



Université du Québec
à Rimouski

**TRAJECTOIRES DE LA VULNÉRABILITÉ AUX
INONDATIONS DANS LES BASSINS VERSANTS DES
RIVIÈRES CASCAPÉDIA ET PETITE CASCAPÉDIA À
L'EST DU QUÉBEC**

Mémoire présenté

dans le cadre du programme de maîtrise en géographie
en vue de l'obtention du grade de maître ès sciences (M.Sc.)

PAR

© YAOVI DJIVÉNOU TOMETY

Août 2022

Composition du jury :

Guillaume Marie, président du jury, Université du Québec à Rimouski

Thomas Buffin-Bélanger, directeur de recherche, Université du Québec à Rimouski

Isabelle Thomas, codirectrice de recherche, Université de Montréal

**Karem Chokmani, examinateur externe, Institut National de la Recherche
Scientifique**

Dépôt initial le 14 juin 2022

Dépôt final le 6 août 2022

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI
Service de la bibliothèque

Avertissement

La diffusion de ce mémoire ou de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire « *Autorisation de reproduire et de diffuser un rapport, un mémoire ou une thèse* ». En signant ce formulaire, l'auteur concède à l'Université du Québec à Rimouski une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de son travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, l'auteur autorise l'Université du Québec à Rimouski à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de son travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits moraux ni à ses droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, l'auteur conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont il possède un exemplaire.

*À mes magnifiques et précieux
enfants Ashley, Chris et Noah.*

REMERCIEMENTS

L'accomplissement de mes travaux de recherche au Québec ne saurait aboutir sans votre présence, vos réflexions et vos conseils dans ce parcours sinueux entrepris depuis le Burkina Faso. Ma reconnaissance va bien au-delà des quelques mots qui suivent.

Tout d'abord, je veux remercier mon directeur de recherche, Thomas Buffin-Bélangier. Merci Thomas car tu as cru en moi, tu m'as fait confiance et tu m'as donné une chance pour faire une expérience enrichissante à la fois académique et sociale au Québec qui a agrandi mes horizons. L'attention accordée, l'amour pour la qualité du travail bien fait, le souci du bien-être d'autrui, ta flexibilité et le cœur bienveillant que tu témoignes envers chaque membre du laboratoire me font dire que tu es un chef d'orchestre équilibré avec un art managérial décent qui a forgé une famille scientifique soudée et exemplaire de « fluvial » à l'Université du Québec à Rimouski que tout le monde aimerait bien faire partie : C'est cette image que je retiens de toi. Tu as été un extraordinaire directeur de recherche pour moi qui as su m'apprendre davantage la rigueur scientifique. Merci également de m'avoir entraîné à aimer l'hiver à travers les différentes activités sportives hivernales organisées avec ton fils Louis-Nicolas. Ma pensée va également à Louis-Nicolas qui me faisait de beaux dessins d'accompagnement à chaque fois que je me rendais sur le terrain pour la collecte des données.

À Isabelle Thomas, ma co-directrice de recherche, merci de m'avoir inspiré à travers tes travaux de recherches antérieures et tes points de vue qui ont été la base de l'orientation méthodologique de mon travail de recherche. Tu m'as également orienté vers les ressources documentaires et m'accompagner dans l'application de la rigueur scientifique.

Mes remerciements vont à Guillaume Marie, qui a accepté présider le jury pour l'évaluation de mes travaux de recherche.

Je remercie Karem Chokmani, d'avoir accepté être dans le jury d'évaluation de mon travail en tant qu'évaluateur externe.

Mes remerciements vont également à Steeve Hetu, du ministère des affaires municipales et de l'habitation du Québec, pour son appui dans l'orientation de cette étude au regard des attentes du ministère.

Mes remerciements vont aussi à Dany Voyer, aménagiste de la MRC de Bonaventure, pour ses promptes réactions aux multiples sollicitations formulées à son endroit afin de mieux comprendre certains détails relatifs à la MRC de Bonaventure. Tu as été d'un appui considérable pour l'orientation des méthodologies pragmatiques de collecte des données d'enquêtes sur le terrain.

