implémentation de digues en centres urbains est peu probable.

Bénéfices environnementaux. Le scénario IMM-coll ne permet aucun gain environnemental en termes de qualité de l'eau, de séquestration du carbone et de qualité de la biodiversité. L'implémentation de digues en centres urbains ne permet d'envisager aucune augmentation de la valeur des services écologiques par rapport à l'état de référence de l'environnement. Au contraire, l'excavation nécessaire aux travaux permet d'envisager des impacts environnementaux négatifs qu'il n'a toutefois pas été possible de calculer.

Coûts des mesures. Sur une période de 50 ans, le coût des mesures du scénario IMM-coll s'élève à près de 200 M \$, en raison des coûts de conception, réalisation et d'entretien de l'endiguement de six centres urbains prévu à ce scénario. La ventilation des coûts pour chacune des digues est présentée au **Tableau 15**.

Indicateurs économiques. La somme des coûts et bénéfices du scénario IMM-coll par rapport au scénario de référence indique une valeur actuelle nette négative et très élevée d'environ 162,323 M \$ et un ratio coûts-avantages inférieur à 1, soit 0,18 \$. La performance économique de ce scénario n'est donc pas rentable du point de vue collectif.

Limite de l'analyse. L'efficacité attribuée aux digues de ce scénario est surestimée, en raison de la portée très locale de l'efficacité des digues ainsi que des normes de débordement des ouvrages. En effet, il est peu probable d'envisager que les digues aient une efficacité maximale face aux évènements extrêmes. Selon le rapport du comité d'expert indépendant chargé de trouver une solution aux inondations de la rivière Chaudière (2020), l'ouvrage de digue proposée par Tecsult à Sainte-Marie aurait vraisemblablement été dépassé par les inondations de 2019, même avec une revanche de 0,60 m.

6.3.4 Milieux humides et hydriques acceptables et immunisation individuelle (MHH-acc + IMM-ind)

Le scénario de *Milieux humides et hydriques acceptables et immunisation individuelle* (MHH-acc + IMM-ind) reprend intégralement le scénario de milieux humides et hydriques dits acceptables par le milieu (MHH-acc), bonifié par des mesures d'immunisation individuelle des bâtiments résidentiels et commerciaux (IMM-ind). Ce scénario vise donc zéro perte nette de milieux humides, la mise en œuvre des plans d'urbanisme tel qu'ils étaient prévus en 2019 et une réduction de l'exposition du secteur résidentiel et du secteur commercial par le biais de mesures d'immunisation individuelle. Le **Tableau 32** présente la valeur monétaire sur une période de 50 ans des coûts et avantages de ce scénario, par rapport au scénario de référence, ainsi que les deux indicateurs de performance économique : la VAN et ratio coûts-avantages.

Tableau 32. Valeurs actualisées des coûts et avantages de MHH-acc + IMM-ind, par rapport au scénario de référence (\$2019)

ad section de reference (\$2015	71	
	Valeur actualisée des	Proportion de coûts
Impacts par secteur	coûts et avantages sur	évités p/r au coût total
	50 ans	du SQ
Résidentiel	11 186 200 \$	28,4%
Dommages aux résidences par la submersion submersion	11 002 800 \$	
Dépenses engendrées par les évacuations	183 400 \$	
Psychosocial	3 575 900 \$	9,1%
Dépenses complémentaires (Dépenses en alcool et tabagisme)	32 000 \$	
Soins de santé (Traitements, hospitalisations, médications, etc.)	80 300 \$	
Perte de productivité (Temps rémunéré)	1 313 500 \$	
Qualité de vie	2 150 100 \$	
Agricole	104 400 \$	0,3%
Dommage aux cultures	87 500 \$	
Nettoyage des débris	16 900 \$	
Commercial et industriel	1 485 400 \$	3,8%
Commercial	1 483 600 \$	
Institutionnel	1 800 \$	
Municipalité	865 900 \$	2,2%
Nettoyage des débris par la municipalité (quartiers résidentiels)	110 200 \$	
Gestion des urgences	755 700 \$	_

Impacts par secteur	Valeur actualisée des coûts et avantages sur 50 ans	Proportion de coûts évités p/r au coût total du SQ
Économie	4 000 \$	0,0%
Institutionnel	4 000 \$	
Total des coûts évités p/r au SQ :	17 221 800 \$	43,8%
Environnement	922 600 \$	n/a
Séquestration du carbone	251 800 \$	
Qualité de l'eau	671 200 \$	
Biodiversité	(400) \$	
Coût des mesures	-9 211 300 \$	
Conception, réalisation entretien	-9 211 300 \$	
Coût opportunité	- \$	
Bénéfices connexes	- \$	
Valeur actuelle nette totale :	8 933 100 \$	
Ratio coûts-avantages :	1,97 \$	

Coûts évités de la submersion. Combinées au scénario MHH-acc, les mesures d'immunisation individuelle des bâtiments résidentiels et commerciaux permettent des bénéfices en terme de coûts évités par rapport au scénario de référence (SQ) d'une valeur de 17,221 M \$ pour l'ensemble des catégories d'impacts analysés sur une période de 50 ans (Tableau 32). Ensemble, ces bénéfices représentent 44 % des coûts du scénario de référence. Le secteur agricole et le secteur industriel obtiennent des bénéfices équivalents au scénario MHH-acc, puisqu'aucune mesure d'immunisation ou de réduction de l'exposition ne leur sont ajoutés. Par contre, les bénéfices pour le secteur résidentiel et pour le secteur commercial sont nettement plus élevés qu'avec le scénario MHH-acc seul. Les mesures d'immunisation au secteur résidentiel permettent d'éviter des coûts de 15, 628 M \$, dont 5 % est attribuable au retrait des actifs de valeur des sous-sols de 108 résidences et 95% est attribuable à la relocalisation graduelle de 75 bâtiments résidentiels (Tableau 33). Quant au secteur commercial, l'élévation de 4 pieds du premier plancher de 12 commerces permet d'éviter 1,483 M \$, soit 46 % des coûts attribuables à ce secteur sous le scénario de référence.

Tableau 33. Valeurs actuelles de l'immunisation individuelle des bâtiments résidentiels et commerciaux

Secteur	Mesure d'immunisation individuelle	Nombre de bâtiments	actuelle des	n à la valeur coûts évités éfices)
	Retrait des actifs	100 la âti na anta	Résidentiel	719 900 \$
	de valeur des sous-sols	108 bâtiments	Municipalité	49 600 \$
Résidentiel	Relocalisation		Résidentiel	10 466 200 \$
	graduelle des	75 bâtiments	Psychosocial 3 575 900	3 575 900 \$
	bâtiments	Municipalité		816 300 \$
			Total:	15 628 000 \$
Commercial	Élévation de 4 pieds du premier plancher	12 bâtiments	1 483 600 \$	
		Total:	17 111 600 \$	_
	Proportion p/r au c	oût total du SQ :	43,5%	

Bénéfices environnementaux. Le scénario MHH-acc + IMM-ind permet un gain environnemental équivalent au scénario MHH-acc seul. En effet, les mesures d'immunisation individuelle aux bâtiments ne permettent d'envisager aucun gain supplémentaire en termes de services écologiques. La valeur des bénéfices environnementaux s'élève donc à 922 600 S, obtenus par un gain en qualité de l'eau d'une valeur de 671 200 \$, d'un gain en séquestration du carbone d'une valeur de 251 000 \$, mais d'une légère perte de qualité de l'habitat faunique d'une valeur de 400 \$ (voir chapitre 6.3.1).

Coûts des mesures. Sur une période de 50 ans, le coût des mesures du scénario MHH-acc s'élève à 9,111 M \$, en raison des coûts de réalisation et d'entretien des 3 mesures incluses à ce scénario, soit la végétalisation de l'espace libéré par les lots démolis (0,335 M \$), la relocalisation des bâtiments résidentiels (8,217 M \$) et l'élévation des bâtiments commerciaux (0,659 M\$). Sous l'hypothèse de base que le développement économique et agricole portant atteinte au MHH est suffisamment rentable pour couvrir l'ensemble des coûts (conception, réalisation, entretien et coûts d'opportunité) de création et réhabilitation d'une superficie équivalente de MHH – par le biais du règlement sur la compensation pour l'atteinte aux MHH - aucun coût lié à la création, réhabilitation ou destruction de MHH ne sont donc considérés (voir la discussion à la section 7.3 au sujet de cette hypothèse). Finalement, la mesure de retraits des actifs de valeur des sous-sols est considérée à coût nul, puis testée en analyses de sensibilité au chapitre 6.5.1.

Indicateurs économiques. La somme des coûts et bénéfices du scénario MHH-acc + IMM-ind par rapport au scénario de référence indique une valeur actuelle nette positive d'environ 8,933 M \$ et un ratio coûts-avantages supérieur à 1, soit 1,97 \$. Ce dernier indicateur peut être interprété comme le retour sur l'investissement pour les municipalités du bassin versant de la rivière Chaudière: si elles investissaient 100 \$ dans ce scénario, elle en retirerait 197 \$ en bénéfices. La performance économique de ce scénario est donc rentable du point de vue collectif.

Limite de l'analyse. Bien que le scénario soit rentable du point de vue collectif, l'effet combiné des changements climatiques et des changements d'usage du sol permet d'envisager une augmentation des débits de crues pour le secteur hydrographique de la rivière Beaurivage sous ce scénario (**Tableau 12**), et donc une augmentation des coûts liés aux inondations pour les municipalités aux abords de la rivière Beaurivage. En l'absence de modélisation hydraulique sur les affluents, il n'a cependant pas été possible de quantifier et monétiser cet impact préoccupant. Il sera néanmoins traité de façon qualitative au chapitre 6.5.3.

6.3.5 Milieux humides et hydriques distribués et immunisation individuelle

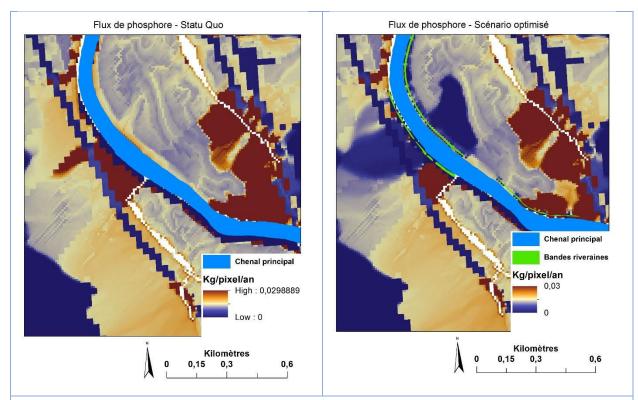
Le scénario de *Milieux humides et hydriques distribués et immunisation individuelle* (MHH-dis + IMM-ind) reprend intégralement les mesures du scénario précédent (MHH-acc + IMM-ind) en y ajoutant une mesure de bandes riveraines et en modifiant la distribution spatiale des MHH restaurés. La distribution spatiale est optimisée afin de répondre à un objectif de 0 perte nette par sous bassin versant, plutôt qu'à l'échelle du bassin versant complet, et une répartition égale entre la restauration aux abords de la rivière Chaudière et ailleurs dans le secteur (ruisseaux, affluents, milieux urbains). Ce scénario poursuit également la mise en œuvre des plans d'urbanisme tel qu'ils étaient prévus en 2019. Comme la modélisation hydrologique n'a pas été produite pour ce dernier scénario, l'efficacité sur le contrôle de l'aléa est estimée sur la base des cartes de submersion produites pour le scénario MHH-acc (voir limite de l'analyse plus bas). Le **Tableau 34** présente la valeur monétaire sur une période de 50 ans des coûts et avantages de ce scénario, par rapport au scénario de référence, ainsi que les deux indicateurs de performance économique : la VAN et ratio coûts-avantages.

Tableau 34. Valeurs actualisées des coûts et avantages de MHH-dis + IMM-ind, par rapport au scénario de référence (\$2019)

Valeur actualisée des coûts et avantages sur 50 ans	Proportion de coûts évités p/r au coût total du SQ
11 186 200 \$	28,4%
11 002 800 \$	
183 400 \$	
3 575 900 \$	9,1%
32 000 \$	
80 300 \$	
1 313 500 \$	
2 150 100 \$	
133 400 \$	0,3%
116 600 \$	
16 800 \$	
1 485 400 \$	3,8%
1 483 600 \$	
1 800 \$	
865 900 \$	2,2%
110 200 \$	
755 700 \$	
4 000 \$	0,0%
4 000 \$	
17 250 800 \$	43,9%
1 491 200 \$	n/a
204 300 \$	
1 286 900 \$	
- \$	
-9 498 500 \$	
-9 523 500 \$	
-189 700 \$	
214 700 \$	
9 243 500 \$	
1,95 \$	
	sur 50 ans 11 186 200 \$ 11 002 800 \$ 183 400 \$ 3 575 900 \$ 32 000 \$ 80 300 \$ 80 300 \$ 1313 500 \$ 2 150 100 \$ 116 600 \$ 16 800 \$ 1 485 400 \$ 1 483 600 \$ 1 800 \$ 865 900 \$ 110 200 \$ 4 000 \$ 4 000 \$ 4 000 \$ 17 250 800 \$ 1 491 200 \$ 204 300 \$ 1 286 900 \$ - \$ -9 498 500 \$ - \$ -9 523 500 \$ 214 700 \$ 9 243 500 \$

Coûts évités de la submersion. Comparé au scénario MHH-acc + IMM-ind, les coûts évités de la submersion pour le secteur agricole sont légèrement plus élevés (+ 29 000 \$), en raison de la conversion de certaines parcelles agricoles en bandes riveraines et en MHH aux abords de la rivière Chaudière. Pour les autres secteurs, les coûts évités de la submersion sont identiques au scénario MHH-acc + IMM-ind (voir chapitre 6.3.4, section *Coûts évités de la submersion*). Ensemble, les bénéfices en terme de coûts évités par rapport au scénario de référence (SQ) ont une valeur de 17,251 M\$, soit 44 % des coûts du scénario de référence pour l'ensemble des catégories d'impacts analysés sur une période de 50 ans (**Tableau 34**).

Bénéfices environnementaux. Le scénario MHH-dis + IMM-ind permet un gain environnemental significatif en terme de qualité de l'eau (1 286 900 \$) et de séquestration du carbone (204 000 \$), mais aucun gain supplémentaire en ce qui concerne la biodiversité, pour une valeur totale de 1 491 200 \$. Comparé à la spatialisation des MHH du scénario acceptable (MHH-acc), la somme des bénéfices nets est donc plus élevée, en raison d'un gain en qualité de l'eau (+615 700 \$), mais d'une diminution de la séquestration du carbone (-47 500 \$). L'augmentation significative de la valeur de la qualité de l'eau provient de l'effet combiné de l'implémentation de bandes riveraines et de restauration de MHH aux abords de la rivière Chaudière, dont un exemple est illustré à la Figure 25. Cependant, la charge en carbone contenu dans la biomasse d'une cellule de bande riveraine (modélisé par une classe arbustive), peut potentiellement contenir moins de carbone que certaines cellules agricoles, riches en carbone organique. Dans ce cas, le résultat du remplacement des puits de carbone ne produit donc pas une séquestration dans le temps, mais plutôt une perte de carbone et donc une perte monétaire par rapport au scénario de référence. De plus, ce renversement n'est pas compensé par la nouvelle spatialisation des milieux humides et hydriques qui, dans certains cas, remplace des puits de carbone déjà substantiels comme les milieux forestiers.



Interprétation: Tel qu'illustré sur la figure de droite, l'implantation de bandes riveraines aux abords du chenal principal dans la modélisation InVEST permet d'améliorer la performance de la fonction écologique de rétention des éléments fertilisants comme le phosphore et libère le chenal principal de la pression exercé par certains bassins de drainage. En effet, la modélisation ne simule pas l'absorption et la fixation des éléments chimiques par la végétation, mais reconnaît la bande riveraine plutôt comme un obstacle au lessivage des nutriments vers les cours d'eau. L'efficacité de cette mesure est donc principalement retrouvée dans les bassins de drainage agricole, en amont d'une bande riveraine qui sectionne sans interruption la trajectoire d'écoulement.

Figure 25. Exemple de quantification spatiale des impacts sur les services écosystémiques : comparaison de l'efficacité du scénario MHH_dis, par l'implémentation de bandes riveraines aux abords du chenal principal, sur les flux annuels de phosphore vers les cours d'eau (résolution de 10m par 10m)

Coûts des mesures. Sur une période de 50 ans, le coût des mesures du scénario MHH-dis + IMM-ind s'élève à 9,498 M\$, en raison des coûts de réalisation et d'entretien des 4 mesures incluses à ce scénario, soit la végétalisation des espaces de lots démolis (0,335 M \$), la relocalisation des bâtiments résidentiels (8,217 M \$), l'élévation des bâtiments commerciaux (0,659 M\$) et l'implémentation de bandes riveraines (312 200 \$). La mesure de bandes riveraines entraîne également des coûts d'opportunité venant de la perte d'usage agricole, d'une valeur de 189 700 \$. Sous l'hypothèse de base que le développement économique et agricole portant atteinte au MHH est suffisamment rentable pour couvrir l'ensemble des coûts (conception, réalisation, entretien et coûts d'opportunité) de création et réhabilitation d'une superficie

équivalente de MHH – par le biais du règlement sur la compensation pour l'atteinte aux MHH - aucun coûts lié à la création, réhabilitation ou destruction de MHH ne sont donc considérés (voir la discussion à la section 7.3 au sujet de cette hypothèse). Finalement, la mesure de retraits des actifs de valeur des sous-sols est considérée à coût nul, puis testée en analyses de sensibilité au chapitre 6.5.1.

Indicateurs économiques. La somme des coûts et bénéfices du scénario MHH-dis + IMM-ind par rapport au scénario de référence indique une valeur actuelle nette positive d'environ 9,244 M \$ et un ratio coûts-avantages supérieur à 1, soit 1,95 \$. Ce dernier indicateur peut être interprété comme le retour sur l'investissement pour les municipalités du bassin versant de la rivière Chaudière: si elles investissaient 100 \$ dans ce scénario, elle en retirerait 197 \$ en bénéfices. La performance économique de ce scénario est donc rentable du point de vue collectif.

Limite de l'analyse. La distribution des MHH de ce scénario vise un objectif de 0 perte nette par sous bassin versant (à l'exception du secteur de Lévis), afin d'atténuer l'augmentation prévue sous le scénario MHH_acc des débits de crues de la rivière Beaurivage (Tableau 12), et donc de limiter l'augmentation anticipée des coûts liés aux inondations de cette rivière. En l'absence de modélisation hydrologique de ce scénario, l'atténuation prévue par ce scénario des débits de crues et des coûts conséquents pour les municipalités bordant la rivière Beaurivage n'a pas été quantifiée, ni monétisée et demeure donc théorique. Il sera néanmoins traité de façon qualitative au chapitre 6.5.3. Tel que mentionné à la section 5.4.5, il serait également important de valider si la diminution de MHH dans le secteur basse Chaudière – pour compenser les pertes dans le secteur Beaurivage – ne contribue pas à augmenter significativement les pics de crues de ce secteur, lequel serait autrement très préoccupant.

6.4 COMPARAISON DES SCÉNARIOS

La comparaison des coûts et avantages actualisés avec le scénario de référence et le ratio avantages-coûts des cinq scénarios d'adaptation (**Figure 26**) permet de dégager quatre principaux résultats.

Le statu quo est préférable au scénario d'immunisation collective et au scénario de MHH efficaces. Comparés au scénario de référence, deux scénarios d'adaptation sur cinq ont une VAN négative et un ratio coûts-avantages inférieur à 1. Il s'agit des scénarios impliquant des mesures d'adaptation très ambitieuses. d'aménagement ultime des milieux naturels (MHH-eff) ou d'aménagement ultime de diques en centres urbains (IMM-coll). Ces scénarios ne sont pas rentables du point de vue collectif en raison des coûts de réalisation et d'entretien - en plus des coûts d'opportunité dans le cas du scénario MHH-eff - trop importants de leurs mesures par rapport aux bénéfices liés à la réduction des coûts de la submersion et aux bénéfices environnementaux obtenus. Malgré les bénéfices importants visibles à la Figure 26, le coût total des mesures de près 500 M \$ dans le cas du scénario MHH-eff et près de 200 M \$ dans le cas du scénario IMM-coll y dominent.

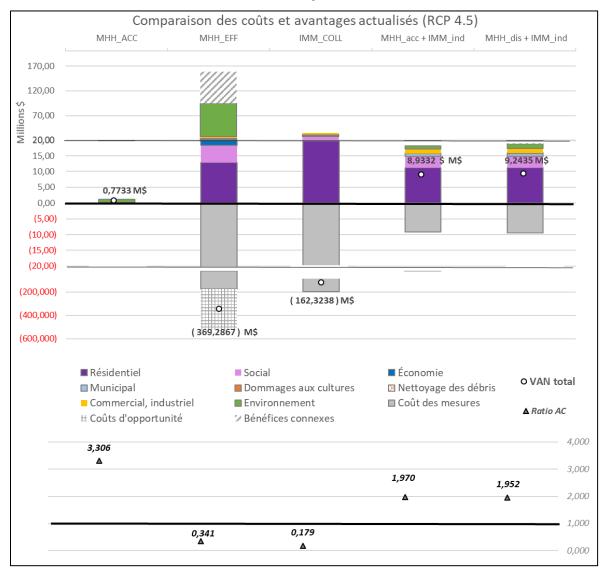


Figure 26. Comparaison des coûts et avantages actualisée (VAN), et du ratio avantages-coûts des scénarios d'adaptation, par rapport au scénario de référence sur 50 ans

Le contrôle de l'aléa par le scénario milieux humides et hydriques acceptables est peu efficace. Pour le scénario de milieux humides et hydriques acceptables (MHH-acc), la réduction des coûts de l'aléa submersion est si faible (moins de 200 000 \$), que les bénéfices ne peuvent être visibles à la **Figure 26**. En effet, le contrôle seul de l'aléa de submersion par les milieux humides et hydriques de ce scénario ne permet pas de réduire significativement les débits de crues de la rivière Chaudière et donc, les coûts liés à la submersion. Le scénario est tout de même rentable du point de vue collectif, d'autant plus que la restauration de MHH venant de l'objectif de 0 perte nette à

l'échelle du bassin versant permet de dégager des bénéfices environnementaux supplémentaires d'une valeur de près de 930 000 \$. Sous l'hypothèse de base que les coûts de mise en œuvre des MHH sont entièrement couverts par le règlement de compensation pour atteinte aux MHH (voir la discussion à la section 7.3 au sujet de cette hypothèse), ce scénario obtient le ratio avantages-coût le plus élevé, d'une valeur de 3,31 \$. En cas de divergence de classement des scénarios entre les deux indicateurs économiques, la VAN est toutefois préférée au ratio. Le scénario MHH-acc accède donc au 3e rang des scénarios d'adaptation les plus avantageux. De plus, l'effet combiné des changements climatiques et des changements d'usage du sol permet d'envisager une augmentation des débits de crues de la rivière Beaurivage sous ce scénario (Tableau 12), et donc une augmentation des coûts liés aux inondations pour les municipalités aux abords de la rivière Beaurivage, notamment les zones agricoles de Saint-Gilles et le secteur résidentiel de Saint-Étienne-de-Lauzon. En l'absence de modélisation hydraulique sur les affluents, il n'a cependant pas été possible de quantifier et monétiser cet impact préoccupant. Il sera néanmoins traité de façon qualitative au chapitre 6.5.3.