J'adresse un remerciement spécial à tous les membres du laboratoire de géomorphologie et de dynamique fluviale de l'Université du Québec à Rimouski qui m'ont bien accueilli au sein du laboratoire et m'ont accompagné durant tout mon parcours académique et notamment à travers leurs appuis multiformes pour la collecte des données sur le terrain et en documentation.

Merci à ma blonde Nicole Scott, rencontrée pendant mon séjour en Amérique du Nord, qui m'a accompagné moralement pendant mon projet de recherche.

Mes pensées se tournent vers ma famille et mes amis qui, de proche ou de loin, m'ont toujours supporté moralement et de façon inconditionnelle dans mes choix.

Cette recherche a été financée par le ministère des affaires municipales et de l'habitation du Québec, le réseau inondations intersectoriels du Québec et son partenaire fond de recherche du Québec, la MRC de Bonaventure, la fondation de l'université de Québec à Rimouski et l'université du Québec à Rimouski. Je leurs remercie pour les financements octroyés dans l'accomplissement de ce projet de recherche.

RÉSUMÉ

Les inondations dans la MRC de Bonaventure, à l'instar des inondations de 2017 et de 2019 aux Québec, amènent à repenser les politiques de gestion préventive des inondations dans les municipalités mais il est nécessaire de revisiter le passé pour mieux anticiper le futur. A l'heure actuelle, aucune étude dans la MRC de Bonaventure n'a abordé la trajectoire de la vulnérabilité aux inondations. Le projet de recherche avait pour objectif d'évaluer l'évolution spatio-temporelle de la vulnérabilité aux inondations dans la MRC de Bonaventure plus précisément dans les bassins versants des rivières Cascapédia et petite Cascapédia. Cette recherche s'est particulièrement intéressée à : - 1) - identifier les indicateurs de vulnérabilité aux inondations les plus pertinents et leurs interactions et - 2) - comprendre la trajectoire de la vulnérabilité aux inondations dans le temps. La méthode inductive a permis de calculer les indices de vulnérabilité par addition d'indicateurs pondérés dans l'analyse de la trajectoire de la vulnérabilité pour les années 1986, 1996, 2006 et de 2016 à partir de 43 indicateurs sélectionnés, adaptés au contexte de la zone d'étude et validés par la MRC de Bonaventure. L'évaluation de la trajectoire de la vulnérabilité aux inondations révèle que les variables socio-économiques sont les plus importantes contribuant à faire varier la vulnérabilité dans le temps dans les corridors fluviaux des rivières Cascapédia et petite Cascapédia. Cette étude expose le caractère dynamique, temporel et transformationnel de la vulnérabilité. Les cartographies de vulnérabilité générées en maillages de 200 m x 200 m et les enquêtes sur le terrain ont permis de mieux appréhender les changements globaux qui ont contribué à l'évolution de la vulnérabilité aux inondations et de comprendre la nature de la vulnérabilité aux inondations. Cette analyse permettra aux décideurs d'anticiper le futur pour une planification concrète de l'adaptation et des mesures de prévention. La trajectoire de la vulnérabilité se présente alors comme un outil de prévention et de prospection pour les décideurs. Elle permet d'appréhender la vulnérabilité du passé, comprendre la vulnérabilité du présent et anticiper sur la vulnérabilité du futur.

Mots clés : Trajectoire, vulnérabilité, inondation, indice de vulnérabilité, gestion préventive.

ABSTRACT

The floods in the MRC of Bonaventure, like the floods of 2017 and 2019 in Quebec, lead to a rethink of the preventive flood management policies in the municipalities, but it is necessary to revisit the past to better anticipate the future. At present, no study in the MRC of Bonaventure has addressed the trajectory of vulnerability to flooding. The objective of the research project was to assess the spatio-temporal evolution of vulnerability to flooding in the MRC of Bonaventure, more specifically in the watersheds of the Cascapedia and Petite Cascapedia rivers. This research was particularly interested in: - 1) - identifying the most relevant flood vulnerability indicators and their interactions and - 2) - understanding the trajectory of flood vulnerability over time. The index method made it possible to calculate the vulnerability indices by adding weighted indicators in the analysis of the trajectory of vulnerability for the years 1986, 1996, 2006 and 2016 from 43 selected indicators, adapted to the context of the study area and validated by the MRC of Bonaventure. The evaluation of the trajectory of vulnerability to flooding reveals that socio-economic variables are the most important contributing to varying vulnerability over time in the fluvial corridors of the Cascapedia and Petite Cascapedia rivers. This study exposes the dynamic, temporal and transformational character of vulnerability. The vulnerability maps generated in 200 m x 200 m grids and the field surveys have made it possible to better understand the global changes that have contributed to the evolution of vulnerability to floods and to understand the nature of vulnerability to floods. This analysis will allow decision-makers to anticipate the future for concrete planning of adaptation and prevention measures. The trajectory of vulnerability is then presented as a prevention and prospecting tool for decision-makers. It makes it possible to apprehend the vulnerability of the past, to understand the vulnerability of the present and to anticipate the vulnerability of the future.