La combinaison des mesures d'immunisation individuelle et d'aménagement des milieux naturels est prometteuse. En combinant les mesures d'aménagement des milieux naturels (MHH-acc et MHH-dis) et les mesures d'immunisation individuelle pour le secteur résidentiel et le secteur commercial (IMM-ind) les 2 derniers scénarios de la **Figure 26** (MHH-acc + IMM-ind et MHH-dis + IMM-ind) obtiennent des bénéfices liés à la réduction des coûts de la submersion d'une valeur de plus de 17 M\$, soit 44 % des coûts liés à la submersion du scénario de référence, en plus de dégager des bénéfices environnementaux de plus de 900 000 \$ et même 1 M \$ dans le cas du scénario MHH-dis. Malgré le coût des mesures de plus de 9 M\$, ces scénarios demeurent rentables étant donné l'ampleur des bénéfices au secteur résidentiel, commercial et environnemental. L'approche combinée de contrôle de l'aléa par aménagement de milieux naturels et de contrôle de la vulnérabilité par immunisation individuelle est donc prometteuse.

Le scénario de milieux humides et hydriques distribués et d'immunisation individuelle est le plus rentable. Le scénario de milieux humides et hydriques distribués et d'immunisation individuelle (MHH-dis + IMM-ind) obtient la valeur actuelle nette par rapport au scénario de référence la plus élevée : 9,244 M \$. Ce scénario arrive juste devant le scénario MHH-acc + IMM-ind, grâce à l'implémentation de bandes riveraines et de MHH aux abords du chenal principal de la rivière Chaudière, permettant un gain supplémentaire en qualité de l'eau d'une valeur de 615 700 \$. Les coûts supplémentaires associés aux bandes riveraines font toutefois diminuer le ratio coûts-avantages de 0,02 \$ par rapport au scénario MHH-acc + IMM-ind. En cas de divergence de classement entre les deux indicateurs économiques, la VAN est préférée au ratio. De plus, la distribution des MHH de ce scénario vise un objectif de 0 perte nette par sous bassin hydrographique (à l'exception de la ville de Lévis), afin

d'atténuer l'augmentation prévue sous le scénario MHH-acc des débits de crues de la rivière Beaurivage (**Tableau 12**), et donc de limiter l'augmentation anticipée des coûts liés aux inondations de cette rivière. En l'absence de modélisation hydrologique de ce scénario, l'atténuation prévue par ce scénario des débits de crues et des coûts conséquents pour les municipalités bordant la rivière Beaurivage n'a pas été quantifiée, ni monétisée, mais sera traitée de façon qualitative au chapitre 6.5.3. De plus, il serait important de valider si la diminution de MHH dans le secteur de la basse Chaudière – pour compenser les pertes dans le secteur de la Beaurivage – ne contribue pas à augmenter significativement les pics de crues de ce secteur, lequel serait autrement très préoccupant (**Tableau 12**).

Conclusion préliminaire : Le scénario milieux humides et hydriques distribués et immunisation individuelle (MHH_dis + IMM_ind) ressort comme le scénario le plus avantageux selon l'indicateur économique de la VAN.

6.5 ANALYSES COMPLÉMENTAIRES

Afin de valider la robustesse des résultats de l'analyse économique présentés aux chapitres précédents, les analyses de sensibilité (6.5.1) s'avèrent nécessaires. De plus, l'analyse de redistribution entre les acteurs (6.5.2) et l'analyse des risques et enjeux résiduels (6.5.3) apportent des résultats complémentaires concernant l'équité entre les acteurs et l'efficacité sur certains enjeux non modélisés des scénarios d'adaptation. Étant donné la faiblesse significative des deux indicateurs économiques (VAN et RCA) des scénarios MHH-eff et IMM-coll, ces scénarios sont exclus des analyses complémentaires.

6.5.1 Analyses de sensibilité

Les analyses de sensibilité partielles permettent de comprendre l'impact de différents paramètres économiques sur la VAN des scénarios a priori rentables (MHH-acc, MHH-acc + IMM-ind, MHH-dis + IMM-ind) ainsi que sur leurs classements. Les paramètres sélectionnés et leurs valeurs sont présentés au **Tableau 35** et discutés dans les paragraphes suivants. Les résultats des analyses sont ensuite présentés au **Tableau 36** et discutés séparément concernant les scénarios (6.5.1.1) et les mesures (6.5.1.2).

Tableau 35. Paramètres des analyses de sensibilité et valeurs à tester

Paramètres de sensibilité	Valeurs à tester	
Tour d'actualisation	Linéaire à 2 %	
Taux d'actualisation	Linéaire à 6 %	
	10° percentile de la distribution hydro-	
 Scénario hydroclimatique	climatique RCP 4.5	
Scenario fiyarocii fiatique	90° percentile de la distribution hydro-	
	climatique RCP 8.5	
Coût de réalisation et d'entretien des mesures	+ 15 % de la valeur actualisée	
Coûts d'opportunité des mesures	+ 15 % de la valeur actualisée	
Valeur des bénéfices		
environnementaux et des bénéfices	- 15 % de la valeur actualisée	
connexes		

Taux d'actualisation. Le choix du taux d'actualisation régressif (4 % pour les premiers 30 ans, puis 2 % pour les derniers 20 ans) est soumis à une analyse de sensibilité étant donné sa forte influence sur le calcul de la valeur actuelle nette, le principal indicateur de performance économique. L'analyse de sensibilité testera une valeur inférieure à 2 % et une valeur supérieure à 6 %.

Scénario hydroclimatique. Le choix du scénario hydroclimatique médian du RCP 4.5 est soumis à une analyse de sensibilité étant donné l'incertitude entourant la chaîne de modélisation allant du climat à l'hydrologie. Les scénarios aux extrêmes de la distribution hydroclimatique, soit le 10° percentile du RCP 4.5 et le 90° percentile du RCP 8.5, choisis pour l'analyse de sensibilité permettront de tester la robustesse des résultats face à l'incertitude hydro-climatique et les valeurs de débits maximums annuels.

Coût de réalisation et d'entretien des mesures. Étant donné l'importance du coût de réalisation et d'entretien des mesures d'immunisation individuelle, l'analyse de sensibilité permettra de tester la robustesse des résultats des scénarios face à une augmentation de 15 % de la valeur actualisée de ces coûts. La valeur maximale des coûts unitaires de réalisation et d'entretien des mesures est également présentée afin de communiquer le seuil de rentabilité, toutes choses étant égales par ailleurs, des mesures prises séparément.

Coûts d'opportunité des mesures. Étant donné la présence de coûts d'opportunité pour la mesure de bandes riveraines et de l'incertitude entourant la valeur de renonciation des usages, l'analyse de sensibilité permettra de tester la robustesse des résultats des scénarios face à une augmentation de 15 % de la valeur actualisée des coûts d'opportunité. La valeur maximale du coût d'opportunité unitaire des mesures est également présentée afin de communiquer le seuil de rentabilité, toutes choses étant égales par ailleurs, des mesures prises séparément.

Coûts évités liés à la submersion. Étant donné la contribution importante de la valeur des coûts évités liés à la submersion à la rentabilité des scénarios, l'analyse de sensibilité permettra de tester la robustesse des résultats face à une diminution de 15 % de la valeur actualisée de l'ensemble des coûts évités des scénarios. La valeur actualisée minimale des coûts évités est également présentée afin de communiquer le seuil de rentabilité, toutes choses étant égales par ailleurs, des mesures prises séparément.

Valeur des bénéfices environnementaux et des bénéfices connexes. Étant donné la contribution importante de la valeur des bénéfices environnementaux, ainsi que des bénéfices connexes pour la mesure bande riveraine, à la rentabilité des scénarios, l'analyse de sensibilité permettra de tester la robustesse des résultats face à une diminution de 15 % de la valeur actualisée de ces bénéfices. La valeur actualisée minimale des bénéfices environnementaux est également présentée afin de communiquer le seuil de rentabilité, toutes choses étant égales par ailleurs, des mesures prises séparément.

Tableau 36. Résultats des analyses de sensibilité sur la valeur actuelle nette des scénarios et les seuils de rentabilité des mesures, par rapport au scénario de référence (RCP 4.5, \$ 2019)

	VAN des scénarios						
Paramètre de sensibilité	МНН_асс	MHH_acc + IMM_ind	MHH_dis + IMM_ind				
VAN de référence RCP 4.5	0,7733 M\$	8,9332 M\$	9,2435 M\$				
Taux d'actualisatio	n						
2 %	0,5077 M\$	7,7068 M\$	7,8344 M\$				
6 %	0,3115 M\$	2,7445 M\$	2,6832 M\$				
Scénario hydro-clir	matique			S	Seuil de rentabili	té des mesure	s
10° percentile RCP 4.5	0,9014 M\$	6,1049 M\$	6,3969 M\$	Retrait des actifs aux	Relocalisation	Élévation des	Ban rivera
90° percentile RCP 8.5	1,1947 M\$	19,530 M\$	19,866 M\$	sous-sols	résidentielle	commerces	(MHH
Coût de réalisation	et d'entretien d	les mesures					
+ 15 %	0,7733 M\$	7,5515 M\$	7,8149 M\$	4 200 \$/ résidence ¹	321 000 \$/ résidence ¹	225 000 \$/ commerce ¹	18 800 ha ¹
Coût d'opportunité	des mesures						
+ 15 %	0,7733 M\$	8,9332 M\$	9,003 M\$	4 200 \$/ résidence ¹	80 900 \$/ résidence ¹	125 000 \$/ commerce ¹	14 590 ha ¹
Coûts évités liés à	la submersion						
- 15 %	0,7460 M\$	6,3499 M\$	6,6558 M\$	-	109 600 \$/ résidence ²	54 900 \$/ commerce ²	-
Bénéfices environr	nementaux et bé	énéfices connex	es				
- 15 %	0,6356 M\$	8,7948 M\$	8,9876 M\$	-	-	-	23 600 ha ²

¹Coût unitaire

² Valeur actualisée de la somme des coûts ou bénéfices sur une période de 50 ans Paramètre sensible du scénario ou de la mesure

6.5.1.1 Résultats des analyses de sensibilité sur les scénarios

Ainsi, les analyses de sensibilité permettent de dégager deux résultats principaux concernant les scénarios :

La rentabilité des scénarios d'adaptation est robuste à l'ensemble des analyses de sensibilité. La VAN des scénarios a priori rentables (MHH-acc, MHH-acc + IMM-ind, MHH-dis+IMM-ind) demeure positive sous l'ensemble des analyses de sensibilité produites. La rentabilité des scénarios est donc robuste au choix du taux d'actualisation (2%, 6%), au choix du scénario hydro-climatique (extrêmes de la distribution hydro-climatique), à l'ampleur des coûts des scénarios (+ 15 % de la valeur actualisée des coûts de réalisation et d'entretien ou des coûts d'opportunité) ainsi qu'à l'ampleur des bénéfices des scénarios (- 15 % des coûts évités liés à la submersion ou des bénéfices environnementaux).

Le classement des scénarios est uniquement sensible au taux d'actualisation. Seule l'analyse sur le taux d'actualisation révèle une sensibilité du classement des scénarios, sous un taux d'actualisation linéaire de 6 %. Le scénario MHH-acc + IMM-ind devient alors préférable au scénario MHH-dis + IMM-ind, avec une VAN supérieure d'environ 61 000 \$. Bien que le rapport de Montmarquette (2007) suggère un taux d'actualisation linéaire de 6 % pour l'évaluation des investissements publics au Québec, il est également mentionné et appuyé par d'autres auteurs (Cropper, 2012, Gollier, 2011, Arrow et al., 2014) que les projets à bénéfices éloignés dans le temps et forte équité intergénérationnelle (tels que projets reliés à la santé, à l'environnement et aux changements climatiques) bénéficierait d'un taux d'actualisation décroissant dans le temps.

6.5.1.2 Seuils de rentabilité des mesures

Les analyses de sensibilité sur les mesures d'adaptation prises de façon individuelle permettent d'établir leurs seuils de rentabilité. Ces seuils représentent les coûts maximums ou les bénéfices minimums requis pour maintenir la VAN des mesures supérieure à 0, toutes choses étant égales par ailleurs, c'est-à-dire, sous le scénario hydroclimatique médian du RCP 4.5 et les hypothèses économiques de chaque catégorie d'impact (section 6.1).

Retrait des actifs de valeur des sous-sols résidentiels. Toutes choses étant égales par ailleurs, la mesure comportementale de retrait des actifs de valeur des sous-sols résidentiels est rentable, jusqu'à concurrence d'un coût de réalisation et/ou d'opportunité de 4200 \$/résidence. Rappelons que cette mesure était d'abord considérée à coût nul, d'où l'absence de seuil minimum de coûts évités ou de bénéfices environnementaux pour garantir sa rentabilité. Comme aucun bénéfices environnementaux ou connexes n'étaient calculés pour cette mesure, aucun seuil minimum n'est requis.

Relocalisation des résidences. Toutes choses étant égales par ailleurs, la mesure de relocalisation des résidences est rentable, jusqu'à un coût de réalisation maximum de 321 000 \$/résidence ou un coût d'opportunité maximum de 80 900 \$/résidence. Dans le premier cas, le seuil maximum est 83 % plus élevé que la valeur de référence choisie pour la modélisation (valeur foncière des bâtiments et coût de démolition d'en moyenne 175 300 \$ / résidence). Dans le 2° cas, rappelons que le coût d'opportunité de cette mesure était considéré nul, étant donné la valeur de rachat à la valeur foncière considérée dans le coût de réalisation. Toutes choses étant égales par ailleurs, la mesure pourrait inclure un coût d'opportunité jusqu'à un maximum de 80 900 \$/résidence, et demeurer rentable du point de vue collectif. Finalement, le seuil minimum de la valeur actualisée de l'ensemble des coûts évités liés à la submersion est de 109 600 \$ / résidence. Toutes choses étant égales par ailleurs, la mesure de relocalisation doit permettre d'éviter des coûts liés à la submersion d'une valeur actuelle d'au moins 109 600 \$ /résidence, sans quoi la relocalisation ne serait plus rentable. Comme aucun bénéfices environnementaux ou connexes n'étaient calculés pour cette mesure, aucun seuil minimum n'est requis pour ces deux bénéfices.

Élévation du premier plancher des commerces. Toutes choses étant égales par ailleurs, la mesure d'élévation de 4 pieds du premier plancher des commerces est rentable, jusqu'à un coût de réalisation maximum de 225 000 \$/commerce ou un coût d'opportunité maximum de 125 000 \$/commerce. Dans le premier cas, le seuil maximum représente le double du coût unitaire d'élévation du premier plancher (100 000 \$) choisie pour la modélisation. Dans le 2° cas, rappelons que le coût d'opportunité de cette mesure était considéré nul. Toutes choses étant égales par ailleurs, la mesure pourrait tout de même inclure un coût d'opportunité jusqu'à un maximum de 125 000 \$/commerce, et demeurer rentable du point de vue collectif. Finalement, le seuil minimum de la valeur actualisée de l'ensemble des coûts évités liés à la submersion est de 54 900 \$/commerce. Toutes choses étant égales par ailleurs, la mesure d'immunisation des commerces doit permettre d'éviter des coûts liés à la submersion d'une valeur actuelle d'au moins 54 900 \$/commerce, sans quoi l'élévation du bâtiment ne serait plus rentable. Comme aucun bénéfices environnementaux ou connexes n'étaient calculés pour cette mesure, aucun seuil minimum n'est requis pour ces deux bénéfices.

Bandes riveraines du scénario MHH-dis + IMM-ind. Toutes choses étant égales par ailleurs, la mesure de bandes riveraines du scénario MHH-dis + IMM-ind est rentable, jusqu'à un coût de réalisation et d'entretien maximum de 18 800 \$/ha ou un coût d'opportunité maximum de 14 590 \$/ha. Dans le premier cas, le seuil maximum représente une augmentation de 25 % par rapport au coût unitaire (1,51 \$/m²) choisi pour la modélisation. Dans le deuxième cas, le seuil maximum représente une augmentation de 28 % par rapport à la valeur des terres agricoles (10 560 \$/ha) choisie pour la modélisation du coût d'opportunité. Finalement, le seuil minimum de la valeur actualisée des bénéfices environnementaux et connexes est de 23 600\$ /ha. Toutes choses étant égales par ailleurs, la mesure bande riveraine du scénario MHH-dis + IMM-ind doit

permettre des bénéfices environnementaux et/ou des bénéfices connexes d'une valeur actuelle d'au moins 23 600 \$/ha (moyenne sur toutes les surfaces considérées dans les scénarios), sans quoi la mesure ne serait plus rentable. Comme ce seuil représentant une diminution de 13 % de la valeur actualisée des bénéfices environnementaux et connexes modélisés pour le scénario MHH-dis + IMM-ind, la mesure bande riveraine est sensible à une analyse de sensibilité de 15 % de ces paramètres économiques. Comme les coûts évités liés à la submersion pour cette mesure étaient négligeables, aucun seuil minimum n'est requis.

6.5.2 Analyse de redistribution par acteur

L'analyse de redistribution permet de mieux comprendre la répartition des coûts et avantages entre les groupes d'acteurs de chacun des scénarios - par rapport au scénario de référence - et ainsi cibler les opportunités de redistribution afin d'améliorer l'équité des scénarios. Le **Tableau 37** résume les résultats de l'analyse de redistribution des coûts et avantages de chaque scénario entre quatre catégories d'acteurs, soit la société, les agriculteurs, les résidents et les municipalités.

Tableau 37. Analyse de redistribution entre les acteurs, RCP 4.5 (2019 \$)

	sQ	МНН-асс		MHH-acc + IMM-ind		MHH-dis + IMM-ind	
VAN p/r au SQ	-	773 300 \$		8 933 200 \$		9 243 500 \$	3
Part de la VAN par catégorie d'acteurs							
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%
Cultures assurées	-365 400 \$	9 800 \$	1%	9 800 \$	0%	13 100 \$	0%
Cultures non assurées	-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%

Le statu quo est dispendieux pour la société. Les coûts liés à la submersion du scénario de référence (SQ) sont majoritairement (59 %) assumés par la société, en raison de l'indemnisation des cultures assurées par les programmes de la financière agricole (FADQ), de l'indemnisation des dommages résidentiels, commerciaux et agricoles (nettoyage des débris) par les programmes d'aide financière du ministère de sécurité publique (MSP) et des dommages aux bâtiments institutionnels. Vient ensuite la catégorie des résidents, assumant jusqu'à 11,4733 M\$ des coûts liés à la submersion sur 50 ans, soit environ 29 % des coûts totaux. Les agriculteurs et la municipalité assument une part semblable des coûts liés à la submersion, soit 5,5 % et 4,1 % respectivement. Notons que l'approche réglementaire d'indemnisation des dommages agricoles liés à la submersion permet aux producteurs assurant leurs cultures de subir environ 23 % moins de coûts que les producteurs non assurés par la FADQ³. Le chapitre suivant traitant des risques et enjeux résiduels amène une perspective supplémentaire concernant les coûts potentiels au secteur agricole venant de l'aléa non modélisé de l'érosion.

Le scénario de milieux humides et hydriques acceptables avantage disproportionnellement la société. Bien que la VAN du scénario de milieux humides et hydriques acceptables (MHH-acc) soit positive par rapport au scénario de référence, la répartition des coûts et avantages entre la société et les autres catégories d'acteurs souligne une certaine iniquité. Ce scénario avantage particulièrement la société grâce aux bénéfices environnementaux de la restauration des MHH, mais n'apporte que très peu de bénéfices pour les autres catégories d'acteurs, voire même des coûts supplémentaires pour les municipalités. Les mesures d'immunisation ajoutées aux deux autres scénarios semblent donc judicieuses afin d'optimiser les retombées pour le secteur résidentiel, commercial et industriel, et municipal. Une opportunité de redistribution des avantages de la société vers les municipalités semble également se dégager afin d'alléger le fardeau de celles-ci.

Enjeu d'équité envers les agriculteurs. Bien que la VAN, par rapport au scénario de référence, du scénario de milieux humides et hydriques distribués et d'immunisation individuelle (MHH-dis + IMM-ind) soit la plus élevée à 9,2435 M \$, la répartition des coûts et avantages seraient moins équitable envers les agriculteurs qu'avec le scénario MHH-acc + IMM-ind. En effet, l'ajout de la mesure de bandes riveraines au scénario MHH-dis + IMM-ind, augmentent les bénéfices environnementaux pour la société, mais également les coûts de réalisation et d'opportunité pour les agriculteurs. La redistribution des avantages de la société vers les agriculteurs semble donc opportune afin d'alléger le fardeau sur ces acteurs. Le chapitre suivant traitant des risques et enjeux résiduels permettra également d'amener une nouvelle perspective concernant les retombées possibles des bandes riveraines pour les agriculteurs et venant de la réduction potentielle d'un aléa fluvial non modélisé, l'érosion.

-

³ À noter que cette analyse ne prend pas en compte des cotisations à l'ASREC dû aux limites de la modélisation.

6.5.3 Analyse des risques et enjeux résiduels

Effet positif potentiel

L'analyse des risques et enjeux résiduels amène une perspective qualitative supplémentaire aux résultats économiques quantifiés, en tenant compte des risques inhérents aux aléas fluviaux non modélisés: érosion, submersion des affluents et embâcles (**Tableau 38**).

Tableau 38. Analyses des risques et enjeux résiduels des mesures rentables par rapport au SQ

			Aléas quantifiés		Aléas non quantifiés			
Scénario	Bénéfices environne mentaux.	Facteurs de risque	Submersio n de la rivière Chaudière	VAN p/r au SQ (RCP 4.5)	Érosion	Submersio n des affluents	Embâcle	
IMM-ind +		Intensité		9 243 400 \$				
MHH-dis		Exposition						
MHH-acc + IMM-ind		Intensité		8 933 200				
		Exposition		\$				
МНН-асс		Intensité		773 300 \$				
		Exposition		773 300 \$				
Légende:								
	Effet positif r	Effet positif maximal Aucun effet anticipé Effet négatif potentie						
	Effet positif p	positif partiel Effet r			et négligeable			

Les résultats de l'analyse présentés au **Tableau 35** permettent de dégager une conclusion :

La monétisation des coûts et bénéfices liés aux aléas non modélisés pourrait renforcer la recommandation préliminaire. La recommandation préliminaire en faveur du scénario milieux humides et hydriques distribués et d'immunisation individuelle (MHH-dis + IMM-ind), basée sur la quantification de l'aléa de submersion du chenal principal de la rivière Chaudière, pourrait également avoir un effet positif potentiel sur la réduction des risques inhérents aux trois aléas fluviaux non modélisés : l'érosion, la submersion des affluents et les embâcles.