Keywords: Trajectory, vulnerability, flooding, vulnerability index, preventive management.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	ix
RÉSUMÉ	xi
ABSTRACT.....	xiii
TABLE DES MATIÈRES	xv
LISTE DES TABLEAUX	xvii
LISTE DES FIGURES	xix
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES	xxi
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
CHAPITRE 1 REFLEXION THÉORIQUE SUR LA TRAJECTOIRE DE LA VULNERABILITÉ AUX INONDATIONS	7
1.1 INTRODUCTION	7
1.2 LA VULNERABILITE : UN CONCEPT DOUBLEMENT RELATIF	8
1.3 ÉVALUATION DE LA VULNERABILITE.....	10
1.3.1 La vulnérabilité vue sous l’angle de l’endommagement.....	12
1.3.2 La vulnérabilité vue sous l’angle de facteurs de vulnérabilité	16
1.3.3 Choix d’un courant de pensée pour l’évaluation de la vulnérabilité aux inondations	23
1.4 POURQUOI ETUDIER LA TRAJECTOIRE DE LA VULNERABILITE AUX INONDATIONS ?.....	28
1.5 IMPORTANCE DE LA CARTOGRAPHIE DANS LA TRAJECTOIRE DE LA VULNERABILITE AUX INONDATIONS	33
1.6 CONCLUSION	34
CHAPITRE 2 TRAJECTOIRES DE LA VULÉRABILITÉ AUX INONDATIONS	35
2.1 RESUME EN FRANÇAIS DE L’ARTICLE	35

2.2	INTRODUCTION	37
2.3	SITES A L'ETUDE	40
2.4	METHODES	44
	2.4.1 Évaluation de la vulnérabilité aux inondations.....	44
	2.4.2 Enquête sur le terrain.....	58
2.5	RESULTATS.....	59
	2.5.1 Évolution temporelle de la vulnérabilité globale aux inondations.....	59
	2.5.2 Évolution spatio-temporelle de la vulnérabilité aux inondations	60
	2.5.3 Évolution des indicateurs et des facteurs de la vulnérabilité aux inondations dans le temps.....	62
	2.5.4 Impacts de la réglementation sur les propriétés.....	67
2.6	DISCUSSIONS	68
	2.6.1 Dynamisme de la vulnérabilité dans le temps	68
	2.6.2 Mobilisation des connaissances de la vulnérabilité vers les actions de gouvernance	72
2.7	CONCLUSION.....	78
2.8	REMERCIEMENTS	80
	CONCLUSION GÉNÉRALE.....	81
	ANNEXES	84
	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	125

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 Avantages, intérêts et applications des approches d'analyse de la vulnérabilité dans la trajectoire de vulnérabilité aux inondations.....	27
Tableau 2 Pondération des indicateurs de sensibilité sociale et de la zone par les experts, les gestionnaires et la population	53
Tableau 3 Équation des indices de la vulnérabilité (Eq.6)	56
Tableau 4 Coefficients de variation, pentes et poids moyens des scores des indicateurs et des facteurs de vulnérabilité sur la période de 1986 à 2016	64