- Impact positif potentiel sur l'érosion: l'implantation de bandes riveraines végétalisées de 15 mètres en zone 0-2 ans, combiné à la restauration de milieux humides en zones particulièrement sinueuses de la rivière Chaudière, pourrait avoir un impact positif sur la diminution de l'exposition à l'aléa d'érosion. Ces deux mesures absentes du scénario MHH-acc justifient l'impact positif potentiellement plus élevé du scénario MHH-dis;
- Impact positif potentiel sur la submersion des affluents: l'objectif de zéro perte de nette de MHH par sous bassin versant, pourrait permettre d'atténuer l'augmentation prévue sous le scénario MHH-acc des débits de crues de la rivière Beaurivage (**Tableau 9**), et donc de limiter l'augmentation anticipée des coûts liés aux inondations de cette rivière. De plus, l'ajout de restauration de MHH en bordure de la rivière Beaurivage, à comparer au scénario MHH-acc, pourrait permettre de diminuer l'exposition à la submersion de cette rivière.
- Impact positif potentiel sur les embâcles: l'implantation de bandes riveraines végétalisées de 15 mètres en zone 0-2 ans, combiné à l'augmentation de la restauration de milieux humides en bordure du chenal principal, pourrait avoir un impact positif sur la diminution de l'exposition à l'aléa d'embâcle; Ces deux mesures absentes du scénario MHH-acc justifient l'impact positif potentiellement plus élevé du scénario MHH-dis. À noter que les mesures d'immunisation individuelle présentes dans le scénario MHH-acc + IMM-ind pourrait également contribuer à diminuer l'exposition des résidences et des commerces face à l'aléa d'embâcles.

À noter qu'une incertitude demeure cependant quant à l'impact hydrologique de la diminution de MHH dans le secteur Basse Chaudière, pour compenser les pertes dans le secteur de la Beaurivage (**Tableau 12**). Une validation hydrologique devrait être effectuée afin de confirmer que la perte de MHH à ce secteur ne contribue pas à augmenter significativement les pics de crues de ce secteur, lequel serait autrement très préoccupant.

6.6 SYNTHÈSE DE L'ANALYSE ÉCONOMIQUE

La monétisation du scénario de référence a permis de mettre en évidence l'importance des coûts de la submersion de la rivière Chaudière pour le secteur résidentiel et psychosocial et ce, malgré le retrait de 646 lots démolis ou à démolir (en date d'octobre 2020) de la modélisation économique. Ces secteurs absorbent à eux seuls 71 % (environ 27,826 M\$; RCP 4.5) des coûts futurs liés à aléa de submersion de la rivière Chaudière (**Tableau 23**). Les 29 % restants se séparent de façon presqu'égale entre 3 autres secteurs: agricole, commercial et industriel, et municipalité et économie, pour environ 3,8 M\$ chaque. Le potentiel de coûts à éviter par les scénarios d'adaptation analysés s'élève donc à 39,338 M\$ (RCP 4.5).

À la lumière de la comparaison économique des scénarios d'adaptation de la section 6.4, les scénarios impliquant des mesures très ambitieuses, soit l'aménagement ultime des milieux naturels (MHH-eff) ou l'aménagement de multiples digues en centres urbains (IMM-coll), ne sont pas plus avantageux que le statu quo. Malgré l'importance des coûts évités de la submersion qu'ils amènent, soit 71 % à 90 % du statu quo, ces scénarios coûtent très chers à réaliser et à entretenir, en plus d'amener un grand coût de renonciation des usages dans le cas de MHH-eff. Étant donné la faiblesse significative de leurs indicateurs économiques (VAN et RCA), ces scénarios ont été exclus des analyses complémentaires.

Par contre, trois scénarios sont ressortis comme étant plus avantageux que le statu quo. Il s'agit des scénarios d'aménagement de milieux humides acceptables ou distribués, idéalement combinés aux mesures d'immunisation individuelle des bâtiments, soit, suivant une classification décroissante, les scénarios MHH-dis + IMM-ind, MHH-acc + IMM-ind et MHH_acc. Le scénario MHH-dis + IMM-ind dont la VAN par rapport au scénario de référence était la plus élevée (9,2435 M\$), a été ciblé pour la recommandation préliminaire.

Les analyses complémentaires ont ensuite permis de tester la robustesse de la recommandation préliminaire. Premièrement, le scénario recommandé (MHH-dis + IMM-ind) s'est avéré sensible à deux analyses sur sept, soit pour le taux d'actualisation à 6 %, modifiant son classement au 2° rang, - et pour une diminution de 15 % de la valeur actuelle des bénéfices environnementaux, menaçant la rentabilité des bandes riveraines (section 6.5.1). Toutefois, l'analyse de la valeur de l'environnement n'était que partielle et donc une estimation minimale de ces bénéfices. De plus, l'analyse de redistribution entre les acteurs (section 6.5.2) suggère un réajustement de la distribution des coûts de ce scénario, afin d'obtenir un rapport plus équitable entre la société et les agriculteurs. L'analyse des risques et enjeux résiduels a néanmoins renforcé la recommandation préliminaire. Les résultats permettent d'anticiper que le scénario recommandé aurait le plus grand potentiel d'effets positifs sur les aléas non quantifiés d'érosion, de submersion des affluents et d'embâcles (section 6.5.3). La monétisation des coûts et avantages liés à ces aléas pourrait ainsi atténuer la sensibilité de la mesure bandes riveraines aux bénéfices environnementaux et à la distribution des coûts entre la société et les agriculteurs, notamment grâce aux coûts évités de l'érosion. Une validation hydrologique devrait cependant être effectuée afin de confirmer l'efficacité de ce scénario.

Conclusion finale: Le scénario milieux humides et hydriques distribués et d'immunisation individuelle (MHH_dis + IMM_ind) est retenu comme la stratégie la plus avantageuse. La mise en œuvre est cependant conditionnelle à une validation hydrologique.

7. DISCUSSIONS ET CONCLUSIONS

Cette analyse visait à comparer l'ensemble des coûts et avantages de plusieurs solutions d'adaptation face aux inondations en eau libre et aléas liés au bassin versant de la rivière Chaudière, soit un territoire de 6 682 km². Dans un cadre participatif, la méthodologie s'appuie sur l'analyse de risque et l'analyse économique.

7.1 ANALYSE DE RISQUE

Une augmentation anticipée des dommages résidentiels, commerciaux et agricoles

L'analyse des aléas en climat futur prévoit une augmentation des risques fluviaux : l'augmentation des débits et un élargissement de la zone inondable d'ici 50 ans, notamment liée à des épisodes extrêmes printaniers plus précoces et une augmentation des épisodes extrêmes estivaux. La majorité du territoire de la zone d'étude est forestière et près du quart à usage agricole. Bien que les secteurs urbains représentent seulement 4 % du territoire, ils sont particulièrement sensibles aux épisodes hydrométéorologiques extrêmes. Les résidences représentent près de 42 % (115 M\$) de la valeur totale des actifs du territoire du bassin versant, estimée à 275 M\$, alors que les commerces en représentent 19 % (51,6 M\$). Malgré les relocalisations, ce sont encore 972 résidences, soit environ 2235 sinistrés potentiels, qui sont exposées. Le secteur de Beaurivage contient un enjeu agricole particulier représentant 48 % de ses valeurs exposées (9,4 M\$), tout comme le secteur industriel à l'embouchure de la Famine. De plus, trois écoles primaires et certains bâtiments institutionnels pouvant être essentiels dans la gestion des urgences ont été répertoriés parmi les bâtiments actuellement exposés.

Plusieurs limites aux connaissances

Pour dépasser les limites de l'analyse de risque, davantage de connaissances sur la probabilité actuelle et future de certains aléas hydrogéomorphologiques (embâcles, érosion, avulsion et cônes alluviaux) permettraient de renforcer l'approche multialéa. Par ailleurs, le raffinement des facteurs de vulnérabilité (capacité d'adaptation, sensibilité) du secteur résidentiel, commercial et agricole face aux aléas enrichirait la perspective.

7.2 ANALYSE ÉCONOMIQUE

7.2.1 L'approche des multiples usages résilients : la plus avantageuse collectivement et sans regret, face à des défis de mise en œuvre

Les résultats de l'analyse économique montrent clairement que les approches de conciliation des multiples usages en zone à risque amènent des avantages collectifs plus grands à intervenir que les pratiques actuelles : les deux scénarios de milieux humides et hydriques combinés à une réduction des actifs exposés en milieu urbains amènent des VAN de 9 M\$ plus avantageuses que le scénario de référence. Ces deux stratégies concilient les usages grâce à un équilibre entre quatre pôles de facteurs :

- Une efficacité près de 45 % de coûts évités: Un potentiel de réduction des impacts du scénario de référence, c'est-à-dire une bonne efficacité au sens large à réduire les aléas (légère réduction des niveaux d'eau), les impacts directs (dommages aux bâtiments et aux terres), autant que les impacts indirects (réduction des coûts de gestion des urgences, de nettoyage de débris, des impacts psychosociaux, pertes de revenus, etc.).
- Des bénéfices environnementaux pour renforcer le rapport coûts-avantages: Cette catégorie de valeurs cherche non seulement à limiter les coûts environnementaux des solutions (par exemple limiter les modifications du milieu aquatique), mais surtout à générer des gains en services écosystémiques (les plus grands gains se font par conversion de milieux artificiels en milieu naturel ou déminéralisation de surfaces). La recherche active de solutions qui non seulement réduisent les dommages mais en plus génèrent des avantages pour l'environnement permettent d'éponger une partie des coûts et ainsi maintenir un rapport coût-avantages supérieur à 1.
- Des localisations judicieuses: Viser le maintien d'usages tolérants dans les zones de plus faible risque, à coûts partagés: L'analyse a clairement montré l'avantage collectif de réduire les activités dans les zones fortement à risque, d'autant ceux où les effets des changements climatiques sont de forte probabilité. À l'inverse, abaisser le seuil de tolérance à zéro en faisant un corridor vert intégral était désavantageux pour la collectivité. Malgré une efficacité maximale, des bénéfices environnementaux et même des bénéfices connexes, faisant plus que doubler les avantages, le coût d'opportunité lié à la perte d'usage privé des terrains a désavantagé ce scénario. En particulier, l'ampleur de la conversion des usages commerciaux ou industriels (forte valeur unitaire) ou résidentiels et agricoles (vu la vaste superficie concernée) prévue à ce scénario sembles irréalistes. Ainsi, il s'est avéré plus avantageux de permettre certains usages judicieusement choisis dans les zones à risque, permettant de profiter d'une certaine activité économique. Toutefois, pour une vision sans

regret face à l'augmentation projetée de l'impacts des changements climatiques sur le régime hydrologique, 1) les usages doivent anticiper l'évolution des zones à risque et suivre les indemnisations pour détecter l'atteinte d'un seuil de non-rentabilité et 2) les usages se doivent d'internaliser des contingences pour les opérations d'urgence, autant que de prévoir les mécanismes de partage de risque.

Utiliser le plein potentiel des milieux naturels: Dans cette approche de conciliation des usages, les deux scénarios de milieux humides et hydriques avec la relocalisation et l'immunisation sur une base individuelle sont très similaires du point de vue de l'analyse économique menée dans ce projet. Ce qui les distingue provient de l'emplacement des milieux humides et hydriques. Dans, l'un ils sont dits acceptables et localisés par la communauté, dans l'autre, ils sont distribués de façon à optimiser la réduction du risque, soit avec un étroit corridor multialéa aux abords du chenal principal. Les valeurs actuelles nettes (VAN) des deux scénarios sont similaires (9 M\$ pour la première et 9,24 M\$ pour la seconde). Toutefois, l'analyse des risques résiduels montre que les milieux humides riverains peuvent aussi réduire l'érosion (cobénéfices non chiffrés), de même qu'augmenter les retombées sur les services écosystémiques et sur les activités récréotouristiques (sous-estimés dans l'analyse quantitative). Cela fait pencher la balance de la recommandation vers le scénario des MHH distribués. De la même façon, l'impact des changements climatiques n'ayant été modélisé que sur le chenal principal, la VAN du scénario MHH-ACC comporte des limites. En effet, les CC appliqués sur l'ensemble des sous-bassins versants augmenterait les coûts à éviter et possiblement l'avantage de ce scénario. Ainsi, IMM-IND + MHH-DIS est potentiellement plus complexe à mettre en application, mais plus pérenne face à l'ambiguïté et l'incertitude. Chaque dollar investi dans ce scénario se traduit d'ailleurs en plus de 1,90 \$ à terme.

En somme, l'approche de valorisation des milieux hydriques et humides ainsi que de de réduction des risques en milieu urbain constitue un équilibre avantageux entre l'efficacité, le coût de la mesure, et les gains en services écosystémiques:

- Évite 44 % des coûts liés à la submersion
- Coûts des mesures de 9,5 M\$
- Avantages environnementaux (partiels) de 1,5 M\$, qui pourraient être multipliés par des pratiques agroenvironnementales connexes (ex. culture sur résidus).

La localisation judicieuse des usages résilients et l'utilisation du plein potentiel des milieux naturels constituent des facteurs de succès de ce scénario d'adaptation.

Ses avantages

Outre les coûts évités, avantages environnementaux et de minces bénéfices connexes, cette approche est sans regret du point de vue des risques climatiques. Elle s'avère robuste à l'analyse de sensibilité sur des tendances climatiques amplifiées (RCP 8.5 au 90° percentile) : ces conditions amènent même une augmentation marquée de la VAN du scénario. Autrement dit, plus l'impact des changements climatiques sera manifeste, plus cette approche sera rentable : elle s'avère donc sans regret pour la collectivité. De plus, elle est robuste à toutes les autres analyses de sensibilité. De même, elle est robuste à l'analyse des aléas résiduels car elle contribuerait à réduire les dommages liés à l'érosion des berges.

Ses inconvénients

Les coûts résiduels (56 % du statu quo) sont des dépenses qui devront éventuellement être absorbées. Le scénario correspond à une certaine perte d'usage et de revenus (fonciers, agricoles), et est conditionnel à des mesures de compensations dont la mise en œuvre dépasse le cadre de cette étude. De même les coûts de réalisation à hauteur de 9,5 M\$ méritent une planification réfléchie et partagées entre plusieurs acteurs selon les milieux concernés, ce qui complexifie la mise en œuvre. Les aspects sociaux ne sont pas à négliger. En effet, si la relocalisation des bâtiments est commune dans le bassin, ce n'est pas une garantie d'acceptabilité sans heurt. Il s'agit d'un enjeu sensible qui doit tenir compte de la réalité de chacun (voir section 7.2.2 sur les enjeux d'aménagement des zones urbaines). De même, l'étroit corridor multialéa (bandes riveraines et milieux humides riverains) vient transformer l'usage du territoire que les citoyens en font, ce qui peut en brusquer certains, en particulier les producteurs agricoles. La discussion sur le partage des coûts est nécessaire à cet effet, notamment en milieu agricole (voir la discussion du rapport de l'étude de cas de Compton à cet effet.)

7.2.2 L'aménagement des zones urbaines: un enjeu incontournable

L'enjeu dominant du résidentiel: L'étude du bassin de la Chaudière met en lumière la complexité de réduction des risques en zones urbaines à risque. Dans le scénario de référence, la mesure de gestion des risques urbains se définit par la poursuite de l'approche réglementaire d'indemnisation des dommages liés à la submersion. L'analyse suggèrent que, malgré les relocalisations massives récente, en l'absence de modification de ces pratiques au cours des 50 prochaines années, la collectivité devra essuyer des pertes d'environ 39,3 M\$ (RCP 4.5) liés aux inondations (dommages aux bâtiments, nettoyage des champs, pertes de revenus, etc.). Environ 70 % des pertes seraient concentrées dans le secteur résidentiel, soit des pertes d'actifs ou des impacts psychosociaux indirects (dépenses complémentaires, soins de santé, perte de productivité, qualité de vie). Ces derniers représentent des coûts supplémentaires

d'environ 0,42 \$ en d'impacts psychosociaux pour chaque dollar de dommage aux bâtiments et leur contenu. Ces pertes sont situées majoritairement dans les municipalités localisées le long du chenal principal. En sus, les secteurs publics (gestion des urgences, nettoyage, etc.), commerciaux et industriels représentent chacun environ 3,8 M\$ de coûts estimés. Cela souligne le grand potentiel de coûts évités dans les zones urbaines.

Des coûts à éviter au sous-sol des résidences: Au niveau résidentiel, les mesures préconisées sont l'immunisation des sous-sols et le retrait des actifs de ces paliers pour tous les bâtiments, la relocalisation de résidences à forte exposition (0-20 ans) et le rehaussement du plancher (20-100 ans). D'ailleurs, l'effet du retrait des actifs des sous-sols, une mesure purement comportementale à coûts sociaux nuls, a une incidence particulièrement forte sur les résultats. Sa mise en place pourrait être facilitée via les conditions d'indemnisation publique ou privée. L'option de recevoir une indemnité pour ces actifs, hautement à risque, peut créer un faux sentiment de sécurité. Ce sont des choix individuels qui se répercutent sur l'ensemble de la société, que ce soit en dépenses gouvernementales ou en hausse des primes d'assurances pour compenser ces remboursements. Par ailleurs, cet important levier de coûts évités soulève l'enjeu des logements en sous-sol. Un locateur a-t-il l'obligation de communiquer le risque à ses locataires ? À quel seuil devra-t-il renoncer à ses revenus de location et quelles en seront les conséquences ?

Besoin de planification urbaine d'ensemble: Une des limites de l'analyse repose sur l'hypothèse de décision à l'échelle individuelle. Dans le modèle proposé, la décision de relocalisation ou d'immunisation est optimisée en fonction des taux d'endommagement propre à chacun des bâtiments, sans égard au phénomène communément appelé du « trous de fromage » : une dévitalisation graduelle des quartiers au gré des déménagements. Toutefois, les décisions réelles doivent tenir compte de plusieurs facteurs :

- Le seuil absolu de rentabilité des services publics dans un quartier
- Le sentiment d'attachement des citoyens et la reconstruction sociale dans les nouveaux quartiers
- La disponibilité des terres pour recevoir les ménages relocalisés et le bilan fiscal d'une municipalité

Si ces facteurs n'ont pu être captés dans l'analyse, il apparaît évident qu'on ne pourra pas vider un quartier de ses résidences en y laissant que des commerces immunisés. Ainsi, des plans d'urbanisme et un contexte réglementaire clair, l'examen des impacts fiscaux et l'accompagnement social des communautés font partie des ingrédients du succès de l'aménagement urbain en zone à risque. Les plans de gestion intégrés invoqués dans la PPRLPI offrent cette possibilité mais sont peu utilisés.

7.2.3 Les dommages agricoles: une réflexion sociétale pour une agriculture résiliente aux aléas fluviaux

Les dommages en milieu agricole constituent un enjeu préoccupant aux abords de la rivière Chaudière et particulièrement de son affluent en aval, la Beaurivage. Une discussion spécifique a été menée sur les pistes pour une agriculture résiliente aux inondations au sein de l'autre <u>étude de cas sur la rivière Coaticook</u> (Boyer-Villemaire et al., 2021a). Certaines leçons peuvent s'appliquer au bassin de la Chaudière et la lecture en est suggérée. Le résumé est le suivant.

Limites réglementaires à l'adaptation: Du point de vue de cette étude sur l'adaptation aux changements climatiques, la limite réglementaire d'expansion de la zone agricole peut freiner la mise en place de solutions d'adaptation. Toutefois, les intérêts collectifs divergent (expansion urbaine, conservation forestière, conservation des milieux humides, réglementation de travaux en cours d'eau, autonomie alimentaire, sécurité du revenu pour les producteurs, patrimoine agricole, adaptation aux changements climatiques) et la réflexion se situe à l'échelle de la société.

Pratiques d'agriculture résiliente: Aussi, plusieurs des pratiques résilientes s'alignent avec le *Plan d'Agriculture Durable*, dont l'axe biodiversité. L'idée à retenir est l'avantage collectif des pratiques durables à bons rendements, résilientes aux événements extrêmes, et qui permettent de rester sous un seuil tolérable d'indemnisation collective.

Pour une décision multicritère: Pour le bassin de la Chaudière, un des aspects soulevés par les consultations est une certaine forme d'acceptabilité du statu quo par les producteurs agricoles, même ceux bénéficiant d'une dérogation pour l'exploitation en zone « 0-2 ans ». Toutefois, la variabilité des événements extrêmes pourrait menacer cet équilibre. Le seuil de non-rentabilité pour la société, vu le haut taux d'indemnisation (pertes de rendement, nettoyage de débris, stabilisation de berges) pourrait se manifester dans les prochaines décennies. Les enjeux d'identité et d'attachement à la terre, d'autonomie alimentaire régionale, autant que les questions de partage du risque devront aussi faire partie de la prise de décision.

7.2.4 La portée multiple des infrastructures naturelles

L'avantage économique des services écosystémiques rendus par les MHH: L'étude avait l'ambition d'évaluer le rôle des milieux humides et hydriques dans la régulation des inondations. D'un côté, la modélisation hydrologique indique que l'ampleur de la valorisation des MHH à effectuer pour atteindre un seuil de contrôle des débits était de plusieurs dizaines de km² par sous-bassin versant, ce qui est un ordre de grandeur nettement supérieur aux ambitions du scénario MHH acceptables et de mise en place du PRMHH basé sur le principe de zéro perte nette. D'un autre côté, il faut souligner que le scénario de MHH acceptables a fourni des bénéfices en termes de services

écosystémiques de l'ordre de 922 000 \$. Sachant que seule une valeur partielle de l'environnement a été évaluée, la réalité est probablement plus avantageuse encore. Ainsi, malgré un rôle limité de régulation des crues, les autres services écologiques fournis par les MHH présentent un avantage économique significatif pour la société. Pour le secteur comme la Haute-Chaudière, où le scénario recommandé comprend peu de création MHH, cela justifie les objectifs de conservation à une échelle suffisamment grande et les efforts de valorisation des services écosystémiques.

Utiliser l'écofiscalité pour conserver et prioriser la création, particulièrement en milieu urbain: Qualité de l'eau, qualité de l'habitat, stock de carbone: la valorisation économique des services écosystémiques avec les modules de InVEST s'est avérée une valeur ajoutée à l'étude avec un grand potentiel de transfert. Cela a permis de cerner que les conditions de maximisation des services écosystémiques offerts par les MHH:

- La présence des MHH existants représente un acquis important pour la société et réduire la destruction par conservation est la mesure qui limite le plus les pertes
- La création de MHH, même au-delà de la compensation, en particulier dans les zones riveraines plutôt qu'isolées, en milieu urbain (ex. déminéralisation des surfaces) et en second lieu en milieu agricole, constitue un ajout net de services écosystémiques très importants; l'enjeu est ici de le réaliser à moindre coût et les mécanismes d'écofiscalité restent à explorer pour servir de levier

Besoin de clarifier et d'optimiser les rapports coûts-efficacités des infrastructures naturelles: L'étude a révélé des arbitrages complexes pour réduire les coûts des infrastructures naturelles, notamment pour départager les proportions de bandes riveraines (considérés comme des habitats terrestres) vs. des milieux humides riverains vs. d'ouvrages hydroagricoles (ex. petits bassins d'eau claire), vs. surface déminéralisées en milieu urbain. Malgré les nombreuses sources consultées (voir tableau des coûts unitaires au chapitre 5), une étude plus approfondie permettrait d'optimiser le rapport coût-efficacité de cet inventaire et clarifier l'arbre de décision pour les usagers.

L'effet multiplicateur des milieux humides riverains connectés à des bandes riveraines

Le scénario recommandé dit « MHH distribué » comprenait la mise en place d'un étroit corridor de bande riveraine (15 m), reliant une série de milieux humides riverains dans des zones propices. D'une part, au niveau environnemental, la quantification des avantages écosystémiques en était multipliée, comparativement à la répartition des mêmes superficies dans des îlots isolés :

- +23 % de séquestration du carbone
- + 92% pour la qualité de l'eau, (presque qu'un rapport 1:2).