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Approches d'évaluation de la vulnérabilité. © Defossez <i>et al.</i> , 2018. Reproduit avec permission.....	10
Figure 2. Approches d'évaluation de la vulnérabilité utiles dans la trajectoire de la vulnérabilité aux inondations.....	11
Figure 3. Trajectoire de vulnérabilité mettant en lumière les axes structurants de la démarche VulneraRE. © Magnan <i>et al.</i> , 2012. Reproduit avec permission.....	32
Figure 4. Les corridors fluviaux des rivières Cascapédia dans la municipalité de Cascapédia Saint-Jules et petite cascapédia dans la ville de New Richmond au Québec	41
Figure 5. Histogramme des débits maximaux annuels journaliers moyens des rivières a) petite Cascapédia de 1962 à 2020 et b) Cascapédia de 1967 à 2020. Les lignes bleues, jaunes, oranges et rouges discontinues représentent les seuils de récurrences.	42
Figure 6. Base conceptuelle de l'évaluation de la vulnérabilité aux inondations.....	46
Figure 7. Indicateurs de vulnérabilité et paramètres de l'aléa retenus pour l'évaluation de la vulnérabilité et de sa trajectoire.....	52
Figure 8. Schéma méthodologique de la reconstitution de la trajectoire de la vulnérabilité	58
Figure 9. Évolution temporelle de l'indice de la vulnérabilité aux inondations dans les corridors fluviaux des rivières petite Cascapédia et Cascapédia dans la MRC de Bonaventure.....	60
Figure 10. Évolution spatio-temporelle de l'indice de la vulnérabilité aux inondations mettant en exergue a) les zones de forte variabilité de la vulnérabilité pour les périodes b) 1986, c) 1996, d) 2006 et e) 2016 dans le corridor fluvial de la rivière petite Cascapédia dans la MRC de Bonaventure.....	61
Figure 11. Évolution spatio-temporelle de l'indice de la vulnérabilité aux inondations mettant en exergue a) les zones de forte variabilité de la vulnérabilité pour les périodes b) 1986, c) 1996, d) 2006 et e) 2016 dans le corridor fluvial de la rivière Cascapédia dans la MRC de Bonaventure.	62

Figure 12. Évolution temporelle des indices des facteurs de vulnérabilité aux inondations dans a) le corridor de la rivière petite Cascapédia et b) corridor de la rivière Cascapédia63

Figure 13. Évolution des scores des indicateurs avec une variabilité importante entre 1986 et 2016 a) dans le corridor fluvial de la rivière petite Cascapédia et b) dans le corridor fluvial de la rivière Cascapédia67

Figure 14. Impact de la localisation géographique des résidences sur la propriété dans le bassin versant de la rivière Cascapédia a) dans les zones inondables vécues b) aux alentours des zones inondables vécues68

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

CV	Coefficient de variation
MAMH	Ministère des Affaires Municipales et de l’Habitation
MRC	Municipalité Régionale de Comté
PPRLPI	Politique de Protection des Rives, du Littoral et des Plaines Inondables
UQAR	Université du Québec à Rimouski

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Contexte

Les risques liés aux inondations sont de plus en plus fréquents dans le monde et particulièrement au Québec (Ministère de la sécurité du Canada, 2013). Les inondations occupent le premier plan au Québec avec plus de 27 % des événements dommageables d'origine naturelle entre 1900 et 2013 (Ministère de la sécurité du Canada, 2013). Les inondations survenues au Québec en 2017 ont mis en cause les systèmes de gestion de ce risque au regard de l'ampleur des dégâts particulièrement lourds : 293 municipalités affectées, plus de 5 300 résidences sous les eaux, plus de 4 000 personnes évacuées et plusieurs infrastructures routières fermées (Ministère de la Sécurité Publique du Québec, 2018). Les dommages occasionnés par les inondations de 2017 seraient estimés à 376,6 millions de dollars canadiens (Communiqué de presse du gouvernement du Québec, 2017) faisant de cet événement le plus marquant de l'histoire du Québec pendant ces quatre dernières décennies. Ces inondations ont exposé les faiblesses des institutions québécoises à anticiper les risques liés aux inondations (Ministère de la Sécurité Publique du Québec, 2018 ; Mayer-Jouanjan & Bleau, 2018) notamment dans sa gestion préventive. Elles soulignent également la grande désuétude des cartographies des zones inondables des années 1970 considérant leur hétérogénéité méthodologique et leur fragmentation spatiale.

Au regard de ces constats, le Ministère des Affaires Municipales et de l'Habitat (MAMH) a initié un projet de la cartographie des zones inondables dans six (6) Municipalités Régionales de Comté (MRC) et deux (02) Communautés Métropolitaines (CM) : MRC de Maskinongé, de Gatineau, de Bonaventure, des Chaudière-Appalaches, de Laurentides et de Coaticook et CM de Montréal et de Québec.

Le projet de la cartographie des aléas fluviaux de cours d'eau de la Municipalité Régionale de Comté de Bonaventure a été confié au laboratoire de géomorphologie et dynamique fluviale de l'Université du Québec à Rimouski. L'un des objectifs de ce projet, dans lequel s'inscrit ce présent travail de recherche, est d'évaluer la vulnérabilité des populations aux inondations dans cette MRC et plus précisément dans les bassins versants des rivières Cascapédia et petite Cascapédia.

Ces bassins versants ont été affectés par les inondations de 2017 mais de moindre ampleur que le reste des bassins versants affectés par les inondations au Québec la même année. Ces bassins versants ont également subi d'autres inondations fluviales ou par embâcles dans le passé notamment en 1994, 2010 et 2011 (MSP, 2019). Ces quelques évènements majeurs énumérés dans la MRC ont contribué à intégrer la MRC de Bonaventure dans le projet de cartographie des aléas fluviaux et des risques associés par le MAMH. Les inondations de décembre 2020, survenues pendant la période des travaux de recherche, rappellent le bien fondé d'inclure la MRC de Bonaventure dans le projet de cartographie des aléas fluviaux et les risques associés.

Problématique

Dans la sphère scientifique, certains auteurs se sont penchés sur la trajectoire de la vulnérabilité des territoires qui subissent des changements globaux majeurs (Baud & Bonnemaïn, 2018; Magnan & Duvat, 2016; Magnan et *al.*, 2012; Tanoue et *al.*, 2016) au cours de ces deux décennies pour appréhender, comprendre son cheminement et les interactions entre les différents indicateurs au fil du temps afin de mieux ajuster durablement les méthodes et approches de gestion des risques liés aux inondations puis anticiper le futur. L'équation généralement consensuelle proposée de la vulnérabilité par les scientifiques se mettant généralement sous la forme :

$$\text{Vulnérabilité} = \text{Exposition} + \text{ou} \times \text{Sensibilité} - \text{ou} \div \text{résilience} \quad (\text{eq. 1})$$

montre que la vulnérabilité est fonction des facteurs de l'exposition, de la sensibilité et de la résilience (De Leon, 2006 ; Birkmann, 2006 ; Smith et Wandel , 2006 ; Balica et Wright,

2010). Ces facteurs mettent en exergue les indicateurs entrant dans l'évaluation de l'exposition et la sensibilité qui aggravent la vulnérabilité tandis que ceux entrant dans l'évaluation de la résilience diminuent la vulnérabilité (Balica et Wright, 2010). Ainsi, l'exposition est définie comme le degré, la durée et /ou l'étendue dans laquelle le système est en contact avec ou subit des perturbations (Adger, 2006). Quant à la sensibilité, elle est décrite comme le potentiel d'un système à être affecté négativement par un aléa causé par un certain degré de fragilité, des faiblesses sociales ou économiques relatives ou des conditions défavorables (Cardona, 2003). Selon Folke *et al.* (2002), la résilience se définit par l'aptitude d'un système à s'auto-organiser, à s'adapter et à apprendre. Il convient d'ajouter à cette définition de la résilience, dans notre contexte d'inondation, l'aptitude à se relever rapidement d'un choc ou d'une catastrophe sans trop subir de perturbation dans le fonctionnement au niveau collectif et individuel dans une localité donnée (Walker *et al.*, 2002). Selon ces définitions, il apparaît que la population, bien qu'elle soit un élément à risque, est également l'élément central dans le processus de réduction du risque lié aux inondations dans son environnement économique, social, environnemental, physique, institutionnel et culturel.