Cela s'explique par la combinaison spatiale de ces deux mesures qui crée un corridor écologique (qu'on pourrait aussi qualifier de multialéa puisqu'il contribue à réduire les risques liés à la pollution de l'eau et à l'érosion des berges). Cette combinaison réfère aussi à la notion de connectivité des milieux. D'une part, il faut souligner qu'il s'agissait du seul scénario étudié qui avait un effet tangible de réduction sur les actifs en milieu agricole.

Cela démontre bien que les choix de milieu à fort potentiel écologique peuvent converger ceux de réduction des risques.

L'effet amplificateur d'impacts dans certains secteurs sensibles : Le cas de la Beaurivage :

Dans le sous-bassin de la Beaurivage, le scénario recommandé implique 1,7 km² détruits et compensés dans le même sous-bassin, pour respecter le principe du zéro perte nette pour cette unité hydrologique plus indépendante que les autres.

Il reste une incertitude qui provient du transfert de l'efficacité basée sur le scénario MHH acc et il est recommandé de faire une analyse hydrologique plus spécifique pour la Beaurivage.

Toutefois, l'application du principe de compensation dans cette région soulève des questions sur la stratégie de développement territorial, dont une bonne part serait du développement agricole en milieu à fort potentiel humide. D'après la valorisation des services écosystémiques de cette étude et la réglementation environnementale en place, le levier de développement agricole semble a priori sous le seuil de rentabilité pour la société dans ce secteur : il coûterait très cher en pertes de services écosystémiques, loin d'être compensé par les avantages et revenus prévus dans notre modèle.

Le potentiel d'adaptation des pratiques de drainage: Un des leviers potentiels sousutilisé dans l'étude de Chaudière, mais abordé dans l'étude de cas de Compton, est celui des pratiques d'optimisation des systèmes de drainages, par des mesures agroenvironnementales (par exemple culture sur résidus), mais aussi des micro-ouvrage de rétention (ex. seuils et reprofilage des fossés) qui s'appliqueraient également au drainage routier autant que forestier. À faibles coûts, ils ont démontré un grand potentiel de bénéfices environnementaux, en plus de contribuer, bien que modestement et à effet diffus, à la lutte aux aléas fluviaux. En milieu urbain, la plupart de ces pratiques et ouvrages peuvent être classés dans les infrastructures naturelles et, à ce titre, bénéficier de financements spécifiques.

7.2.5 La transformation d'usage à haut risque : une mise en œuvre à explorer

Des avantages clairs: La transformation d'usage en milieu urbain à haut risque ou dans un mince corridor écologique en zone agricole fortement exposée, qui génèrent ensemble la plus grande part des dommages actuels et futurs, permet d'éviter la plus grande fréquence des coûts liés aux inondations en eau libre, sans compter des coûts de stabilisation de berges et un impact collatéral potentiels, la réduction des dommages liés aux embâcles de glace et avulsion, non chiffrée. Cela laisse présager des avantages nettement plus grands dans la réalité que ce que l'analyse suggère. L'acquisition de connaissances sur ces aléas renforcerait la possibilité de quantifier de ces avantages.

Les modalités de mise en œuvre dépassent le cadre de cette étude, ainsi les paramètres légaux restent à évaluer. Il existe de multiples exemples de cession d'usufruit pour l'intérêt collectif dans le monde, qui sont à inventorier et prioriser. Ils varient notamment selon le maintien du droit de propriété (servitude d'utilité publique, transfert, etc.) et l'échelle de gestion (municipalité, MRC, province, fiducie verte). De plus, l'usage de destination pourrait varier selon les caractéristiques biophysiques locales (ex. degré d'humidité), autant que les opportunités de financement: bande riveraine (PDA) ou milieu humide riverain (PRMHH); ou des nouveaux statuts de zone de transition d'intérêt collectif à reconnaître (ex. « zone tampon », « bande riveraine élargie », « marge de sécurité », « écotone », ou encore « zone de contrainte naturelle multialéa », selon la saveur disciplinaire souhaitée).

Enjeux de distribution: Par ailleurs, l'analyse de distribution montre que le statu quo retombe en grande partie sur la société. Actuellement, 3 programmes publics de 3 ministères et organismes différents subventionnent ou indemnisent les usages dans la zone multialéa et contribuent à éponger près de 60 % des dommages par le secteur public. La cohérence de ces programmes avec le cadre réglementaire (notamment environnemental) est incertaine. Certains producteurs agricoles sinistrés rapportent ne pas utiliser le plein potentiel de ces programmes par lourdeur administrative. Ainsi la redistribution d'une part des avantages s'avère une condition de succès, mais cela soulève aussi un besoin d'améliorer la cohérence réglementaire en matière d'indemnisation en zones à risques fluviaux, notamment dans le secteur agricole.

Ainsi, malgré les limites des connaissances, l'analyse suggère que cette mesure de transformation de certains usages est suffisamment avantageuse du point de vue économique pour explorer les modalités de mise en œuvre et analyser les ajustement réglementaires nécessaires.

7.2.6 Les scénarios extrêmes de contrôle de la rivière ou de réduction maximale de risque ne sont pas avantageux

Les résultats suggèrent aussi que les scénarios extrêmes de contrôle maximal de la rivière ou de réduction totale des risques ne sont pas avantageux. L'option structurelle envisagée (digues) avait une efficacité et une portée spatiale limitées, pouvant même accentuer les aléas ailleurs, à un coût 4,5 fois plus grand que les dommages évités. Malgré cela, leur acceptabilité est forte, elles suscitent un sentiment de sécurité et les communautés les réclament. D'autant que ce sont des solutions du moindre effort individuel. Cela pointe vers la nécessité de mobiliser les connaissances sur la dynamique des rivières et le besoin de démystifier le sentiment de sécurité offert par ces avenues.

Cette leçon résonne aussi sur le corridor inondable et les bandes riveraines. Réfléchir en termes extrêmes entraînent des coûts disproportionnés, sans pour autant être plus

efficaces. Effectivement, bien qu'ils permettent d'éviter entre 70 % et 90 % des coûts causés par les aléas, ces avantages ne font pas le poids face aux coûts de mise en œuvre et d'entretien projeté sur les décennies à venir. Cela se reflète dans des VAN négatives. De plus, ces deux scénarios ont un ratio des avantages sur les coûts inférieurs à 1. Cela signifie que chaque dollar investi dans ces scénarios se traduira par des retombées inférieures à 1 \$. De meilleurs investissements peuvent être réfléchis pour renforcer la résilience collective.

7.3 LES LIMITES ET SOURCES D'INCERTITUDE

Voici les principales limites de l'étude.

- Modélisation des changements climatiques: La modélisation des submersions en contexte de changements climatiques a été restreinte au chenal principal, soit la rivière Chaudière. Conséquemment, l'influence des changements climatiques sur la dynamique d'inondation des sous-bassins, qui devraient avoir une incidence notable sur le sous-bassin Beaurivage, entre autres, n'a pu être intégrée. Ceci reste marginal dans la prise de décision, considérant que 85 % des actifs et activités à risque sont localisés en bordure du chenal principal. Toutefois, il faut voir le SQ comme étant une borne inférieure de coûts à éviter, puisque les CC dans l'ensemble du bassin versant pourraient augmenter les épisodes extrêmes et, donc, les coûts des aléas.
- Zone de modélisation du bassin versant: La modélisation de l'aléa d'inondation en eau libre du bassin versant s'est fait sans intégrer de modélisation hydraulique qui a, par exemple, été employée dans l'étude de cas de la rivière Compton. La raison principale est la complexité d'appliquer cette technique plus fine à l'ensemble du bassin versant, notamment par manque de données de terrains et par temps de calcul irréaliste. L'étendue du territoire a nécessité une modélisation géostatistique pour convertir les débits en niveaux d'eau, sur la majorité du chenal principal de la rivière. Bien que moins robuste, cette technique ne devrait pas avoir d'incidence sur les recommandations, puisque tous les scénarios ont été modélisés avec cette technique et que la conclusion est robuste à des variations de niveaux d'eau.
- Secteur des routes: Les infrastructures routières ont été exclues car 1) les données de durée d'inondation n'existent pas mais elles sont critiques pour la quantification du coût des détours routiers ou des pertes de productivité 2) il est assumé que les routes essentielles seront réparées peu importe le scénario, donc ce poste d'impact n'est pas sensible à l'option choisie. Il s'agit par contre de dépenses collectives non négligeables en gestion des inondations qui rehausse l'ampleur d'une option de non-intervention et justifier davantage d'intervenir.
- Quantification des autres aléas : les autres aléas fluviaux (embâcles, érosion, cônes alluviaux, etc.) n'ont pu être pris en compte dans cette étude de cas, faute

des données nécessaires. Il est crucial d'avoir en mains des données probabilistes observées pour quantifier les probabilités anticipées. En effet, toute technique de prévision se base sur l'expérience pour projeter le passé dans l'avenir. La conséquence directe de cette lacune, notamment concernant les embâcles qui sont sources de problèmes dans le chenal principal, est de sous-estimer les dynamiques multialéa. Celles-ci se caractérisent comme un aléa (par exemple, une crue printanière) qui en occasionne un autre (formation d'embâcles de glaces) et jouent comme un effet multiplicateur sur la submersion. Tel que décrit dans la section 2.1.6, ces deux aléas sont étroitement liés dans le bassin versant de la zone d'étude.

- Choix de l'approche d'évaluation des dommages annuels moyen liés aux inondations: La méthode du dommage annuel moyen (DAM) permet d'obtenir des flux financiers annuels stables qui tiennent compte de la variabilité des dommages liée à la récurrence des inondations, en se basant sur l'espérance mathématique des dommages. Par contre, la variabilité des dommages due à la fréquence des inondations, considérées comme une variable aléatoire, n'est pas prise en compte. L'approche actuarielle fréquence-sévérité présentée à l'annexe D du guide méthodologique tient compte de l'incertitude due à la fréquence des inondations sur l'horizon temporel choisi. Elle permet d'obtenir une distribution des dommages dans tous les scénarios d'inondations possibles afin d'avoir un portrait plus détaillé du risque. L'application de cette méthode à l'étude de cas du bassin de la rivière Chaudière a montré qu'il y a une grande probabilité (57 %) que les dommages structurels aux résidences dépassent les dommages moyens de l'ACA (13,85 M\$). Ainsi, l'approche actuarielle fréquencesévérité permettrait de renforcer la robustesse de la prise de décision en contexte de gestion des extrêmes, pouvant engendrer des dommages catastrophiques.
- Choix des modules de services écosystémiques par InVEST: Cette étude a considéré 3 modules (qualité de l'eau, qualité de l'habitat et séquestration du carbone) et reflète une valeur partielle et minimale des services écosystémiques. D'autres modules s'offrent: pollinisation, valeur récréative, paysage, carbone bleu. En conséquence, les impacts des scénarios sur les milieux aquatiques n'ont pu être captés, un élément significatif, notamment pour refléter les bénéfices d'ajouter des milieux hydriques et humides. Il reste sans regret du point de vue des services écosystémiques de se diriger vers l'approche combinant des milieux humides et l'immunisation individuelle, mais l'ajout de modules, notamment le carbone bleu, permettrait une meilleure estimation des retombées.
- L'impact de la relocalisation sur les communautés: L'effet des relocalisations résidentielles et commerciales sur les dynamiques des communautés n'a pas été prise en compte. Par exemple, existe-t-il un seuil de relocalisation, au sein d'un même quartier, au-delà duquel tous les bâtiments seraient relocalisés?

Autrement dit, est-ce qu'il serait plus simple de relocaliser tout le quartier que de faire du cas par cas, dans certaines situations? Aussi, est-ce que la relocalisation a une incidence sur les services publics? S'il ne reste qu'un bâtiment sur une route, est-ce que la municipalité continuerait de l'entretenir de la même manière? Les aspects sociaux ne sont pas non plus à négliger (sentiment d'attachement), de même que les pertes fiscales encourues pour les municipalités.

• Recouvrement des coûts totaux de restauration des MHH par le Règlement sur la compensation pour l'atteinte aux milieux humides et hydriques (RCAMHH) dans l'objectif du zéro perte nette: les scénarios analysés dans cette étude utilise cette hypothèse afin d'estimer les coûts de restauration des MHH modélisés. Hors, il est actuellement impossible de valider cette hypothèse puisque le RCAMHH est en cours d'actualisation. Le bilan des projets soutenus par le premier programme de création et de restauration de milieux humides et hydriques du ministère donnera une meilleure idée des coûts réels pour restaurer ou créer ces milieux et des ajustements nécessaires si les sommes amassées pour la restauration dans les régions avec pertes étaient insuffisantes pour la restauration.

7.4 CONCLUSION GÉNÉRALE

Cette analyse visait principalement à comparer différents scénarios d'adaptation en milieu fluvial afin de déterminer celles qui seraient les plus avantageuses économiquement à mettre en place dans le bassin versant de la rivière Chaudière.

L'analyse de risque a d'abord permis d'identifier les foyers de dommages : le grand potentiel de coûts à éviter dans les foyers urbains (principalement l'enjeu résidentiel) et dans le secteur agricole.

Ensuite, l'analyse économique fournit deux indicateurs économiques, la valeur actualisée nette et le ratio avantages-coûts, qui peuvent aider les décideurs locaux, régionaux et nationaux à faire des choix mieux adaptés aux défis auxquels seront confrontées les communautés fluviales lors des 50 prochaines années.

Les résultats de l'ACA indiquent clairement que les deux scénarios les plus avantageux économiquement pour l'ensemble de la société concilient les usages, par les mesures de relocalisation et d'immunisation individuelle des bâtiments résidentiels et commerciaux, combinée à la restauration de milieux humides et hydriques. Les avantages excèdent les coûts, car les dommages évités en termes de réduction des aléas, des coûts d'indemnisation des propriétaires et des coûts psychosociaux, combinés à l'amélioration des services écosystémiques, dépassent les coûts de compensation aux propriétaires. En particulier, l'option de distribuer stratégiquement sur le territoire les milieux hydriques et humides pour renforcer la connectivité des habitats riverains s'avère plus robuste face aux risques résiduels.

En conclusion, cette analyse a montré que les scénarios les plus avantageux économiquement sont ceux qui évitent une grande part des coûts dans les secteurs à risque, améliorent les services écosystémiques, tout en permettant des usages durables dans les secteurs à moindre risque, en coûtant moins cher à réaliser et en étant robuste face à l'incertitude liée aux risques climatiques. Par contre, la mise en œuvre de l'adaptation repose sur des questions collectives qu'il reste à résoudre : Comment opérer les transformation d'usage au bénéfice de la collectivité ? Quel est le seuil de tolérance face à l'augmentation anticipée des indemnisations collectives des dommages résidentiels et comment partager ce fardeau entre les individus et la société ? À partir de quel seuil de risque doit-on contraindre les individus à un choix, pour le bien-être collectif ?

Les retombées pour l'adaptation de cette étude se font déjà sentir. Notamment, les résultats préliminaires de l'ACA ont soutenu l'adoption des objectifs de conservation des milieux hydriques et humides dans la mise à jour du plan directeur de l'eau (PDE) du COBARIC, ainsi que la démarche d'élaboration du PRMHH Chaudière-Appalaches.



ARROW, K. J., CROPPER, M. L., GOLLIER, C., GROOM, B., HEAL, G. M., NEWELL, R. G., WEITZMAN, M. L. (2014). SHOULD GOVERNMENTS USE A DECLINING DISCOUNT RATE IN PROJECT ANALYSIS? REVIEW OF ENVIRONMENTAL ECONOMICS AND POLICY. 145-163. 10.1093/REEP/REU008

BARRETTE, N., VANDERMISSEN, M.-H., ROY, F. ATLAS DE VULNÉRABILITÉ. VULNÉRABILITÉ AUX ALÉAS HYDROMÉTÉOROLOGIQUES. [EN LIGNE] HTTPS://ATLAS-VULNERABILITE.ULAVAL.CA/PROJET/ (PAGE CONSULTÉE LE 26 NOVEMBRE 2020)

BERGSTRAND, K., MAYER, B., BRUMBACK, B., & ZHANG, Y. (2015). Assessing the relationship between social vulnerability and community resilience to hazards. Social indicators research, 122(2), 391-409.

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.

BONNIFAIT, L. (2005). DÉVELOPPEMENT DE COURBES SUBMERSION-DOMMAGES POUR L'HABITAT RÉSIDENTIEL QUÉBÉCOIS. [MÉMOIRE DE MAÎTRISE. INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE] INRS-ETE. http://espace.inrs.ca/id/eprint/398/1/T000392.pdf

BOYER-VILLEMAIRE, U., SIMARD, C., LAMY, A., ROQUES, J., MORIN, H., DESJARDINS, R., HEINRICH, D. (2021). ANALYSE COÛTS-AVANTAGES DES OPTIONS D'ADAPTATION AUX INONDATIONS ET ALÉAS FLUVIAUX EN CONTEXTE DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES: GUIDE MÉTHODOLOGIQUE. RAPPORT PRÉSENTÉ À RESSOURCES NATURELLES CANADA. OURANOS. MONTRÉAL 113 P. + ANNEXES.

HTTPS://www.ouranos.ca/wp-content/uploads/GuideBoyerVillemaire2021_FR.pdf

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. 119p. + ANNEXES.

HTTPS://WWW.OURANOS.CA/WP-CONTENT/UPLOADS/RAPPORTBOYERVILLEMAIRE2021A_FR.PDF

Chokmani, K., Lhissou, R. et Y. Gauthier (2020). Carte de prédisposition aux embâcles de glace sur la rivière Chaudière. Institut National de la Recherche Scientifique, Centre Eau Terre Environnement (format vectoriel).

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. (2016). ANALYSE COÛTS-AVANTAGES D'OPTIONS D'ADAPTATION EN ZONE CÔTIÈRE AU QUÉBEC – RAPPORT SYNTHÈSE. OURANOS. HTTPS://www.ouranos.ca/publication-scientifique/Rapport-Synth%C3%A8Se_Qc.pdf

COBARIC (2014). Plan directeur de l'eau du bassin versant de la rivière Chaudière : Mise à jour 2014 - Portrait. Comité de bassin de la rivière Chaudière, 256p.

COBARIC. Système de surveillance de la rivière Chaudière. [En ligne] http://www.ssrc.cobaric.oc.ca/publique_abonnement.php (page consultée le 9 décembre 2020)

COBARIC. TERRITOIRE DU COBARIC. [EN LIGNE] <u>HTTPS://COBARIC.QC.CA/BASSIN-VERSANT/TERRITOIRE-DU-COBARIC/</u> (PAGE CONSULTÉE LE 27 OCTOBRE 2020)

CRAAQ - Centre de référence en agriculture et agroalimentaire du Québec (2018a). Maïs fourrager - Budget à l'hectare (AGDEX 111/821a). <a href="https://www.craaq.qc.ca/Publications-du-craaq.qc.ca/

CRAAQ - CENTRE DE RÉFÉRENCE EN AGRICULTURE ET AGROALIMENTAIRE DU QUÉBEC (2018B). FOIN DE LUZERNE ET DE MIL SANS PLANTE-ABRI - BUDGET À L'HECTARE (AGDEX 121/821 2018). https://www.craaq.qc.ca/Publications-du-CRAAQ/foin-de-luzerne-et-de-mil-sans-plante-abri-budget-octobre-2018/p/PREF0069

CRAAQ - CENTRE DE RÉFÉRENCE EN AGRICULTURE ET AGROALIMENTAIRE DU QUÉBEC (2018C). PÂTURAGE EN ROTATION- BUDGET À L'HECTARE (AGDEX 130/821 2018). https://www.craaq.qc.ca/Publications-du-CRAAQ/paturage-en-rotation-budget-2018/p/PREF0079

CRAAQ - CENTRE DE RÉFÉRENCE EN AGRICULTURE ET AGROALIMENTAIRE DU QUÉBEC (2019A). MAÏS-GRAIN - BUDGET À L'HECTARE (AGDEX 111/ 821B 2019). https://www.craaq.qc.ca/Publications-du-CRAAQ/mais-grain-budget-a-l_hectare-2019/p/PREF0235

CRAAQ - CENTRE DE RÉFÉRENCE EN AGRICULTURE ET AGROALIMENTAIRE DU QUÉBEC (2018D). AVOINE D'ALIMENTATION ANIMALE - BUDGET À L'HECTARE (AGDEX 113/ 821A 2018). HTTPS://www.craao.oc.ca/Publications-du-CRAAO/avoine-d_alimentation-animale-budget-a-l_hectare-2018/p/PREF0262

CRAAQ - CENTRE DE RÉFÉRENCE EN AGRICULTURE ET AGROALIMENTAIRE DU QUÉBEC (2019B). SOYA - BUDGET À L'HECTARE (AGDEX 141/ 821 2019). https://www.craaq.qc.ca/Publications-du-craaq/soya-rendements-2019-agdex-141854/p/PREF0175

CRAAQ - CENTRE DE RÉFÉRENCE EN AGRICULTURE ET AGROALIMENTAIRE DU QUÉBEC (2019C). BLÉ D'ALIMENTATION ANIMALE - BUDGET À L'HECTARE (AGDEX 112/821B 2019).

https://www.craaq.oc.ca/Publications-du-CRAAQ/soya-rendements-2019-agdex-141854/p/PREF0175

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

CROPPER, M. L., (2012). How Should Benefits and Costs Be Discounted in an Intergenerational Context? Resources for the Future. Resources for the future. Https://media.rff.org/documents/RFF-DP-12-42.pdf

DONNÉES QUÉBEC. HISTORIQUE DES ÉVÉNEMENTS DE SÉCURITÉ CIVILE – ARCHIVES [EN LIGNE] HTTPS://www.donneesouebec.ca/recherche/dataset/observations-terrain-historiques-<u>DEVENEMENTS-ARCHIVES/RESOURCE/C98EFFC1-483E-4FFA-B3F0-FEAE953F5D02</u> (PAGE CONSULTÉE LE 29 OCTOBRE 2020)

Dutemple, K. (2019). Les coûts des projets de démolition. [en ligne] https://soumissionrenovation.ca/fr/blogue/couts-projets-demolition

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

GOLLIER, C. (2011). PRICING THE FUTURE: THE ECONOMICS OF DISCOUNTING AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT [DOCUMENT INÉDIT] PRINCETON UNIVERSITY PRESS, HTTP://IDEI.FR/SITES/DEFAULT/FILES/MEDIAS/DOC/BY/GOLLIER/PRICING_FUTURE.PDF

GOUVERNEMENT DU QUÉBEC. (2020). PLAN POUR UNE ÉCONOMIE VERTE 2030 : PLAN DE MISE EN ŒUVRE 2021-2026. https://cdn-contenu.ouebec.ca/cdn-contenu/adm/min/environnement/publications-adm/plan-economie-verte/plan-mise-oeuvre-2021-2026.pdf?1608758955

ISQ - INSTITUT DE LA STATISTIQUE DU QUÉBEC. ESTIMATION DE LA POPULATION DES MRC SELON LE GROUPE D'ÂGE ET LE SEXE, AU ÎER JUILLET, QUÉBEC. [EN LIGNE] <u>HTTPS://BDSO.GOUV.QC.CA/PLS/KEN/KEN/214_TABL_DETL.PAGE_DETL?P_IDEN_TRAN=REPER6PL3W50848</u> 625961356@X:EL&P_LANG=1&P_ID_RAPRT=852 (PAGE CONSULTÉE LE 27 OCTOBRE 2020).