L'identification des indicateurs pertinents est plus que jamais nécessaire pour mieux évaluer la vulnérabilité aux inondations dans une zone donnée en tenant compte de son contexte. De ce fait, le portrait socio-économique des territoires est à connaître afin de bien sélectionner les indicateurs pertinents dans l'évaluation de la vulnérabilité pour analyser son évolution dans le temps. Malgré cette sélection pertinente, il est souvent difficile d'avoir un consensus pour sa quantification (Canon, 2000). Plusieurs méthodes ont été développées pour quantifier la vulnérabilité par l'approche indiciaire des facteurs d'exposition, de sensibilité et d'adaptation au Québec (Thomas *et al.*, 2017 ; Barette *et al.*, 2018 ; Frini *et al.*, 2019 ; Choé *et al.*, 2019). D'autres auteurs ont utilisé cette approche pour évaluer une ou l'ensemble des dimensions sociale, économique, physique et environnementale de la vulnérabilité (Balica & Wright, 2012 ; Fekete, 2009 ; Guillard-Gonçalves *et al.*, 2014). Toutes ces méthodes présentent leurs avantages et leurs inconvénients mais avec un fort désir de refléter la réalité contextuelle.

De nos jours, l'analyse de la vulnérabilité aux inondations s'avère être un exercice régulier et devrait être évaluée constamment pour comprendre son cheminement au regard de la dynamique sociétale et de la connaissance de plus en plus approfondie des aléas (Magnan *et al.*, 2012). Mais sa mesurabilité n'est généralement pas consensuelle à cause de son caractère multidimensionnel. De ce fait, l'approche systémique de la vulnérabilité aux inondations est à contextualiser dans son territoire tandis que l'approche analytique, complémentaire à la première, converge beaucoup plus vers des modèles prédictifs (Baud & Bonnemains, 2018) qui peuvent s'appliquer à des territoires présentant les mêmes similitudes.

Dans la MRC de Bonaventure, aucune étude n'a pris en compte à la fois les indicateurs sociaux, économiques, physiques, environnementaux et les facteurs aggravants dans la trajectoire de la vulnérabilité aux inondations. Les problèmes liés aux inondations traités dans le cadre de ce projet font référence aux limites peu précises des zones inondables et la faiblesse de la gestion préventive des risques liés aux inondations dans la MRC de Bonaventure. En effet, les seules cartographies existantes sont des cartographies de l'aléa et ont été réalisées à partir de la méthode du « pinceau large » en 1988 et actualisée en 2008 à travers l'interprétation des photographies aériennes. Elles sont donc peu précises et elles sont tombées en désuétude au regard de l'évolution dans le temps de l'aléa inondation et de ses conséquences sur le territoire de la MRC de Bonaventure. On note également l'absence de données sur la cote de submersion critique (la hauteur du premier plancher par rapport au sol par exemple) pour les résidences, des bâtiments commerciaux, industriels et administratifs exposés aux inondations et la hauteur de submersion pour les différentes périodes de retour. Ce qui se ramène à une insuffisance des outils d'aide à la décision pour la gestion préventive des risques liés aux inondations dans la MRC de Bonaventure.

Face à ces incertitudes peu soulignées, comment les facteurs de vulnérabilité influencent-ils la trajectoire de la vulnérabilité dans la MRC de Bonaventure ? Ce présent projet de recherche prend alors tout son sens dans ce nouveau contexte de processus continu

puisque'il vise à évaluer l'évolution de la vulnérabilité aux inondations dans les bassins versants des rivières Cascapédia et petite Cascapédia à l'Est du Québec.

Objectifs

L'objectif principal de ce mémoire est d'évaluer l'évolution spatio-temporelle de la vulnérabilité aux inondations dans les bassins versants des rivières Cascapédia et petite Cascapédia à l'Est du Québec. Pour cela deux objectifs spécifiques sont mis en avant et explicités ici.

Objectif spécifique 1

Le premier objectif spécifique vise à identifier les indicateurs de vulnérabilité aux inondations les plus pertinents et leurs interactions. Il s'agit de partir d'une base conceptuelle de l'analyse du système pour définir les indicateurs les plus pertinents et adaptés au contexte de la MRC de Bonaventure pour l'analyse de la vulnérabilité. A travers cet objectif spécifique, la perception des populations est mise de l'avant dans l'évaluation de la vulnérabilité.