ISQ - Institut de la statistique du Québec (ISQ). Produit intérieur brut au prix de base par industries, régions administratives, régions métropolitaines de recensement, Québec. [En ligne] https://bdso.gouv.oc.ca/pls/ken/ken214_tabl_detl.page_detl?p_iden_tran=REPERC72I9N 47-138472728109},N6&p_lang=1&p_id_raprt=2299 (page consultée le 9 avril 2021)

Institut national de recherche scientifique. Le modèle hydrologique Hydrotel. [En ligne] http://www1.ete.inrs.ca/activites/modeles/hydrotel/fr/accueil.htm (page consultée le 13 novembre 2020)

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). (2014) CLIMATE CHANGE 2014: SYNTHESIS REPORT. CONTRIBUTION OF WORKING GROUPS I, II AND III TO THE FIFTH ASSESSMENT REPORT OF THE INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE [CORE WRITING TEAM, R.K. PACHAURI AND L.A. MEYER (EDS.)]. IPCC, GENEVA, SWITZERLAND, 151 PP.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (GIEC). DEFINITION OF TERMS USED WITHIN THE DDC PAGES. [EN LIGNE] https://www.ipcc-data.org/guidelines/pages/glossary/glossary_r.html (PAGE CONSULTÉE LE 23 FÉVRIER 2020)

LAVELL, A., OPPENHEIMER, M., DIOP, C., HESS, J., LEMPERT, R., LI, J. & CARDONA, O. D. (2012). CLIMATE CHANGE: NEW DIMENSIONS IN DISASTER RISK, EXPOSURE, VULNERABILITY, AND RESILIENCE. IN MANAGING THE RISKS OF EXTREME EVENTS AND DISASTERS TO ADVANCE CLIMATE CHANGE ADAPTATION: SPECIAL REPORT OF THE INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (PP. 25-64). CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS.

LECONTE, R., BIZHANIMANZAR, M. (2020) MODÉLISATION DU RÉGIME HYDROLOGIQUE EN FONCTION DES MILIEUX HUMIDES ET RIVERAINS DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENT CLIMATIQUE, RAPPORT DE PROJET PRÉSENTÉ AU COBARIC, 76 p.

HTTPS://COBARIC.QC.CA/WP-

CONTENT/UPLOADS/2021/02/RAPPORT_DE_PROJET_MODELISATION_USHERBROOKE_COBARIC.PDF

MASSÉ, S, DEMERS, S, BUFFIN-BÉLANGER, T, BIRON, P.M., CHONÉ, G, MASSEY W. (2020) DEVELOPMENT OF A MAPPING APPROACH ENCOMPASSING MOST FLUVIAL PROCESSES: LESSONS LEARNED FROM THE FREEDOM SPACE FOR RIVERS CONCEPT IN QUEBEC (CANADA). RIVER RESEARCH AND APPLICATIONS, 36, 947-959.

MAMH - MINISTÈRE DES AFFAIRES MUNICIPALES ET DE L'HABITATION. (2020) PLAN DE PROTECTION DU TERRITOIRE FACE AUX INONDATIONS : DES SOLUTIONS DURABLES POUR MIEUX PROTÉGER NOS MILIEUX DE VIE. https://www.mamh.gouv.oc.ca/fileadmin/publications/amenagement_territoire/plan_protectio https://www.mamh.gouv.oc.ca/fileadmin/publications/amenagement_territoire/plan_protectio https://www.mamh.gouv.oc.ca/fileadmin/publications/amenagement_territoire/plan_protectio https://www.mamh.gouv.oc.ca/fileadmin/publications/amenagement_territoire/plan_protectio https://www.mamh.gouv.oc.ca/fileadmin/publications/amenagement_territoire/plan_protectio https://www.mamh.gouv.oc.ca/fileadmin/publications/amenagement_territoire/plan_protectio <a href="https://www.mamh.gouv.oc.ca/fileadmin/publications/amenagement_territoire/plan_protections/amenagement_territoire/plan_protections/amenagement_territoire/plan_protections/amenagement_territoire/plan_protections/amenagement_territoire/plan_protections/amenagement_territoire/plan_protections/amenagement_territoire/plan_protections/amenagement_territoire/plan_protections/amenagement_territoire/plan_protections/amenagement_territoire/plan_protections/amenagement_territoire/plan_protections/amenagement_territoire/plan_protections/amenagement_territoire/plan_protections/amenagement_territoire/plan_protections/amenagement_territoire/plan_protections/amenagement_territoire/plan_protections/amen

MAMH – MINISTÈRE DES AFFAIRES MUNICIPALES ET DE L'HABITATION (2018). RÔLE D'ÉVALUATION FONCIÈRE POUR LES MUNICIPALITÉS DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE CHAUDIÈRE. BASE DE DONNÉES.

MELCC - MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA LUTTE AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES. (2021B) PORTRAIT RÉGIONAL DE L'EAU. CHAUDIÈRE-APPALACHES (RÉGION ADMINISTRATIVE 12). [EN LIGNE] (PAGE CONSULTÉE LE 3 NOVEMBRE 2020) HTTP://www.environnement.gouv.oc.ca/eau/regions/region12/12-chaudiere.htm#21

MELCC - MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA LUTTE AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES (2021A)
GLOSSAIRE. [EN LIGNE] (PAGE CONSULTÉE LE 3 NOVEMBRE 2020)
HTTPS://www.cehq.gouv.qc.ca/glossaire.htm

MELCC - MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA LUTTE AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES. SECTEUR DE LA MOYENNE-CHAUDIÈRE. (2021C) [EN LIGNE] (PAGE CONSULTÉE LE 3 NOVEMBRE 2020) http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/bassinversant/bassins/chaudiere/moyenne-chaudiere.htm#pressions

MELCC - MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES (2018) ATLAS HYDROCLIMATIQUE DU QUÉBEC MÉRIDIONAL. https://www.cehq.gouv.qc.ca/atlas-hydroclimatique/

MONTMARQUETTE, C., ET SCOTT, I. (2007). TAUX D'ACTUALISATION POUR L'ÉVALUATION D'INVESTISSEMENTS PUBLICS AU QUÉBEC (PUBLICATION NO. 2007RP-02.PDF). CIRANO. HTTP://www.cirano.oc.ca/pdf/publication/2007RP-02.pdf MORSE, B., TURCOTTE, B. (2018). RISQUE D'INONDATIONS PAR EMBÂCLES DE GLACES ET ESTIMATION DES DÉBITS HIVERNAUX DANS UN CONTEXTE DE CHANGEMENTS CLIMATIQUES (VOLET A). OURANOS. MONTRÉAL. https://www.ouranos.ca/wp-content/uploads/RapportMorse2018.pdf

MSP - MINISTÈRE DE LA SÉCURITÉ PUBLIQUE. (2018) PLAN D'ACTION EN MATIÈRE DE SÉCURITÉ CIVILE RELATIF AUX INONDATIONS: VERS UNE SOCIÉTÉ QUÉBÉCOISE PLUS RÉSILIENTE AUX CATASTROPHES. HTTPS://www.securitepublique.gouv.qc.ca/fileadmin/Documents/securite_civile/inondation/Planaction_inondations.pdf

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

PENNING-ROWSELL, 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

Ouranos (2015) AQUARISC. Base de données. <u>https://aquarisc.ouranos.ca/#</u>

PÉPIN, S. (2016) LES BANDES RIVERAINES AU QUÉBEC : OBSTACLES À LEUR VÉGÉTALISATIONS ET DÉMARCHES À ENTREPRENDRE. [EN LIGNE] TO (PAGE CONSULTÉE LE 16 DÉCEMBRE 2020)

RONDEAU-GENESSE, G. ET BRAUN, M. (2020). PRODUCTION DES SCÉNARIOS CLIMATIQUES POUR LES PROJETS: IMPACT DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LES DÉBITS AU QUÉBEC (CQ2) ET LA THÉMATIQUE ÉVOLUTION DU CLIMAT DU PROJET DE SOUTIEN À INFO-CRUE; RAPPORT TECHNIQUE. OURANOS.

Sharp, R., Douglass, J., Wolny, S., Arkema, K., Bernhardt, J., Bierbower, W., Chaumont, N., Denu, D., Fisher, D., Glowinski, K., Griffin, R., Guannel, G., Guerry, A., Johnson, J., Hamel, P., Kennedy, C., Kim, C.K., Lacayo, M., Lonsdorf, (...) E., Mandle. (2015). Invest 3.9.0 User's Guide. The Natural Capital Project, Université Stanford. https://storage.googleapis.com/releases.naturalcapitalproject.org/invest-userguide/latest/index.html

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.

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

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/coutspdf.html (PAGE CONSULTÉE LE 30 MARS 2020)

Webster, A., Gagnon-Lebrun, F., Desjarlais, C., Nolet, J., Sauvé, C., Et Uhde, S. (2008). L'ÉVALUATION DES AVANTAGES ET DES COÛTS DE L'ADAPTATION AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES. OURANOS. https://www.ouranos.ca/publication-scientifique/RapportWebster2008_FR.pdf

Wood, S.L.R., Dupras, J., Bergevin, C., Kermagoret, C. (2019). La valeur économique des écosystèmes naturels et agricoles de la Communauté métropolitaine de Québec et de la Table de concertation régionale pour la gestion intégrée du Saint-Laurent. Ouranos. https://www.ouranos.ca/publication-scientifique/RapportCMQ2019.pde



ANNEXES

ANNEXE A - COMPLÉMENTS AU CHAPITRE 1: Introduction

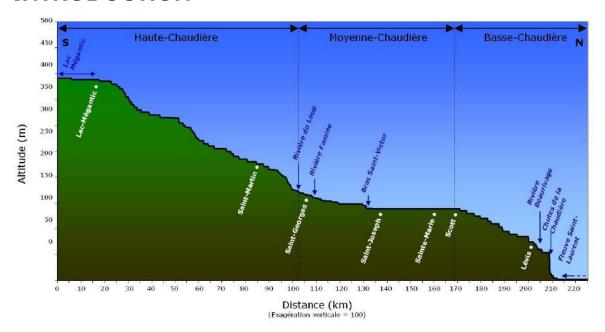
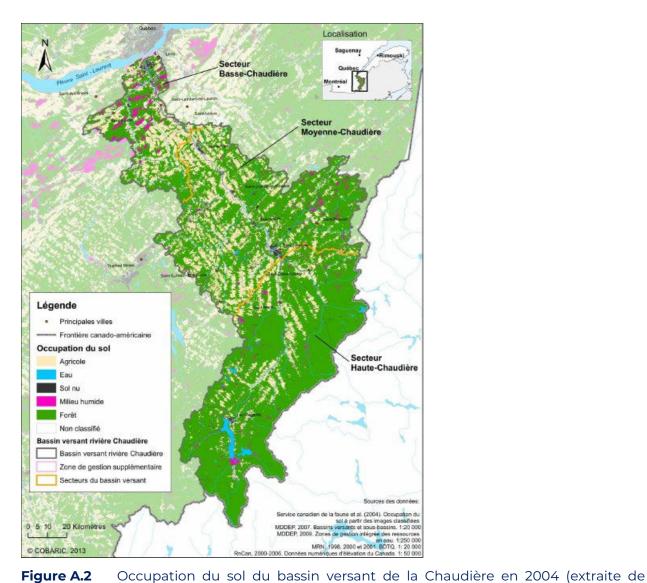


Figure A.1 Profil de la rivière Chaudière (extraite de COBARIC, 2014)

Tableau A.1 Variation de population 1999 - 2019, par MRC

MRC	Secteur majoritaire	Population 1999	Population 2019	Augmentation 1999 - 2019
La Nouvelle-				
Beauce	Basse-Chaudière	30959	37897	22,4%
Lotbinière	Basse-Chaudière	27342	33276	21,7%
Lévis	Basse-Chaudière	122474	147673	20,6%
Beauce-Sartigan	Haute-Chaudière	48162	53639	11,4%
	Moyenne-			
Robert-Cliche	Chaudière	19098	19290	1,0%
Le Granit	Haute-Chaudière	21941	21383	-2,5%
	Moyenne-			
Les Appalaches	Chaudière	44754	42550	-4,9%
	Moyenne-			
Les Etchemins	Chaudière	18324	16478	-10,1%

Source : Institut de la statistique du Québec. Estimation de la population des MRC selon le groupe d'âge et le sexe, au l'er juillet, Québec. [En ligne]



COBARIC, 2014)

Source: https://bdso.gouv.qc.ca/pls/ken/ken214_tabl_detl.page_detl?p_iden_tra

n=REPER6PL3W50848625961356@x:El&p_lang=1&p_id_raprt=852

CONSULTÉE LE 3 NOVEMBRE 2020)

(PAGE

ANNEXE B - COMPLÉMENTS AU CHAPITRE 2 : DESIGN DE L'ÉTUDE

Tableau B.1 Liste synthétique des impacts utilisés pour l'ACA du bassin versant de la Chaudière

Catégorie d'impact	Impacts spécifiques
Coûts liés à l'aléa	Gestion des urgences Nettoyage des débris Dommages aux bâtiments Pertes agricoles Pertes commerciales (production, ventes, stock, revenus locatifs, etc.) Interruptions ou ralentissements routiers Impacts sociosanitaires et psychosociaux
Coûts de la solution	Coûts de mise en place Coûts d'entretien
Services écosystémiques	Habitats fauniques Qualité de l'eau Séquestration du carbone
Usages publics des espaces naturels	Activités récréotouristiques
Coûts connexes	Coûts d'expropriation (rachat) Coûts des compensations à verser Coûts du système de suivi
Bénéfices connexes	Revenus issus des bandes riveraines

ANNEXE C – COMPLÉMENTS AU CHAPITRE 3: MOBILISATION DES PARTIES PRENANTES

L'ensemble du projet a été permis par une mobilisation et une implication, à toutes les étapes de l'étude, de différentes parties prenantes du territoire de la Chaudière. La mobilisation des connaissances de l'ensemble des acteurs de cette étude a mené à une construction méthodologique robuste représentative de la complexité des systèmes étudiés. La méthodologie suivie pour la mise en place des différentes instances décisionnelles et consultatives est largement étayée dans le <u>guide méthodologique</u> (Boyer-Villemaire et al., 2021).

Quatre regroupements de travail ont été mis sur pieds: l'équipe de projet, le comité technique, les comités locaux de suivi (CLS) et les assemblées consultatives de priorisation (ACP). La composition complète, les objectifs et dates de rencontre des différentes instances sont détaillés dans le tableau 2. À noter que l'ACP de la Chaudière aura été définie comme un CLS élargi impliquant les mêmes acteurs augmentés d'élus et d'aménagistes du territoire. Ainsi, la représentativité de l'ensemble du territoire et des perspectives est conservée. Initialement, l'étude de cas du bassin versant de la rivière Chaudière devait se concentrer sur la municipalité de Beauceville. L'élargissement de l'échelle d'étude à l'ensemble du bassin versant, décidé en partenariat avec les parties prenantes, aura occasionné un agrandissement et une diversification des acteurs sollicités pour les différentes instances.

1. Premier comité local de suivi (CLS)

Le démarrage réel du projet aura eu lieu lors du premier CLS, qui aura été l'occasion de présenter les premières avancées de la modélisation hydrologique du bassin versant de la Chaudière dans le cadre du <u>projet d'ACA pour les PRMHH</u>, en partenariat avec le COBARIC et la Fédération canadienne des municipalités.

Avec la présentation des résultats préliminaires de calibration sur les rivières Famine et Beaurivage; affluents de la rivière Chaudière, la présentation des arrimages envisagés avec le projet d'ACA a permis de générer de nombreux échanges d'intérêt avec les acteurs concernés. Les premières discussions ont principalement tourné autour des conclusions de l'étude hydrologique ainsi que de la présentation de la portée et des attentes du projet ACA. Lors de cette rencontre, les parties prenantes ont été en mesure d'appuyer leur intérêt à s'impliquer dans l'initiative et, dans la mesure du possible, à valoriser ses résultats, par exemple dans le cadre du développement futur des plans de protection des milieux humides et hydriques dans la région de Chaudière-Appalaches.

2. Second comité local de suivi (CLS)

Préalablement à la tenue du second CLS, de nombreuses réunions se sont tenues au sein de l'équipe de projet, notamment avec le comité technique ainsi qu'avec d'autres spécialistes provenant de l'équipe interne d'Ouranos (climatologie) et de l'université de Sherbrooke. Ces rencontres auront notamment permis d'arrimer le choix des scénarisations climatique les autres territoires d'étude (Compton), les horizons d'analyse ainsi que l'identification des besoins pour la modélisation en tenant compte des spécificités associées au territoire de la Chaudière (par exemple, l'échelle d'étude et l'absence de modèle hydraulique couvrant l'ensemble du bassin versant).

L'arrimage du projet au processus de production des plans de protection des milieux humides et hydriques aura été une étape importante. Il a permis d'identifier dans quelle mesure le projet s'insère dans la phase de diagnostic pour l'élaboration de ces plans. Son apport est entre autres de fournir une matière précieuse pour la définition des objectifs de conservation, duquel découlera l'identification de milieux humides et hydriques d'intérêt pour la conservation (OCMHH).

Tous ces éléments ont ainsi été exposés lors du second CLS. La présentation de l'arrimage et la définition des apports potentiels à l'ACP au développement des OCMHH ont permis de confirmer les hypothèses de définition des cibles des scénarios envisageable (réhabilitation et/ou création de MHH), mais aussi les difficultés de cerner les choix à l'état de dégradation, faute de données nécessaires. L'Université de Sherbrooke a ensuite assuré une présentation de l'avancement du montage du modèle SWAT, ainsi que sa calibration séquentielle. De plus, la validation du contenu du statu quo a été déterminée.

À la suite du comité, il a en outre été possible de produire la couche d'occupation du sol nécessaire pour lancer les simulations hydrologiques servant de référence à l'étude. Une réflexion sur les scénarios pouvant être présentés en ACP a été initiée et une liste de 9 scénarios préliminaire y a été dressée. Finalement, le processus de mobilisation pour l'ensemble du projet a été couché sur papier, soulignant particulièrement la nécessité de viser des rencontres plus courtes, denses et exhaustives.

3. Premier atelier en Assemblée consultative de Priorisation (ACP)

La structure ainsi que la tenue de la première ACP aura été respectivement validée par le CLS et supportée par l'équipe du COBARIC avec le soutien de l'équipe de projet afin de s'assurer de la présence du maximum de représentants des différentes MRC et expertises impliquées dans le développement des PRMHH. Les 8 MRC ont finalement été représentées et 11 personnes ont assisté à l'ACP. L'ordre du jour comprenait la présentation de l'initiative et des activités, la cartographie participative (préparation en amont des cadres, informations statistiques par MRC, indices d'humidité topographique, etc.) et, finalement, une période de retours et de discussions en sous-

groupe (un regroupement pour les MRC en amont du bassin versant et une pour les MRC présentes en aval), puis en assemblée entière.

Les informations ont permis d'identifier les foyers d'impacts, l'état de certains milieux humides ainsi que certaines incohérences existantes dans la couche des MHH potentiels 2019. Ils ont aussi permis de confirmer l'hétérogénéité des opportunités de création de MHH et de bandes riveraines ainsi que des enjeux associés aux aléas et impacts fluviaux. Ces échanges ont surtout permis d'affiner les éléments constitutifs de la première version des scénarios et plus particulièrement celui des MMH acceptables, incluant la mise en œuvre des plans d'urbanisme et la création et la réhabilitation de MHH dans certains secteurs propices. Tous les MHH non ciblés ou discutés ont été considérés comme conservés.

4. Troisième comité local de suivi (CLS)

Préalablement à la tenue du troisième CLS, une rencontre en comité technique a eu lieu, précisant la nécessité d'intégrer les statistiques saisonnières dans les analyses hydrologiques. Les choix de stations pour la calibration séquentielle et l'arrimage des choix dans les analyses statistiques et les distributions à envisager pour rendre compte des sept périodes de retour modélisées ont aussi été décidés.

Lors du troisième CLS, plusieurs avancées majeures ont été réalisées. L'état de l'avancement des travaux de modélisation hydrologique (finalisation de la calibration séquentielle, résultat d'analyse du rôle des MHH sur les bassins versants de la Beaurivage et de la Famine, avancement modélisation statu quo) a été présenté. De la même manière, la caractérisation des 14 mesures, de même que les scénarios, réduits de 9 à 6, ont été présentés. Les hypothèses ainsi que la distinction entre les scénarios ayant un impact sur la modélisation hydrologique et ceux ne nécessitant que des ajustements de nature économique et d'infrastructure a pu ainsi être précisés aux membres. Les mesures constitutives du scénario des MHH efficace ont fait l'objet d'ajustements, notamment concernant les bandes riveraines et la délimitation du corridor inondable. Le scénario associé aux pratiques agroforestières a soulevé un intérêt, mais a surtout permis de souligner les enjeux d'accès à une information ainsi qu'une paramétrisation valide pour intégration SWAT (surtout en milieu forestier et agricole). L'accès et l'existence d'informations fiables ont aussi été emmenés en ce qui concerne l'intégration de l'aléa d'embâcle dans l'analyse.

Une présentation de la matrice préliminaire d'impact a fourni une occasion de valider les hypothèses faites et d'apporter certaines précisions associées aux bâtiments, aux transports ou encore à l'évacuation en période de sinistres (voir <u>rapport méthodologique</u>). Finalement, la formule virtuelle de l'atelier 2 de l'ACP, de même que son report pour cause de COVID et de difficulté d'arrimage avec la production des livrables intermédiaires de modélisation ont été entendus et validés par le CLS. La proposition de produire des fiches informatives comme outils communicationnels

supplémentaires pour chacune des mesures constitutives des scénarios a été retenue par les membres du CLS.

5. Quatrième comité local de suivi (CLS)

La poursuite des travaux de développement de la matrice d'impact ainsi que de l'arrimage des scénarios et des mesures pouvant être étudiées en connaissances des informations à disposition s'est activement poursuivies à la suite du troisième CLS. Le développement du modèle d'analyse de distribution a été adapté au contexte du territoire de la Rivière Chaudière. Notamment, la connaissance du coût de mise en œuvre des mesures structurelles et institutionnelles a été enrichie par l'identification de programmes gouvernementaux et de sources d'informations quantitatives nécessaires. L'identification et la caractérisation de la nature et de la valeur des enjeux résidentiels et commerciaux ont été développées. Ainsi, leur intégration dans le processus dénombrement des actifs devenait plus rigoureuse. Ces jalons importants, de même qu'une meilleure description des postes et flux monétaires à envisager, auront nécessité la tenue de plusieurs rencontres hebdomadaires. perfectionnement de la matrice d'impacts ainsi que la tenue de rencontres d'arrimages des extrants de modélisation hydraulique (submersion) à ceux de la modélisation économique (centroïde des bâtiments, taux d'endommagements, impact sur l'assurabilité – travaux en développement; N'Cho et Bourgeault, UQAM -) ont été de grandes avancées dans le design de l'étude.

Les échanges en comité technique, élargi à Guénolé Choné et Pascale Biron de l'Université de Concordia et des représentants de la DEH, ont contribué grandement à l'appropriation des informations sur la submersion existante sur le territoire de la Chaudière. Ils ont surtout permis le développement de la méthodologie de génération des informations de submersions dérivées de la méthode large échelle. Au moment de l'étude, les seules informations disponibles étaient celles présentes le long du chenal principal de la Chaudière, du lac Mégantic au Saint-Laurent. Ce comité technique élargi aura permis de faire le pont entre les sorties du modèle SWAT (localisation des confluences, association aux 48 secteurs, etc.) et les typologies d'occupation du sol du modèle InVest. Les associations de mesures pour le scénario des MHH efficaces ont été transposées en couche d'occupation du sol afin d'assurer la production des informations de débit par l'Université de Sherbrooke. Finalement, le choix du nombre de scénarios radiatifs (RCP 4.5, RCP 8.5) a été fixé à 10 pour des raisons associées au temps de simulation du modèle SWAT, la représentation de la variabilité de valeurs a été retenue comme paramètre de sélection de ces scénarios.

L'attribution du coût des mesures intégrées dans les scénarios de la Chaudière et devant être quantifiés a fortement avancé durant cette période. Près de 15 représentants du milieu professionnel, de bureaux d'études ou du gouvernement ont ainsi été sollicités. Ces rencontres ont permis de hiérarchiser les choix dans les

solutions à scénariser. Ce travail de fond aura été essentiel, tant dans la précision des mesures et de leur amplitude de mise en œuvre que dans la structuration du modèle économique.

Lors du quatrième CLS, les résultats de simulation SWAT sur l'ensemble du bassin versant pour les différents scénarios d'occupation du sol et en contexte de changements climatiques ont été transmis aux participants. La présentation aura permis de souligner l'hétérogénéité spatiale de l'efficacité des MHH, l'étude sur la saisonnalité et les horizons temporels, l'augmentation des inondations dans la basse Chaudière sous l'effet des changements climatiques et la différence d'efficacité des deux scénarios sur le rabattement des débits. De la même manière, les résultats du dénombrement préliminaire des actifs sur le corridor fluvial ont confirmé au comité la prédominance des impacts résidentiels, industriels et commerciaux. La matrice d'impact détaillée a été présentée afin de traiter en comité de certains aspects résiduels associés notamment aux enjeux patrimoniaux, aux infrastructures publiques, routières et récréotouristiques ainsi qu'aux impacts des inondations sur la production laitière.

Quelques échanges visant à poursuivre la définition du contenu du scénario de pratiques de drainage ont eu lieu. Le choix de paramétrisation des typologies d'occupation du sol pour le drainage, notamment agricole et forestier, étant trop incertain (causé par l'inexistence des données et parce qu'elles n'étaient pas prises en compte dans la calibration SWAT), il a été considéré impossible de produire une couche d'occupation du sol représentative du changement des pratiques de drainage.

Le scénario d'immunisation collective, appuyé des informations sur les digues contenues dans les rapports d'experts (Biron, 2020) et de Tecsult (1994), ainsi que le contenu des mesures du scénario d'immunisation individuelle, a été validé et appuyé par le comité. De la même manière, ce sont la méthode de modélisation des niveaux d'eau dérivée des informations de l'Université de Concordia et de la DEH, ainsi que la proposition de contenue de l'atelier d'ACP 2 (préoccupation résiduelle, préférence relative, obstacles à la mise en œuvre) ont été discutées et approuvées en CLS.

6. Cinquième comité local de suivi

Le cinquième CLS aura été précédé d'une rencontre en comité technique ayant permis la consolidation des résultats préliminaires de la modélisation économique pour les scénarios acceptables et efficaces ainsi que ceux issus de l'immunisation individuelle et collective. Cette première rencontre aura été l'occasion d'ajustements avant la tenue du CLS.

Le CLS 5 aura regroupé 98 personnes. Tous les éléments produits à ce moment au sujet du dénombrement et de la comparaison des résultats du statu quo à ceux issus de la transposition des informations obtenues en ACP en information sur la submersion ont été transmis et extrêmement bien reçus. Les résultats ont levé

quelques questionnements, plutôt sur la méthode que sur les résultats en euxmêmes, sans remettre en cause la méthodologie et les hypothèses faites et soulignant, au passage, la robustesse des produits développés.

Le CLS a été clôturé par une présentation du COBARIC visant à proposer les OCMHH aux élus et aménagistes des 8 MRC à la lueur des résultats des modélisations hydrologiques et économiques produits à ce jour. Les suggestions faites ont ainsi été appuyées par les argumentaires développés dans le cadre de cette étude et bonifiés de nouvelles informations produites (TWI issus du lidar, priorisation, etc.) ainsi que des analyses complémentaires de l'OBV.

7. Second atelier en Assemblée consultative de Priorisation et sixième comité local de suivi

Le second atelier de l'ACP s'est déroulé en présence de 15 représentants de 8 MRC. L'atelier s'est déroulé en trois périodes. Après la présentation de l'ensemble des résultats préliminaires, trois tables de travail impliquant 5 membres de l'ACP et un animateur ont été formées. Les préoccupations principales issues de ces travaux étaient les difficultés de prise de conscience et de réelles politiques favorisant la mise en œuvre des mesures constitutives des scénarios aux meilleures VAN. Dans cette direction, l'intérêt a surtout porté sur la mise en place de bandes riveraines et d'un cadre contraignant pour s'assure du respect de la règlementation en cours et du futur cadre normatif. En outre, la mise en œuvre relevant de l'initiative individuelle, c'est-àdire de devoir se priver d'une partie de son terrain personnel pour le bien collectif semble naturel chez les riverains et, particulièrement chez les agriculteurs pour qui cela suppose une baisse de revenu. Des leviers ont été identifiés, comme la mise en place d'un crédit sur la taxe foncière pour faciliter l'implication des agriculteurs sur ce dossier. La mise en place de suivi et de contrôles gouvernementaux contraignants, voire de pénalités, pourraient aussi favoriser la mise en œuvre des réglementations déjà existantes. D'autres préoccupations résiduelles ont été levées, notamment concernant les valeurs estimées ou la non-prise en compte de l'aléa d'embâcle. Les membres de l'ACP ont soulevé que les montants quantifiés dans le cadre de l'étude ne paraissaient pas excessivement importants, même à moyens termes ce qui pourrait emmener à quelques résistances.

Le vote final sur les scénarios préférentiels des membres de l'ACP aura vu une majorité pour les scénarios 6 et 5 dans le premier choix, le second choix de préférence se portant lui sur les scénarios des milieux humides et hydriques acceptables et, dans une moindre mesure, efficaces.

À la suite de ce second ACP, le CLS s'est réunis afin d'effectuer un retour sur l'ACP et de discuter des méthodes de diffusion et d'appropriation ultérieure des résultats par les MRC et municipalités du territoire. A l'instar des membres de l'ACP, les membres du CLS ont confirmé leur satisfaction à la vue des résultats de l'étude et, tout particulièrement, en ce qui concerne les résultats de monétarisation des flux

écosystémiques. Tel que les résultats de l'étude le suggéraient, le CLS appui le message visant à privilégier la mise en œuvre d'infrastructures vertes et de mesures visant à réduire les vulnérabilités plutôt que des infrastructures imposantes cherchant à atténuer l'aléa et dont les répercussions sont encore mal connues, telles que les digues. Le manque d'un cadre réglementaire contraignant pour mettre en œuvre les obligations individuelles déjà existantes au Québec a été rappelé. L'aspect volontaire de mise en place de mesures individuelles rendant l'inertie de modification dans les comportements très importante. Les blocages existants en milieu agricole ont été rappelés. Dans la même veine, le besoin d'améliorer les programmes d'accompagnements existants (la poursuite prime-vert, par exemple), dans l'objectif de mettre en place les mesures de réduction des vulnérabilités en accord avec la règlementation a été souligné. Du point de vue des vulnérabilités résidentielles, la Chaudière ayant fait l'objet d'un vaste programme de relocalisation, peu d'éléments ont été ajoutés lors de ce CLS mais ce dernier a souligné la plus-value que constitue l'intégration des solutions d'immunisation individuelles dans l'analyse. Le CLS aura finalement été très satisfait de l'ensemble du projet et des démarches de mobilisations et de concertation mises en œuvre.

Tableau C.1 Détail sur la composition, le rôle et la fréquence de tenue des différentes structures mobilisées sur le territoire de la Rivière Chaudière

	Équipe de projet	Comité technique	CLS	АСР
Composition	Jérémie Roques (ROBVQ) Boyer-Villemaire, Ursule (Duranos) Simard, Caroline (Duranos) Annabelle Lamy (Ouranos) Dorothy Heinrich (Ouranos) Hugo Morin (Ouranos) Raphael Desjardins (Ouranos) Mohammad Bizhanimanzar (U.Sherbrooke)	Équipe de projet (4) Véroni que Brochu (COBARIC) Yannick Bourque (COBARIC) Robert lecompte (U.Sherbrooke) Autres intervenants (non permanents): Marco Braun (Ouranos) Boudreault, Mathieu (UQAM); N'cho, Adele Danielle (UQAM); Spécia istes en hydrocli matologie (Ouranos) Marc-André Bourgault (UQAM - U Laval)	Comité technique (permanents7) Martin Vaillancourt (CRE Chaudière Appalaches) Josée Bretron (MRC Lotbinière) Patrick Martineau (MRC Lotbinière) Jérome Carrier / Nicolas Latouche (Ville de Lévis) Érick Olivier (MRC Nouvelle-Beauce)	CLS (12) Russell Gilbert (COBARIC) Ghassen Ibrahim (COBARIC) Robert Leconte (U. Sherbrooke) Normand Roy (maire de Saint-Victor) Louise Roy (MRC de Beauce-Sartigan) Pablo Montenegro Rousseau (MRC de Lotbinière) Gérald Grenier (maire de Sainte-Clotilde-de-Beauce) Cynthia Boudner (MRC des Appaladhes) René Allen (maire de Sainte-Aurélie) Mathieu Turcotte (MRC des Etchemins) Rémi Morin (MRC du Granit) Jean-Roch Veilleux (maire de Saint-Alfred) Geneviève Turgeon (MRC Robert-Cliche)
Fonction / Expertises	Économistes Gestion de risque Mobilisation et participation citoyenne Géomatique et modéli sation	Experts en mobilisation et GIEBV (OBV) Experts universitaires en charge des travaux de modélisation HHH Experts et représentants des entités administratives leader ou porteuse des initiatives associés au projet	Aménagistes, élus Expertise et connaissance des enjeux et projets en cours sur le bassin versant. Implications dans le développement et la mise en œuvre des PRMHH; connaissance des contraintes associées au SAD et plans d'urbanismes. Transfert bilatérale d'informations	 Aménagistes, urbanistes, gestionnaires de cours d'eau et élus Apport de l'experti se et des connaissances locales sur les enjeux, projections d'aménagements et contraintes existantes. Connaissance systèmique des éléments représentatifs de chacun des usages de la ressource et du territoire (institution., acteurs, facteurs de résistance au changement,)
Nombre de rencontres	Hebdomadaire	11	5 ou 6 (+ Beauceville avant ajustements - 26/03/2019)	2
Dates et lieux des rencontres	Plateforme zoom	•14/01/2020 - Intégration des CC avec spécialistes d'Ouranos •10/02/2020 •17/02/2020; webrencontre •09/04/2020 - Rencontre modélisation HH- statistiques saisonnières •28/05/2021 - Équi pe analyse; couts des mesures institutionnelles (avec d'autres représentants d'Ouranos) •26/05/2020 - N'Cho niveaux •21/07 et 04/08/2020 - Débits SWAT •27/08/2020 - Retur couts mesures •03/09/2020 - renbcotnre di menssionnement ouvrages A. Ma'hot et M,Trudelle •11/09/2020 (Avec DEH et Concordi q arrimage modélisations)	CLS 1 - 29/10/2019; MRC de Beauce-Sartigan, salle du conseil des maires CLS 2 - 27/02/2020; webrencontre CLS 3 - 28/05/2020; webrencontre CLS 4 - 13/11/2020; webrencontre CLS 5 - 18/02/2021; webrencontre CLS 6	• ACP 1 - 12/03/2020; Service de sécurité incendie civile – Ville de Saint-Joseph-de-Beauce 1325, avenue du Palais Saint-Joseph-de-Beauce (Québec) GOS 2VO • ACP 2 -
Livrables principaux	• Coordination du processus de	Soutien technique et analytique à la méthodologie : Modélisation hydrologique Modélisation hydraulique Modélisation économique Analyses	Validation et un enrichissement consé quent dans les choix méthodol ogiques et les hypothèses de l'analyse Assur er la continuité avec les représentants de l'Assemblée consultative de priorisation (ACP). Arrimage obligation légale MRC > PRMHH Assur er le meilleur arrimage des hypothèses de travail et d'étude aux réalités et attentes du territoire	Définition et caractérisation des mesures retenus pour modélisation et analyse Co-construction de scénarios d'adaptation à étudier (Statu Quo, acceptable et efficace) I dentification de la nature et estimation de la valeur de éléments intang bles Liste des limites et pistes d'amélioration Liste des préoccupations résiduelles

ANNEXE D - CARTOGRAPHIE DES SUBMERSIONS

Cette annexe apporte davantage de détails sur la méthodologie et les résultats relatifs à la modélisation des débits et niveaux d'eau du bassin versant de la rivière Chaudière, réalisé dans le cadre du projet *Analyse coûts-avantages des options d'adaptation face aux inondations et aléas fluviaux du bassin versant de la rivière Chaudière*. Les analyses des aléas en climat futur ont été établies en deux temps : la modélisation hydrologique, puis la modélisation hydraulique à large échelle (méthode géostatistique). Un horizon de référence et deux horizons de temps de 20 et 30 ans allant respectivement de 2020 à 2040 et de 2041 à 2070 ont été considérés pour la modélisation. Se référer aussi au rapport Leconte et Bizhanimanzar (2020) pour la portion de modélisation des débits, en libre accès sur internet.

1. Modélisation des débits

Un modèle SWAT (Koi et al., 2016), développé par Leconte et Bizhanimanzar (2020), a été calibré sur 5 secteurs observés (station hydrométrique, DEH) de manière séquentielle afin de tenir compte de l'hétérogénéité des paramètres à l'échelle de l'ensemble du bassin versant. 1064 sous-bassins versants ont été retenus pour structurer le réseau d'écoulement simulé afin de capter au mieux l'effet de chacun des complexes de milieux humides sur le bilan hydrologique de la rivière.

651 simulations, telles que rapportées dans le tableau D.1, ont été produites, selon le nombre d'horizons temporels (référence, 2020 à 2040 et 2041 à 2070), pour les 10 scénarios de changement climatique, par période de retour des scénarios climatiques (2 ans, 10 ans, 20 ans, 50 ans, 100 et 350 ans) et par scénario d'occupation du sol (SQ, MHH_ACC; MHH_EFF).

Tableau D.1 Synthèse du nombre de simulations hydrologiques (Sim. Hydro) et de production géomatique des cartes de submersion (Carto. Sub) correspondants aux différents RCP, occurrences, horizon, scénario d'occupation du sol et percentiles considérés

Projection climatique	l Modele global i Modele regiona		RCP	N.sim	OccU.	Hori.	Sc. OccSol	Sim. Hydro	Nb Perc.	Carto. Sub
Climat actuel			L		7	11	3	21	0	21
COR_ECE_HH4_R43	EC-EARTH	HIRHAM5	RCP 4.5	1004	7	3	3	63		
COR_ECE_RC4_412	EC-EARTH	RCA4	RCP 4.5	1229	7	3	3	63	3	100
COR_MPL_CU4_R41	MPL_CU4_R41 MPI-ESM-LR		RCP 4.5	1417	7	3	3	63	3	189
COR_CE2_RC4_R41	CanESM2	CanRCM4	RCP 4.5	1117	7	_ 3_	3	_63_		L
COR_ECE_HH4_R83	EC-EARTH	HIRHAM5	RCP 8.5	1041	7	3	3	63		
COR_CE2_RC4_R81	CanESM2	CanRCM4	RCP 8.5	1153	7	3	3	63		
COR_MPM_CU4_R81	MPI-ESM-MR	CRCM5-UQAM	RCP 8.5	1155	7	3	3	63	3	100
COR_CE2_CA2_R81	CanESM2	CanRCM4	RCP 8.5	1433	7	3	3	63	3	189
COR_CE2_CA4_R81	CanESM2	CanRCM4	RCP 8.1	1546	7	3	3	63		
COR_CE2_CU4_R81	CanESM2	CanRCM4	RCP 8.5	1621	7	3	3	63		
Simulations hydrologiques (SWAT) totale										651
	Tra	aitement géon	natique	s des	donr	iées	d'altit	ude to	otale	399

Mise en valeur des milieux humides dans le modèle

La modélisation a utilisé le modèle hydrométrique SWAT, bonifié pour tenir compte des effets spécifiques des milieux humides sur les débits riverains (Figure D.1). Cette bonification prend la forme d'une extension permettant une modélisation explicite des effets des milieux humides sur le bilan hydrologique et la génération des débits. Cette extension aura ainsi permis de faire la distinction entre les milieux humides connectés et déconnectés du cours d'eau récepteur. Les hypothèses, modules et équations appliqués pour ces deux types de milieux humides sont distincts. Particulièrement, cette bonification a permis l'interaction entre les milieux humides et de la capacité des milieux humides isolés à laisser l'eau s'évaporer avant de rejoindre la rivière. Ces milieux isolés jouent un rôle extrêmement important dans la réduction des débits extrêmes, réagissant comme des éponges qui absorbent une partie des précipitations très élevées ou de la fonte rapide des glaces. Bien modéliser leur apport à la dynamique hydrique du bassin était primordial. Cette attention toute particulière aux milieux humides explique aussi l'utilité des résultats dans le cadre du développement de Plan Régional de protection des Milieux Humides et Hydriques (PRMHH), document de référence attendu pour chaque municipalité en application de la loi sur les milieux humides et hydriques.

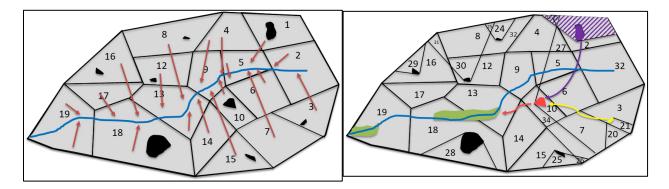


Figure D.1 Représentation originale (gauche) et améliorée (droite) des milieux humides dans le modèle SWAT

Source: Leconte et Bizhanimanzar (2020)

(issus de l'analyse du MNE – 30m), le modèle considère l'ensemble des unités uniformes de réponse hydrologique homogène (URHH) contenues en amont de ceux-ci comme un sous-bassin distinct ne s'écoulant pas vers le milieu récepteur et au sein duquel le calcul du bilan hydrologique est résolu. Cette surface peut être assimilée à une dépression déconnectée du réseau correspondant à l'aire de drainage du milieu humide. L'interaction entre les milieux humides connectés et le cours d'eau, elle, est assurée par un second type de module qui considère l'ensemble des milieux humides connectés d'un même bassin versant comme unique (milieu humide équivalent), mais conservant les mêmes caractéristiques que les milieux humides individuels qu'il remplace dans la simulation. Voir aussi Leconte et Bizhanimanzar (2020, sections 6.2.1 à 6.2.4).

Efficacité des scénarios

Le modèle SWAT a été roulé de nouveau pour mesurer l'efficacité des scénarios d'adaptation qui modifiaient l'utilisation du sol. L'intrant était la cartographie modifiant les usages. Le tableau D.2 rapporte ces modifications par sous-bassin et par type d'usage, pour le scénario MHH_acc basé sur le principe de zéro perte nette et le scénario MHH_eff, basé sur le scénario de corridor vert intégral. La figure D.2 illustre l'évolution du changement de débit des récurrences 1:2 (50 %) à 1:350 (0,03 %), pour les deux scénarios modifiant l'utilisation du sol.

Tableau D.2 Variations de superficie par milieu et par région, selon le scénario

	Basse Chaudière	Beaurivage	Moyenne Chaudière	Famine	Haute Chaudière	Total					
Scénario de zéro perte nette											
Agricoles	-0,98	1,2	-0,07	0	-0,37	-1.19					
Urbains	2,75	0,19	-0,07	0,08	0,21	-0.22					
Humides	-0,25	-1,08	0,58	-0,08	0,84	+3.16					
Arbrisseaux	-0,85	-0,1	-0,03	0	-0,37	0.01					
Forestiers	-0,67	0,19	-0,4	0	-0,31	-					
Aquatiques	0	0	0	0	0	-1.35					
Scénario de n	nilieux humic	des efficaces									
Agricoles	-31,06	-14,87	-5,86	-2,09	-1,25	-					
Urbains	-10,71	-1,39	-1,98	-0,86	-0,85	-54.29					
Humides	23,24	2,67	1,34	0,59	1,09	-15.79					
Arbrisseaux	18,53	13,6	6,51	2,37	1,01	+28.93					
Forestiers	0	0	0	0	0	-0.01					
Aquatiques	0	0	-0,01	0	0	+42.02					

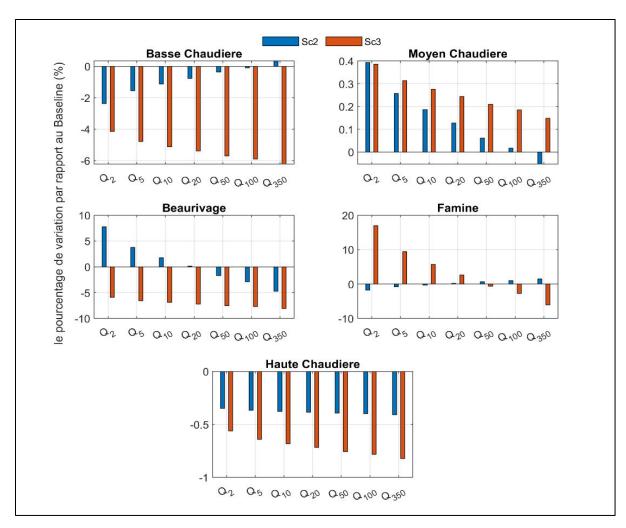


Figure D.2 Évolution du changement de Q2 à Q350, selon les deux scénarios d'adaptation modifiant l'utilisation du sol SOURCE : LECONTE ET BIZHANIMANZAR (2020)

2. Cartographie des niveaux d'eau par méthode géostatistique

Par la suite, les données débitmétriques ont été converties en informations sur la submersion via une méthode géomatique, à l'aide des données de niveau d'eau produites par l'Université de Concordia dans le cadre du projet InfoCrue. La méthode et les résultats de ces analyses sont détaillés dans cette section.

2.1 Données sources

Les données sources nécessaires pour la production des cartes de submersion sont de deux types :

- Les données de débit maximal annuelles de chacune des simulations aux exutoires des sous-bassins versants du modèle SWAT et
- Un portefeuille de données matricielles incluant celles sur le débit et l'altitude de l'eau dans les plaines inondables de la Chaudière.