Objectif spécifique 2

Le deuxième objectif spécifique vise à comprendre la trajectoire de la vulnérabilité aux inondations dans la MRC de Bonaventure. Il s'agit de mesurer la vulnérabilité dans le temps et dans l'espace à travers une approche indiciaire des facteurs d'exposition, de sensibilité et d'adaptation permettant à la MRC de Bonaventure d'appréhender et de comprendre la nature de sa vulnérabilité dans son évolution et d'anticiper le futur. L'importance de cette analyse réside dans la prise en compte de la nature et des spécificités de la vulnérabilité dans les politiques d'aménagement du territoire, dans les politiques de gestion préventive des risques liés aux inondations et dans les interventions d'urgence en cas de crise afin de construire des villes résilientes aux inondations. Les cartographies de la vulnérabilité aux inondations générées serviront d'outils d'aide à la décision.

Les objectifs spécifiques visent à faciliter la compréhension de la trajectoire de la vulnérabilité aux inondations, d'identifier les indicateurs qui font varier la vulnérabilité et sur lesquels les gestionnaires doivent agir pour leur réduction.

Ce mémoire prend la forme d'un mémoire par article scientifique pour répondre aux objectifs soulevés. Pour enrichir et soutenir le contenu de l'article au cœur du mémoire, un premier chapitre expose l'état des connaissances sur la trajectoire de la vulnérabilité aux inondations notamment sur les concepts de la vulnérabilité, l'évaluation de la vulnérabilité à travers les approches indicelle et d'endommagement dans la reconstitution de la trajectoire de la vulnérabilité aux inondations. Le second chapitre, qui constitue l'article au cœur de ce mémoire, analyse la trajectoire de la vulnérabilité aux inondations dans les bassins versants des rivières Cascapédia et petite Cascapédia à travers l'approche méthodologique indicelle. Cet article est dans une version finale prête à être traduite puis soumise à la revue *Journal of Flood Risk Management*. Il est à noter qu'un deuxième article est en préparation pour valoriser les données émanant des enquêtes réalisées dans cette recherche. La table des matières de ce deuxième article est présentée en annexe pour information et pour lier informellement ce deuxième chapitre à ce mémoire.

CHAPITRE 1

REFLEXION THÉORIQUE SUR LA TRAJECTOIRE DE LA VULNERABILITÉ AUX INONDATIONS

1.1 INTRODUCTION

D'un point de vue de géographe, le risque défini communément comme l'interaction entre l'aléa et la vulnérabilité est un exemple illustratif de croisement de la géographie physique (l'aléa) et de la géographie humaine (la vulnérabilité). Dans un sens plus large l'analyse des risques naturels est au carrefour des sciences naturelles et sociales. Ce croisement est favorisé par l'augmentation de plus en plus accrue des enjeux aux aléas. Les territoires exposés dans le passé mais ne présentant pas d'enjeux sont aujourd'hui peuplés d'enjeux qui conduisent à une complexification de la gestion du risque lié aux inondations dans le monde actuel. La vulnérabilité n'est perceptible que par la présence des enjeux sur une zone donnée qui ne se révèlent que lors de la manifestation de l'aléa sur ces enjeux (O'Keefe *et al.*, 1976). L'analyse de la vulnérabilité est une composante de l'analyse du risque. Si l'aléa a longtemps été largement étudié dans l'analyse du risque, la vulnérabilité a retrouvé une place importante dans l'analyse du risque (Leone & Vinet, 2006) dans notre société actuelle dite « société de risque » (Beck, 2006 ; Ewald, 2000).

Le présent chapitre fait une revue bibliographique qui aborde tout d'abord le concept de la vulnérabilité, puis présente deux approches d'évaluation de la vulnérabilité et enfin expose l'importance de la trajectoire de la vulnérabilité aux inondations dans les territoires à risque d'inondation.