2.2 Méthode

Le territoire de la rivière Chaudière a vu le déploiement de nombreux projets visant à appuyer la production de cartes des zones inondables permettant de renforcer la sécurité des personnes en fournissant une information de qualité suffisante pour identifier les territoires à risque. Parmi ceux-ci, les travaux menés par l'Université de Concordia dans le cadre de l'INFO-Crue (DEH-MELCC/Ouranos - 2018-2023) et faisant suite aux travaux d'évaluation préliminaire des risques d'inondation (EPRI-MSP) ont permis le développement et l'application d'une méthode de cartographie des inondations large échelle pouvant être déployée sur tout le bassin versant en conservant une erreur acceptable (erreur quadratique de 20 à 30 cm). La méthode employée est basée sur l'utilisation du modèle Lisflood (Bates et De Roo, 2000). La figure D.3 fournit une présentation de l'ensemble du processus de production des couches de submersion pour l'ensemble des simulations hydrologiques SWAT fournies par l'Université de Sherbrooke. Plus de détails sur la méthode sont fournis dans le rapport méthodologique (en préparation).

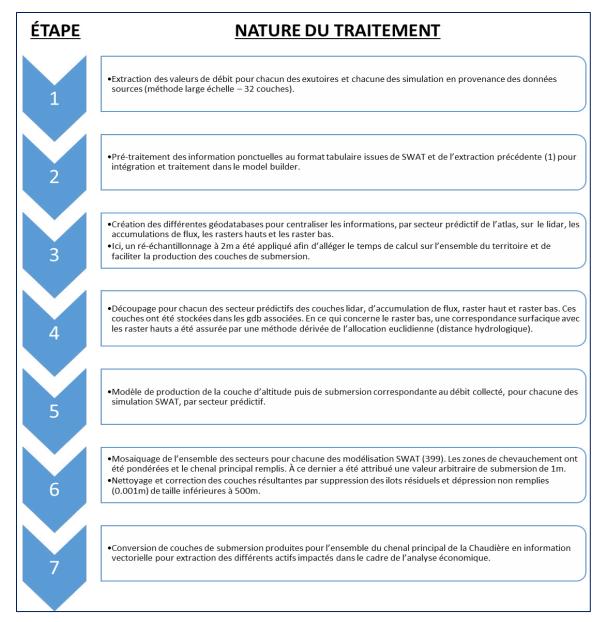


Figure D.3 Étapes du processus de production des couches de submersion

Données débitmétriques: Les extrants de la modélisation SWAT utilisés pour la suite des traitements (débits journaliers maximums) ont été extraits au niveau des exutoires du centre du chenal de la Chaudière, après les confluences. Ces données ont été fournies pour chacune des 651 simulations. La localisation de certains de ces points a été ajustée pour correspondre à l'architecture hydrographique et aux confluences du modèle large échelle de l'Université de Concordia. D'autres ont été supprimés de manière à ne conserver qu'un point par secteur de modélisation du chenal principal de la rivière (le plus représentatif, en aval). Au total, ce sont 47 des 66 secteurs qui ont été conservés pour la production des couches de submersion, les 19 secteurs non couverts ne contenant pas de point d'exutoires de la modélisation SWAT ou n'étant pas retenu pour l'analyse (Lac-Mégantic).

Les informations débitmétriques au centre du chenal ont été extraites des 32 couches matricielles fournies par l'Université de Concordia. L'ensemble de ces informations a ensuite subi un prétraitement sur tableur pour calculer les médianes, dixième et quatre-vingt-dixième des valeurs de débit SWAT pour chacune scénario radiatif (RCP 4.5, 4 échantillons; RCP 8.5, soient 6 échantillons) pour chacune des récurrences considérées, chaque point et chacun des scénarios d'adaptation. Le nombre de simulations est ainsi passé de 651 à 399. Il a ensuite été question d'identifier pour chaque point les valeurs de débits directement supérieurs et inférieures, ainsi que le nom des couches d'altitude correspondante.

La mise en forme et l'exportation des informations consolidées, ainsi que le stockage des données matricielles découpées pour l'ensemble des secteurs, aura permis le calcul des couches d'altitude et de submersion (différentiel avec le lidar). La résolution de ces couches a été définie à 4m² pour optimiser le temps de calcul et assurer l'utilisabilité des données aux fins de modélisation économique. Le mosaïquage (moyenne des cellules chevauchantes) et le nettoyage des entités résiduelles (îlots / trous) dont la surface dépassait un certain seuil (500m) ont été l'assurance de produire des couches de submersion exploitables pour chacun des 399 scénarios étudiés. Finalement, la vectorisation des surfaces submergées aura assuré la création de polygones directement exploitable pour le dénombrement des actifs impactés par chacune des simulations de l'aléa.

Portefeuille de données de débit en relation avec le niveau d'eau: Au moment de l'étude, le déploiement de la méthode ne s'était concentré que sur le chenal principal de la Chaudière. En l'absence de données nécessaires, il n'a pas été possible de produire les couches de submersion avec changements climatiques sur le reste du territoire.

Dans le cadre du projet MSP, 21 simulations hydrauliques en conditions de débits différentes, issues des simulations Hydrotel (Atlas hydroclimatique du Québec méridional; MELCC, 2018) ont été produites.

Quatre simulations viennent des périodes de récurrences (2 ans, 20 ans, 100 ans et 350 ans) et 17 correspondent différentes proportions de chacune de ces récurrences. Pour utilisation dans le cadre du présent projet, 11 simulations supplémentaires permettant de couvrir 10 valeurs de débits pour des récurrences inférieures à 2 ans et 1 pour une période de récurrence supérieure à 350 ans ont été fournies par l'Université de Concordia. Ceci a été nécessaire du fait des différences de débits fournies pour des mêmes récurrences par le modèle Hydrotel et le modèle SWAT.

En suivant la méthodologie précisée dans le rapport d'étude de l'Université de Concordia, les conditions aux limites ont été imposées au lac Mégantic, avant et après la confluence avec la rivière du Loup et la confluence avec le Fleuve Saint Laurent. Le calcul des écoulements 1D a été assuré en régime permanent au sein d'un réseau de sections transversales rectangulaires; les écoulements 2D ont été déduits des informations lidar sur la plaine inondable.

Finalement, les couches de débit et d'altitude produite selon la méthode hydraulique inverse ont été subdivisées par secteur de production de prédictions hydroclimatiques de l'atlas. Au total, 66 secteurs fragmentent le chenal principal de la rivière Chaudière. Les traitements géomatiques pour la production de nouvelles cartes de submersion ont été effectués pour la majorité de ces secteurs.

Avantages et inconvénients

Les avantages de la méthode sont multiples. Principalement, elle permet d'éviter l'utilisation de données bathymétriques, normalement nécessaires en modélisation hydraulique 1D/2D pour caractériser la section d'écoulement du lit mineur (lit traversé par le débit plein bord; estimé à une récurrence 2 ans). Suivant la méthodologie développée, il est possible d'estimer l'altitude du lit virtuel calculé par la méthode inverse hydraulique (Choné et coll., 2020). Pour produire ces modélisations, les données lidar échantillonnées à 10 mètres ont été employées, auxquelles une altitude lissée du niveau de l'eau (deux méthodes pour les cours d'eau dont la largeur est inférieure ou supérieure à la résolution du MNT) a été attribuée et complétées par les données de débit transitant par les chenaux au moment de la prise de point lidar. Les données débitmétriques, en tout point du chenal principal de la Chaudière, ont été attribuées proportionnellement à l'aire drainée (débit spécifique) à l'aide des informations fournies ponctuellement par l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional (2018).

L'ensemble de ces informations, couplées à celles sur les coefficients de Manning en plaine (*Couverture du sol du Canada, 2000* et Chow, 1959) et dans les chenaux (paramétrés comme constante à 0,03), ont été utilisées pour faire tourner le modèle hydraulique 1D/2D pour les 21 scénarios identifiés. L'utilisation d'un coefficient constant pour le chenal central est l'un des autres avantages majeurs de la méthode utilisée, évitant de nombreuses itérations et du temps de calcul. Le modèle a été fragmenté en 18 zones afin de fluidifier et réduire le temps de calcul. Les conditions

aux limites ont été imposées par les données débitmétriques des simulations hydrologiques, le lac Mégantic ou encore la confluence avec le Fleuve Saint Laurent. Dans le cadre de l'InfoCrue, les vitesses d'écoulement dans la plaine inondable ont aussi pu être estimées.

Plusieurs éléments peuvent être générateurs d'incertitudes dans cette méthode. Par exemple, au moment de l'estimation de la largeur des cours d'eau et de la modification du lidar préalable à la modélisation, la pondération de la métrique sur par secteur (polygones de Thiessen) peut entraîner une mauvaise estimation de ce paramètre. De la même manière, la technique inverse hydraulique par itérations pour estimation de la profondeur du lit n'est pas fonctionnelle aux zones de refoulement où le nombre de Froude est supérieur à 0,3. Dans ces simulations, une approche empirique a dû être déployée. On notera que cette erreur aura aussi servi d'argumentaire pour considérer la linéarisation des relations hauteur, débit comme raisonnable; une seule valeur d'altitude correspond ainsi à un débit.

Les informations sur l'altitude correspondant aux 21 simulations produites par l'Université de Concordia sur la Chaudière ont été comparées aux informations lidar afin d'en extraire les informations sur la submersion. Dans la plaine inondable. Ce travail a nécessité un second échantillonnage pour faire correspondre les résolutions des deux couches matricielles (résolution moindre à celle du raster). Les couches résultantes ont ensuite été nettoyées en supprimant les îlots isolés et les dépressions non remplies dont la surface dépassait un seuil de 500 mètres, puisque l'utilisation d'une méthode similaire aux allocations euclidiennes a dû être mise en œuvre pour faire correspondre l'altitude des limites des zones submergées avec celles du lidar.

2.3 Résultats

La calibration et la simulation de scénarios extrêmes, soit la suppression par catégorie puis de tous les milieux humides sur certains les sous-bassins (Beaurivage et Famine) a permis de mettre en avant le rôle extrêmement important que jouent les milieux humides (31% à 42% des valeurs de débits de récurrence 2 ans sont impactés par ceuxci et 33% à 53% des valeurs de débits de récurrence 100 ans).

Une majorité de l'augmentation des débits de pointe issus de la destruction de l'ensemble des milieux humides s'explique par le rôle des milieux humides riverains. La relation entre variation de débits et de récurrence suivant la destruction de ces milieux dépendra cependant de leur emplacement, des superficies considérées, mais aussi des caractéristiques du sous-bassin versant lui-même (physiographie, la géologie, couverture végétale, etc.). La destruction des milieux humides isolés induit une augmentation des débits extrêmes correspondant à leur capacité de stockage pour un débit de récurrence important. Par exemple, pour une récurrence de 2 ans, environ 7% sont induites par cette destruction, soit à faible volume ruisselé. Leur rôle sera ainsi plus important que pour un débit de faible récurrence, par exemple, pour une récurrence de 100 ans, où environ 5% sont induites par cette destruction, soit à

fort volume de ruissellement. Plus de détails sur le rôle des milieux humides dans la régulation des écoulements saisonniers sont fournis dans le rapport (Leconte et Bizhanimanzar, 2020, pages 43 à 46).

Un autre paramètre important étudié dans le cadre de ces scénarisations préalables aura été celui de la localisation des milieux humides vis-à-vis de l'exutoire des bassins versants. Les relations mises en évidence sont complexes, mais cohérentes vis-à-vis de la littérature. Ainsi la création d'une unité de milieu humide isolé aura plus d'impact sur la réduction du débit de pointe que celle d'un milieu humide connecté, d'autant plus si elle est créée en aval hydraulique des sous bassins versants de tête, avant les secteurs vulnérables. Les milieux humides connectés voient une efficacité croissante sur la réduction du débit à mesure qu'ils sont placés sur un cours d'eau d'ordre inférieur (chenal principal).

Références

MELCC - MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA LUTTE CONTRE LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES (2018) ATLAS HYDROCLIMATIQUE DU QUÉBEC MÉRIDIONAL. HTTPS://www.cehq.gouv.qc.ca/atlas-hydroclimatique/

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.

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.

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

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. 74.

HTTPS://COBARIC.QC.CA/WP-

CONTENT/UPLOADS/2021/02/RAPPORT_DE_PROJET_MODELISATION_USHERBROOKE_COBARIC.pdf

ANNEXE E – COMPLÉMENTS AU CHAPITRE 4: ANALYSE DE RISQUE

Tableau E.1 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 col, Atlas de vulnérabilité

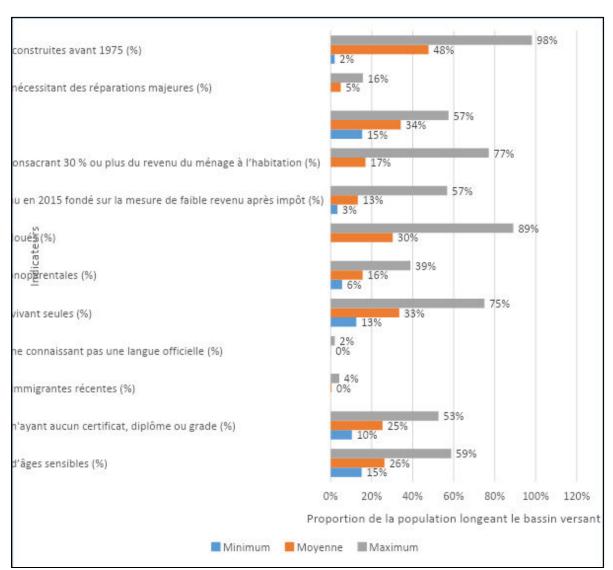


Figure E.2 Valeurs minimale, moyenne et maximale des indicateurs de sensibilité pour les communautés bordant la rivière Chaudière

SOURCE : BARRETTE ET COL, ATLAS DE VULNÉRABILITÉ



Source : Barrette et coll., Atlas de vulnérabilité

ANNEXE F – COMPLÉMENTS AU CHAPITRE 5: SCÉNARIOS D'ADAPTATION

Tableau F.1 Matrice d'impacts anticipés par mesure d'adaptation et par poste d'impact, par rapport au scénario de référence (SQ)

	DIG	IMMb	RELOC	МНН	BR	CORR	CULT
Coût de la mesure							
Conception et réalisation							
Entretien							
Coûts d'opportunité							
Coûts liés à la submersion							
Gestion des urgences							
Nettoyage des débris résidentiels							
Intervention d'urgence							
(enlèvement d'embâcles et voirie,							
surveillance)							
Nettoyage des débris en champs							
Évacuation							
Relocalisation							
Soutien aux sinistrés (centre							
d'aide)							
Secteur résidentiel							
Dommages aux bâtiments							
Secteur agricole							
Dommages aux cultures							
Secteur commercial et industriel							
Dommages aux bâtiments							
Perte de stock							
Perte de journées de production							
Pertes de vente							
Pertes de revenus locatifs							
Pertes d'achalandage							
récréotouristique							
Secteur public							
Dommages aux infrastructures							
Secteur du transport							
Dommages aux infrastructures							
Incidence économique de la							
fermeture de routes/ chemin de							
fer							
Incidence économique des							
ralentissements routiers							

	DIG	IMMb	RELOC	МНН	BR	CORR	CULT
Psychosociaux							
Stress et détresse							
Blessures et décès							
Dépenses et soins							
supplémentaires							
Pertes de salaires							
Coûts liés à l'érosion des berges							
Secteur résidentiel							
Pertes de terrain résidentiel							
Secteur agricole							
Pertes de terres agricoles							
Coûts liés à l'avulsion							
Actifs résidentiels							
Actifs agricoles							
Autres actifs							
<u>Avantages connexes</u>							
Services écosystémiques :							
Habitats fauniques							
Qualité de l'eau – Nutriments (N,							
P)							
Qualité de l'eau – Sédiments							
Séquestration du carbone							
Usages publics des espaces							
naturels:							
Activités récréotouristiques							

Légende

Digues
Immunisation individuelle des bâtiments
Relocalisations des propriétés résidentielles et commerciales
Milieux humides
Bandes riveraines
Corridor inondable (avec ou sans démantèlement)
Restrictions des cultures permises dans la zone inondable

1. Procédure de changement d'utilisation du sol pour le scénario MHH-acc

Compte tenu des erreurs inhérentes à la couche des milieux humides potentiels (souvent surestimés), il est convenu qu'une différence entre gain et pertes inférieure à 1% de la surface totale des MHH du bassin versant sera valide et équivalente à une absence de perte nette.

Ce scénario est issu d'un processus de traduction et de transposition des informations produites par les aménagistes lors de l'atelier de l'ACP. Il a été complété par deux rencontres individuelles avec la MRC de Lévis et la MRC du Granit. Ainsi, il a dans un premier temps été nécessaire de reporter à la résolution du projet géomatique les informations de localisation produites lors des ateliers de cartographie participative. Ce premier jet d'information aura permis de localiser les espaces où des modifications aux MHH existants devront être apportées.

En ce qui concerne la destruction des milieux humides, la superposition des informations précédemment produites (MHH pour destruction) ainsi que celles des plans d'urbanisme retenus aura permis d'extraire les entités de milieux existants destinés à être détruits en accord avec les considérations et besoins de développement des municipalités. Ces milieux humides détruits sont, sur la portion de la MRC/municipalités, identiques à ceux du statu quo.

Du point de vue de la création des milieux humides, un prétraitement a dû être effectué à l'aide de la fonction Topographic Wetness Index de la boite à outil SAGA, employée dans le logiciel Quantum SIG (logiciel libre de droits). La donnée d'entrée (MNT 30m), après remplissage, a ainsi été transposée en un indice d'humidité considéré comme représentatif de la prédisposition des espaces (généralement riverains aux cours d'eau et aux lacs) à l'existence de milieux humides ou à leur création. Une comparaison des résultats de TWI obtenus sur le bassin versant avec la couche des MHH potentiels a montré une corrélation raisonnablement bonne pour considérer le TWI comme un bon indicateur de la prédisposition physiographique du territoire à recevoir des MHH. La couche des MHH a ainsi été découpée avec celles des polygones de création fournie par les aménagistes afin de précisément tracer les contours de milieux humides à créer.

172

⁴ https://www.qgis.org/fr/site/

2. Procédure de changement d'utilisation du sol pour le scénario MHH-eff

La complexité inhérente au MHH-eff est celle de son arrimage avec les outils de modélisation hydrologique et donc des choix de modification de la typologie d'utilisation du territoire. En outre ces choix ont dû être effectués de manière à correspondre au mieux à ce qui pourrait être concrètement mis en œuvre sur le territoire et à représenter au mieux les modifications dans les transferts et bilans hydrologiques ayant réellement lieu lors de la mise en place de ces mesures. Les arbitrages retenus pour les conversions entre les catégories d'utilisation du territoire sont présentés au Tableau.

Il a été convenu que l'application de la mesure « bandes riveraines » devait être raisonnable pour envisager une mise en place à l'échelle du bassin versant. Ainsi, des bandes riveraines de 15 mètres sur l'ensemble des cours d'eau permanents et intermédiaires ainsi que sur les plans d'eau ont été retenues comme la première composante du scénario MHH-EFF.

En ce qui concerne l'application de la mesure de « corridor inondable », faute de plus de détails dans la typologie des milieux humides et de plus de flexibilité dans l'attribution des propriétés de ceux-ci, des hypothèses fortes ont été retenues pour la conversion du territoire riverain en milieux humides et devront être considérées dans l'interprétation des résultats et les réflexions quant à la mise en place de la mesure.

Afin d'effectuer la modification dans la couche d'utilisation du sol originale, il a d'abord été question de définir les choix à effectuer dans les transpositions en fonction de l'utilisation du sol et de la mesure considérée. Ceci revient à se poser les questions suivantes : vers quelle utilisation du sol pouvons-nous raisonnablement nous diriger si nous envisageons la mise en place de la mesure? L'effet supposé de ces modifications sur les résultats de la modélisation hydrologique en découlant seront-il réalistes?

Plusieurs discussions ont été tenues avec le ROBVQ et le COBARIC afin de confirmer les choix. Le tableau 45, fournit la correspondance utilisée pour chaque mesure et chaque utilisation du territoire d'origine et, en ce qui concerne la mesure du corridor inondable, en fonction de la prédisposition du territoire physique à l'existence de milieux humides. On notera que ce sont systématiquement les utilisations « arbustaie » et « fourrage » qui ont été retenues. Ceci s'explique par leur bonne propriété hydrologique, la nature des bandes riveraines généralement observables en territoire agricole (arbustes plutôt que forêt dense, valide aussi pour les friches dans la catégorie « autre ») et pour les territoires agricoles dans le corridor inondable, la volonté de maintien de cette vocation pour un usage plus résilient et aux propriétés hydrologiques plus conservatrices (infiltration et augmentation du temps de concentration). Le tableau 9 représente les variations d'utilisation du territoire par

catégorie de modélisation. Le lecteur souhaitant davantage de précision peut se référer aux tableaux Tableau 46 à Tableau 49.

La mesure « corridor inondable » s'entend sur une zone issue de la jonction de la couche des Zones d'intervention spéciales (ZIS). Cette couche a été croisée avec la couche des TWI de manière à effectuer une distinction entre les espaces propices à la création de MHH dans le corridor inondable et ceux moins disposés. La transposition dans les catégories d'utilisation du territoire a ensuite été appliquée en accord avec le tableau 45. Ceci suppose que toutes les entités d'utilisation du territoire ne rentrant pas dans les catégories listées dans la colonne « typologie initiale » ont été conservées telles quelles. Ce commentaire est aussi valide, dans le cas d'un mauvais TWI, pour l'utilisation « fourrage ».

La mesure « bandes riveraines » exploite une couche de zone tampon de 15m sur chaque rive du réseau linéaire (permanent et intermittent) et surfacique de la GRHQ comme donnée de base. Cette couche d'origine a été différenciée avec celle du corridor inondable pour ne conserver que les bandes riveraines hors de ce dernier. Les bandes riveraines croisant des territoires agricoles, anthropiques ou appartenant à la catégorie « autres » ont ensuite été distinguées de manière à être converties en arbustaies comme présentées dans le tableau 2. On notera que lorsque les bandes riveraines croisaient une infrastructure routière ou ferroviaire, l'utilisation du sol n'a pas été modifiée en considérant que ces infrastructures ne seraient pas modifiées par la mise en place de cette mesure. Le tableau 7 rapporte la distribution, par MRC, des bandes riveraines.

Tableau F.1 Choix de modification d'utilisation du territoire pour chaque mesure du scénario MHH-EFF

Out for and a		Typologie pour	Typologie pour mesure « corridor inondable »			
Catégorie	Typologie initiale	mesure « bandes riveraines »	Bon TWI	Mauvais TWI		
Anthropique	Routes et communications	Anthropique	Arbustaie	Arbustaie		
	Commercial	Arbustaie	Arbustaie	Arbustaie		
	Agriculture indifférenciée	Arbustaie	Milieu humide	Fourrage		
	Autre culture	Arbustaie	Milieu humide	Fourrage		
Agricole	Culture à grand interligne	Arbustaie	Milieu humide	Fourrage		
	Culture à interligne étroit	Arbustaie	Milieu humide	Fourrage		
	Fourrage	Arbustaie	Milieu humide	Fourrage		
	Coupe et régénération	Arbustaie	Arbustaie	Arbustaie		
Autre	Sol dénudé	Arbustaie	Arbustaie	Arbustaie		
	Non classifié	Arbustaie	Arbustaie	Arbustaie		

Tableau F.2 Synthèse des <u>surfaces anthropiques</u> pour chaque scénario d'utilisation du territoire par secteur de modélisation

	SQ	мнн-асс		MHH-EFF		
	Surface s (KM2)	Surface (km2)	Variations par rapport à SQ (%)	Surrace	Variations par rapport à SQ (%)	
Basse	135,707	135,986	0,21%	122,754	-9,54%	
Beaurivage	20,111	20,3	0,94%	18,719	-6,92%	
Famine	22,36	22,441	0,36%	21,51	-3,80%	
Haute	16,684	16,894	1,26%	15,839	-5,06%	
Moyen	42,28	42,208	-0,17%	40,375	-4,51%	
BV total	237,143	237,829	0,29%	219,199	-7,57%	

Tableau F.3 Synthèse des <u>surfaces agricoles</u> pour chaque scénario d'utilisation du territoire, par sous-catégorie et par secteur de modélisation

		SQ	мнн-асс		MHH-EFF	
		Surfaces (KM2)	Surface (km2)	Variations par rapport à SQ (%)	Surface (km2)	Variations par rapport à SQ (%)
Agriculture indifférenciée	Basse	257,341	256,706	-0,25%	237,159	-7,84%
Autre culture	Basse	0,406	0,397	-2,22%	0,378	-6,90%
Culture à interligne étroit	Basse	47,624	47,573	-0,11%	44,029	-7,55%
Culture à grand interligne	Basse	79,511	79,271	-0,30%	73,507	-7,55%
Fourrage	Basse	326,953	326,295	-0,20%	308,528	-5,64%
Agriculture indifférenciée	Beaurivag e	61,914	63,146	1,99%	56,442	-8,84%
Autre culture	Beaurivag e	0,388	0,388	0,00%	0,351	-9,54%
Culture à grand interligne	Beaurivag e	76,282	76,255	-0,04%	69,015	-9,53%
Culture à interligne étroit	Beaurivag e	21,716	21,716	0,00%	20,079	-7,54%
Fourrage	Beaurivag e	94,204	94,119	-0,09%	90,306	-4,14%
Agriculture indifférenciée	Famine	24,356	24,356	0,00%	23,37	-4,05%
Culture à grand interligne	Famine	1,658	1,658	0,00%	1,575	-5,01%
Culture à interligne étroit	Famine	2,627	2,627	0,00%	2,617	-0,38%

		SQ	MHH-ACC		MHH-EFF	
		Surfaces (KM2)	Surface (km2)	Variations par rapport à SQ (%)	Surface (km2)	Variations par rapport à SQ (%)
Fourrage	Famine	34,856	34,856	0,00%	34,119	-2,11%
Agriculture indifférenciée	Haute	11,477	11,143	-2,91%	10,713	-6,66%
Culture à grand interligne	Haute	0,009	0,009	0,00%	0,008	-11,11%
Culture à interligne étroit	Haute	0,619	0,582	-5,98%	0,537	-13,25%
Fourrage	Haute	8,794	8,45	-3,91%	7,881	-10,38%
Agriculture indifférenciée	Moyen	86,411	86,384	-0,03%	82,948	-4,01%
Autre culture	Moyen	0,104	0,104	0,00%	0,104	0,00%
Culture à grand interligne	Moyen	12,695	12,695	0,00%	12,255	-3,47%
Culture à interligne étroit	Moyen	14,628	14,584	-0,30%	14,004	-4,27%
Fourrage	Moyen	140,283	140,263	-0,01%	136,746	-2,52%
BV total		1304,859	1303,58	-0,10%	1226,67	-5,99%

Tableau F.4 Synthèse des <u>surfaces forestières</u> pour chaque scénario d'utilisation du territoire, par sous-catégorie et par secteur de modélisation

		SQ	MHH-ACC		MHH-EFF	
				Variations		Variations
		Surfaces	Surface (km2)	par rapport	Surface (km2)	par rapport
		(KM2)		à SQ (%)		à SQ (%)
Arbustaie	Basse	91,144	90,948	-0,22%	128,1	40,55%
Forêt de conifères	Basse	321,555	321,333	-0,07%	321,555	0,00%
Forêt de feuillus	Basse	273,71	273,561	-0,05%	273,71	0,00%
Forêt mixte	Basse	411,435	411,131	-0,07%	411,435	0,00%
Arbustaie	Beaurivage	13,613	13,597	-0,12%	31,107	128,51%
Forêt de conifères	Beaurivage	40,057	40,057	0,00%	40,057	0,00%
Forêt de feuillus	Beaurivage	71,011	70,979	-0,05%	71,011	0,00%
Forêt mixte	Beaurivage	95,672	95,503	-0,18%	95,672	0,00%
Arbustaie	Famine	48,301	48,301	0,00%	51,404	6,42%
Forêt de conifères	Famine	85,943	85,943	0,00%	85,943	0,00%
Forêt de feuillus	Famine	111,523	111,523	0,00%	111,523	0,00%
Forêt mixte	Famine	203,75	203,75	0,00%	203,75	0,00%
Arbustaie	Haute	14,778	14,751	-0,18%	16,701	13,01%
Forêt de conifères	Haute	77,823	77,724	-0,13%	77,823	0,00%
Forêt de feuillus	Haute	251,571	251,521	-0,02%	251,571	0,00%
Forêt mixte	Haute	268,678	268,521	-0,06%	268,678	0,00%
Arbustaie	Moyen	106,515	106,5	-0,01%	116,566	9,44%
Forêt de conifères	Moyen	245,772	245,67	-0,04%	245,772	0,00%
Forêt de feuillus	Moyen	410,282	410,249	-0,01%	410,282	0,00%
Forêt mixte	Moyen	836,066	835,8	-0,03%	836,066	0,00%
BV total		3979,199	3977,363	-0,05%	4048,728	1,75%

Tableau F.5 Synthèse des <u>autres sous catégories de surfaces</u> pour chaque scénario d'utilisation du territoire secteur de modélisation

		SQ	MHH-ACC		MHH-EFF	
		Surfaces (KM2)	Surface (km2)	Variations par rapport à SQ (%)	Surface (km2)	Variations par rapport à SQ (%)
Coupe et régénération	Basse	30,662	30,623	-0,13%	29,414	-4,07%
Non classifié	Basse	0,003	0,003	0,00%	N/A	
Sol dénudé	Basse	0,31	0,426	37,42%	0,195	-37,10%
Coupe et régénération	Beaurivage	10,811	10,803	-0,07%	10,352	-4,25%
Non classifié	Beaurivage	0,001	0,001	0,00%	N/A	
Sol dénudé	Beaurivage	0,006	0,006	0,00%	0,005	-16,67%
Coupe et régénération	Famine	32,349	32,349	0,00%	31,335	-3,13%
Non classifié	Famine	0,036	0,036	0,00%	0,034	-5,56%
Sol dénudé	Famine	0,077	0,077	0,00%	0,066	-14,29%
Coupe et régénération	Haute	17,497	17,497	0,00%	17,098	-2,28%
Non classifié	Haute	0,002	0,002	0,00%	0,001	-50,00%
Sol dénudé	Haute	0,839	0,839	0,00%	0,833	-0,72%
Coupe et régénération	Moyen	83,803	83,802	0,00%	82,471	-1,59%
Non classifié	Moyen	0,057	0,057	0,00%	0,045	-21,05%
Sol dénudé	Moyen	0,11	0,11	0,00%	0,033	-70,00%
BV total		176,561	176,63	0,04%	171,882	-2,65%

Annexe G – Méthodes de monétisation, hypothèses de base et données pour chaque secteur

1. Secteur agricole

1.1 Dommage aux cultures

- Méthode de quantification : prix de marché
- Hypothèse de base: la perte de rendement des cultures varie en fonction du mois d'occurrence de l'inondation et de la superficie inondée par type de culture, laquelle engendre une perte de revenus comptabilisée par la marge sur coûts variables des cultures inondées (\$/ha).
 - o Probabilité d'inondation (Leconte et Bizhanimanzar, 2020) :

Tableau G.1 Probabilité d'inondation mensuelle par horizons temporels

Tableau C.1 Propabilite d'inoridation mensuelle pai norizons temporeis													
Secteur b	asse Cha	udière	;										
Horizon	RCP	Jan.	Fév.	Mar	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Aou t	Sep.	Oct.	Nov	Déc
Réf.	4.5	0%	0%	0%	8%	68%	15%	1%	2%	2%	3%	3%	0%
Réf.	8.5	0%	0%	0%	4%	75%	12%	2%	1%	1%	4%	1%	0%
H1	4.5	0%	1%	0%	11%	68%	8%	3%	3%	1%	3%	2%	1%
H1	8.5	0%	0%	1%	8%	69%	4%	1%	2%	5%	3%	3%	3%
H2	4.5	0%	0%	0%	18%	61%	8%	3%	3%	2%	2%	0%	3%
H2	8.5	0%	1%	1%	17%	58%	3%	1%	4%	4%	3%	3%	6%
Secteurr	noyenne	Chauc	lière										
Horizon	RCP	Jan.	Fév.	Mar	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Aou t	Sep.	Oct.	Nov	Déc
Réf.	4.5	0%	0%	0%	6%	53%	16%	3%	6%	6%	6%	4%	1%
Réf.	8.5	0%	0%	0%	3%	63%	16%	3%	2%	5%	4%	2%	1%
H1	4.5	0%	2%	0%	6%	58%	9%	5%	3%	3%	8%	6%	0%
H1	8.5	0%	0%	1%	8%	60%	3%	4%	6%	6%	6%	3%	4%
H2	4.5	0%	0%	1%	12%	54%	8%	6%	3%	4%	6%	3%	3%
H2	8.5	0%	1%	1%	12%	53%	4%	4%	7%	7%	5%	3%	4%

o Perte de rendement (Penning-Rowsell, 2013, adapté par le CLS) :

Tableau G.2 Perte de rendement mensuelle due aux inondations

Cultures	Jan.	Fév.	Mar	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Aout	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
Céréales	0 %	0 %	0 %	30 %	55 %	80 %	100 %	100 %	50 %	0 %	0 %	0 %
Foin	0 %	0 %	0 %	10 %	55 %	40 %	6%	4 %	0 %	0 %	0 %	0 %
Pâturag e	0 %	0 %	0 %	9 %	7 %	5 %	5%	4 %	0 %	0 %	0 %	0 %

o Modèle de rotation des cultures inondées (FADQ, 2019, adapté par le CLS) :

Tableau G.3 Modèle de rotation des cultures

Modèle de	Proportion	Proportion des cultures en rotation									
rotation	Maïs- grain	Maïs fourrager	Soya	Blé	Avoine	Foin	Pâturage				
Rotation type- Moyenne Chaudière	-	13 %	13 %	-	13 %	60 %	-				
Rotation type- Basse Chaudière	13 %	6%	20 %	10 %	6%	45 %	-				
Production intensive	67 %	-	33 %	-	-	-	-				
Pâturage	-	-	-	-	-	-	100 %				

Données:

- o Superficie en culture par modèle de rotation (FADQ, 2019)
- o Marge sur coûts variables (Budget à l'hectare du CRAAQ) :

Tableau G.4 Marge sur coûts variables par type de cultures

	Maïs- grain	Maïs fourrager	Soya	Blé	Avoine	Foin	Pâturage
Marge sur coûts variables (\$/ha)	717	1000	599	445	311	329	391
Source	(CRAAQ, 2019a)	(CRAAQ, 2018a)	(CRAAQ, 2019b)	(CRAAQ, 2019c)	(CRAAQ, 2018c)	(CRAAQ, 2018b)	(CRAAQ, 2018c)

• Résultats: Perte de rendement annuelle pondérée par mois d'inondation (\$/ha)

Tableau G.5 Perte de rendement annuelle par secteur hydrographique, modèle de rotation et horizon temporel (\$/ha)

	Modèle de	Référenc	е	H1		H2	
Secteur	rotation	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
Moyenn	Rotation type						
e Chaudiè	Production intensive						
re	Pâturage						
	Rotation type						
Basse Chaudiè re	Production intensive						
	Pâturage						

1.3 Coût de nettoyage de débris en champs

- Méthode de quantification : prix de marché et enquête terrain
- Hypothèse de base: le coût de nettoyage des débris en champs varie en fonction du mois d'occurrence de l'inondation et la superficie inondée par type de culture.
 - o Probabilité d'inondation mensuelle (Tableau 36)
 - o Superficie agricole à nettoyer (Tableau 37 x superficies inondées)
 - o Modèle de rotation des cultures inondées (Tableau 38)
 - Salaire horaire: 15 \$/ h (enquête, validation CLS)
 - o Nombre d'heures de travail par superficie inondée (validation en CLS) :

Tableau G.6 Nombre d'heures de travail mensuel par hectare inondé pour les évènements d'inondation de moins de 10 % de probabilité

Cultures	Jan.	Fév.	Mar	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Aou	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
Céréales *	Céréales *											
Travail manuel (h/ha)	0	0	10	10	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	0	0
Travail machine rie (h/ha)	0	0	10	10	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	0	0
Foin et pâ	turage	*										
Travail manuel (h/ha)	0	0	20	20	15	15	15	15	15	15	0	0
Travail machine rie (h/ha)	0	0	5	5	3,75	3,75	3,75	3,75	3,75	3,75	0	0

^{*} Pour les évènements d'inondation de probabilité de plus de 10 %, le nombre d'heures est multiplié par un facteur de 10 pour le nettoyage des cultures en zone inondable 0-2 ans.

• Données:

- o Superficie en culture par modèle de rotation (FADQ, 2019)
- o Coût d'utilisation de la machinerie: 30,69 \$/ h (CRAAQ, 2014)

2. Secteur commercial et industriel

2.1 Coûts des dommages aux bâtiments par la submersion

- Méthode de quantification : Courbes de profondeur d'eau-dommages
- Hypothèses de base : la valeur monétaire des dommages subis à la structure des bâtiments et leurs contenus varie en fonction de la profondeur d'eau atteinte à l'intérieur du bâtiment.
 - La valeur monétaire des dommages subis à la structure des bâtiments et leurs contenus est exprimée en pourcentage de la valeur foncière du bâtiment, selon le type de bâtiment commercial;
 - o La profondeur d'eau atteinte aux centroïdes d'unités d'évaluation foncière des bâtiments représente adéquatement la profondeur d'eau à l'intérieur du bâtiment.

• Données:

- o Rôle d'unités d'évaluation foncière (MAMH, 2019)
- Courbe de profondeur d'eau-dommages à la structure, selon le type de bâtiments commerciaux (CMI Lac Champlain et Rivière Richelieu, in prep.)
- Courbe de profondeur d'eau-dommages au contenu, selon le type d'inventaire commercial (CMI Lac Champlain et Rivière Richelieu, in prep.)

3. Secteur résidentiel

3.1 Dommages aux résidences par la submersion

- Méthode de quantification : Courbes de profondeur d'eau-dommages
- Hypothèses de base : la valeur monétaire des dommages subis à la structure des bâtiments et leurs contenus varie en fonction de la profondeur d'eau atteinte à l'intérieur du bâtiment.
 - La valeur monétaire des dommages subis à la structure des bâtiments et leurs contenus est exprimée en pourcentage de la valeur foncière du bâtiment, selon le nombre d'étage et la finition du sous-sol de la résidence;
 - La profondeur d'eau atteinte aux centroïdes d'unités d'évaluation foncière des bâtiments représente adéquatement la profondeur d'eau à l'intérieur de la résidence.

Données:

- o Rôle d'unités d'évaluation foncière (MAMH, 2019)
- o Courbe de profondeur d'eau-dommages à la structure, selon le nombre d'étages et la finition du sous-sol de la résidence (Bonnifait, 2005)
- o Courbe de profondeur d'eau-dommages au contenu, selon le nombre d'étages et la finition du sous-sol de la résidence (CMI Lac Champlain et Rivière Richelieu, in prep.)

3.2 Dépenses engendrées par les évacuations

- Méthode de quantification : Transfert de valeur
- Hypothèse de base : la durée de l'évacuation d'une résidence varie en fonction de la profondeur d'eau atteinte à l'intérieur du bâtiment, laquelle engendre des dépenses d'hébergement et d'entretien minimal pour les ménages évacués.
 - La valeur monétaire des dépenses engendrées par les évacuations est adéquatement représentée par l'aide financière du ministère de la Sécurité publique du Québec (MSP, 2019).

• Données:

- o Courbe de profondeur d'eau-durée d'évacuation (FEMA, 2009)
- o Programme d'aide financière du MSP (MSP, 2019).

4. Secteur psychosocial

4.1 Dépenses et pertes chez les sinistrés

- Méthode de quantification : Transfert de valeur
- Hypothèse de base: la prévalence supplémentaire de certains troubles de santé physique et psychologique chez les adultes exposés aux inondations engendre une perte de productivité, une perte de qualité de vie, des dépenses complémentaires ainsi que des dépenses en soins de santé supplémentaires.
 - La profondeur d'eau positive aux centroïdes d'unités d'évaluation foncière des bâtiments résidentiels représente adéquatement l'exposition aux inondations des ménages;
 - o 1,56 adultes par ménage (Statistiques Canada, 2016);
 - Estimation des coûts monétaires espérés par ménage inondé (CMI Lac Champlain et Rivière Richelieu, in prep.):

Tableau G.7 Valeur monétaire espérées 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, médications, etc.)	369 \$
Perte de productivité (Temps rémunéré)	6 036 \$
Qualité de vie	9 881 \$
Total	16 434 \$

• Données:

o Rôle d'unités d'évaluation foncière (MAMH, 2019)

5. Secteur municipal

5.1 Dépenses en gestion des urgences

- Méthode de quantification : Transfert de valeur
- Hypothèse de base : 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 coût de gestion des urgences est estimé à partir d'un multiplicateur de 10,70 % sur les dommages économiques aux propriétés (Penning-Rowsell, 2013);
 - Les dommages économiques aux propriétés sont adéquatement représentés par les dommages structurels aux résidences.

Données:

o Dommage structurels aux résidences (voir Secteur résidentiel - Dommages aux résidences par la submersion)

5.2 Dépenses en nettoyage des débris

- Méthode de quantification : Transfert de valeur
- Hypothèse de base: l'inondation de bâtiments résidentiels entraîne des dépenses municipales supplémentaires de nettoyage des débris dans la phase post-sinistre, selon le volume de débris généré.
 - o Volume de débris : 21 à 36 m² (superficie du bâtiment) (CMI Lac Champlain et Rivière Richelieu, in prep.)
 - o Coût de nettoyage des débris : 14,37 \$/m² (CMI Lac Champlain et Rivière Richelieu, in prep.)

• Données:

 Dommages structurels aux résidences (voir Secteur résidentiel -Dommages aux résidences par la submersion)

6. Secteur économique

6.1 Coûts des dommages aux bâtiments institutionnels par la submersion

- Méthode de quantification : Courbes de profondeur d'eau-dommages
- Hypothèses de base : la valeur monétaire des dommages subis à la structure des bâtiments institutionnels et leurs contenus varie en fonction de la profondeur d'eau atteinte à l'intérieur du bâtiment.
 - o En l'absence de courbes de profondeur d'eau-dommages à la structure des bâtiments institutionnels, la valeur monétaire *minimale* de ces dommages peut être estimée à partir de la courbe de profondeur d'eau-dommages des résidences à un étage, sans sous-sol;
 - La valeur monétaire des dommages subis à la structure des bâtiments et leurs contenus est exprimée en pourcentage de la valeur foncière du bâtiment, selon le type de bâtiment institutionnel;
 - La profondeur d'eau atteinte aux centroïdes d'unités d'évaluation foncière des bâtiments représente adéquatement la profondeur d'eau à l'intérieur du bâtiment.

Données:

- o Rôle d'unités d'évaluation foncière (MAMH, 2019)
- Courbe de profondeur d'eau-dommages à la structure des bâtiments résidentiels (Bonnifait, 2005)
- Courbe de profondeur d'eau-dommages au contenu, selon le type d'inventaire institutionnel (CMI Lac Champlain et Rivière Richelieu, in prep.)

7. Secteur environnemental

7.1 Séquestration du carbone

- Méthode de quantification : Prix de marché
- Hypothèse de base: la valeur économique du service écologique de séquestration du carbone est estimée en multipliant la charge de carbone séquestrée annuellement par la valeur annuelle du coût social du carbone (ECCC, 2016).
 - o Intervalle de temps nécessaire pour atteindre la charge complète de séquestration de carbone des scénarios d'adaptation : 10 ans ;
 - o Valeur du carbone : coût social du carbone (ECCC, 2016).

• Données:

- o Différence nette de stockage du carbone entre le scénario de référence et la carte d'utilisation du sol des scénarios d'adaptation
- o Coût social du carbone (ECCC, 2016) :

Tableau G.8 Coût social du carbone (\$ 2019)

Coût \ Année	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2060*	2070*
Coût social (\$/ tonne CO ₂)	50,5	55,26	60,48	66,14	71,80	77,35	83,01	94,25	105,42

^{*} Extrapolation linéaire des valeurs de 2020 à 2070

7.2 Qualité de l'eau

- Méthode de quantification : Transfert de valeur
- Hypothèse de base: la valeur économique des services écologiques de rétention des nutriments (azote et phosphore) et de sédiments est estimée en multipliant respectivement le flux de rétention annuelle par la valeur de traitement en usine.
 - Les coûts de traitement en usine de l'azote, du phosphore et des sédiments sont adéquatement représentés par les valeurs moyennes rapportées par Olewiler (2016):

Tableau G.9 Coût moyen de traitement des charges biophysiques liés à la qualité de l'eau

C = Ĉ+\	Azote	Phosphore	Sédiments
Coût \ Année	(\$/kg) (\$/kg)		(\$/tonne)
Coût de traitement annuel	5,77	41,52	18,68

• Données:

 Différence nette de charge d'azote, de phosphore et de sédiments entre le scénario de référence et la carte d'utilisation du sol des scénarios d'adaptation

7.3 Biodiversité

- Méthode de quantification : Transfert de valeur
- Hypothèse de base: la valeur économique du service écologique de biodiversité est estimée en multipliant le score de qualité de l'habitat par la valeur de la création d'un acre d'habitat arboré.
 - o La valeur de la création d'un habitat terrestre arboré est adéquatement représentée par la valeur moyenne des bénéfices rapporté par la méta-analyse de Borisova-Kidder (2006), soit 130,32 \$ US (451,30 \$CAD).

• Données:

 Différence nette du score de la qualité de l'habitat entre le scénario de référence et la carte d'utilisation du sol des scénarios d'adaptation

Tableau G.10 Résultats biophysiques des scénario d'adaptation, par rapport au scénario de référence

	Résultats	Nutrin	nents	Sédiments	Biodiversité	Carbone
Scénar ios	hiophysique		Flux d'azote (kg/année)	Flux de sédiment (tonne/an)	Score de qualité de l'habitat	Charge de carbone (tonne)
MHH_Acc	Delta	(131)	(3 845)	(37)	(933)	6 406
WIIII_Acc	Taux de variation	-0,4%	-0,1%	-0,02%	-0,02%	0,02%
MHH_EFF	Delta	(16 049)	(328 486)	(12 044)	90 423	19 634
MIIII_LFF	Taux de variation	-44%	-13%	-6%	2%	0,05%
IMM_c	Delta	0	0	0	0	0
oll	Taux de variation	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %
MHH_acc	Delta	(131)	(3 845)	(37)	(933)	6 406
IMM_ind	Taux de variation	-0,4%	-0,1%	-0,02%	-0,02%	0,02%
MHH_dis +	Delta	(290)	(7 509)	58	(38)	5 196
IMM_ind	Taux de variation	-0,8%	-0,3%	0,03%	0,00%	0,01%