1.2 LA VULNERABILITE : UN CONCEPT DOUBLEMENT RELATIF

La vulnérabilité est une notion polysémique, multiscalaire et multidimensionnelle (Bogardi, 2004 ; Bohle, 2002 ; Janin, 2006 ; Léone, 2007). Elle est également une notion doublement relative au contexte et au temps. En effet, les individus, les sociétés et les territoires évoluent dans des contextes géographique, socio-économique, politique, historique et psychosocial différents qui contribuent à comprendre les spécificités de l'évolution de leur vulnérabilité (Defossez *et al.*, 2018). Elle est étudiée à différentes échelles spatio-temporelles, individuelles à territoires et intègre une dimension dynamique (Léon *et al.*, 2010) qui met en évidence les interactions complexes entre les sociétés et leur environnement dans leur territoire et même au-delà de leur territoire. La vulnérabilité ne peut donc pas être statique. L'utilisation d'une échelle spatiale d'analyse de la vulnérabilité est importante pour faire des comparaisons. L'échelle spatiale dans l'analyse de la vulnérabilité peut être adaptée au niveau des pays, des régions, des bassins versants ou de la localité dans une zone donnée. Si l'échelle spatiale est inadaptée, elle peut engendrer des résultats non conformes à la réalité du terrain ou une généralisation trop importante des résultats (Fekete *et al.*, 2010).

Au niveau local, la vulnérabilité représente un risque biophysique et nécessite une réponse sociale contextualisée à l'intérieur de la zone géographique spécifique. Cette contextualisation fait référence aux caractéristiques socio-économiques ou institutionnelles particulières (Rygel *et al.*, 2006). L'environnement local, les caractéristiques démographiques et les inégalités socio-économiques créent des vulnérabilités différentielles (Buckle *et al.*, 2001; Cutter *et al.*, 2003; Kienberger, 2007). A l'intérieur d'une zone d'inondation particulière, la vulnérabilité peut varier fortement d'un endroit à l'autre. Ainsi, les analyses de la vulnérabilité à l'échelle de quartier voire à l'échelle de la résidence sont plus adaptées mais nécessitent un grand effort pour collecter les données primaires à travers des enquêtes (Wilhelmi & Morss, 2012).

Il existe plusieurs définitions de la vulnérabilité dépendant des courants de pensée. Les travaux de Birkmann en 2006 recensaient, 25 différentes définitions de la vulnérabilité, six courants de pensée et une vingtaine de manuels et de guide pour son évaluation. Il ne s'agit pas ici de dresser un inventaire des différentes étapes de définition de la vulnérabilité mais il s'agit de montrer qu'il y a une pluralité de points de vue du concept de la vulnérabilité et qu'il sied de promouvoir la définition qui cadre avec les objectifs et la finalité de l'étude.

La vulnérabilité est définie comme « la propension d'une société donnée à subir des dommages en cas de manifestation d'un phénomène naturel ou anthropique » (D'Ercole *et al.*, 1994, p. 88-89). Cette définition fait référence à l'endommagement potentiel des bâtiments, des infrastructures ou de pertes en vies humaines à la suite de l'effet d'un aléa sur les enjeux donnés. Cette définition s'est élargie pour cerner les conditions préexistantes à l'endommagement ou influant sur la capacité de réponse en situation de crise (Thouret *et al.*, 1996). Au regard de l'évolution du concept de la vulnérabilité jusqu'à nos jours, une approche multidisciplinaire s'impose aux acteurs pour s'affranchir du cloisonnement disciplinaire afin de mieux l'analyser et la comprendre sur toutes ses dimensions.

Il est difficile de mesurer la vulnérabilité puisqu'elle n'est pas un phénomène observable mais un concept théorique (Rakotoarisoa *et al.*, 2018). Rendre le concept opérationnel signifie de le rendre observable à travers une méthode (Bernard, 2013). Cette opération de transformation du concept théorique en observable, dans le cas de la vulnérabilité, peut s'appeler la méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité (Rakotoarisoa *et al.*, 2018). Malgré, la maîtrise presque stable du concept de la vulnérabilité, il n'existe pas de méthode standardisée pour son évaluation (Defossez *et al.*, 2018) mais les études récentes convergent vers un consensus d'approche d'évaluation de la vulnérabilité (figure 1). Elle s'inscrit, d'une part, dans une approche analytique, plus descriptive, se structurant autour des enjeux humains, matériels, environnementaux et patrimoniaux, et d'autre part, dans une approche synthétique ou systémique, plus explicative, qui s'étend à un champ de facteurs plus large d'un territoire et d'un système sociospatial. (Defossez *et al.*, 2018).

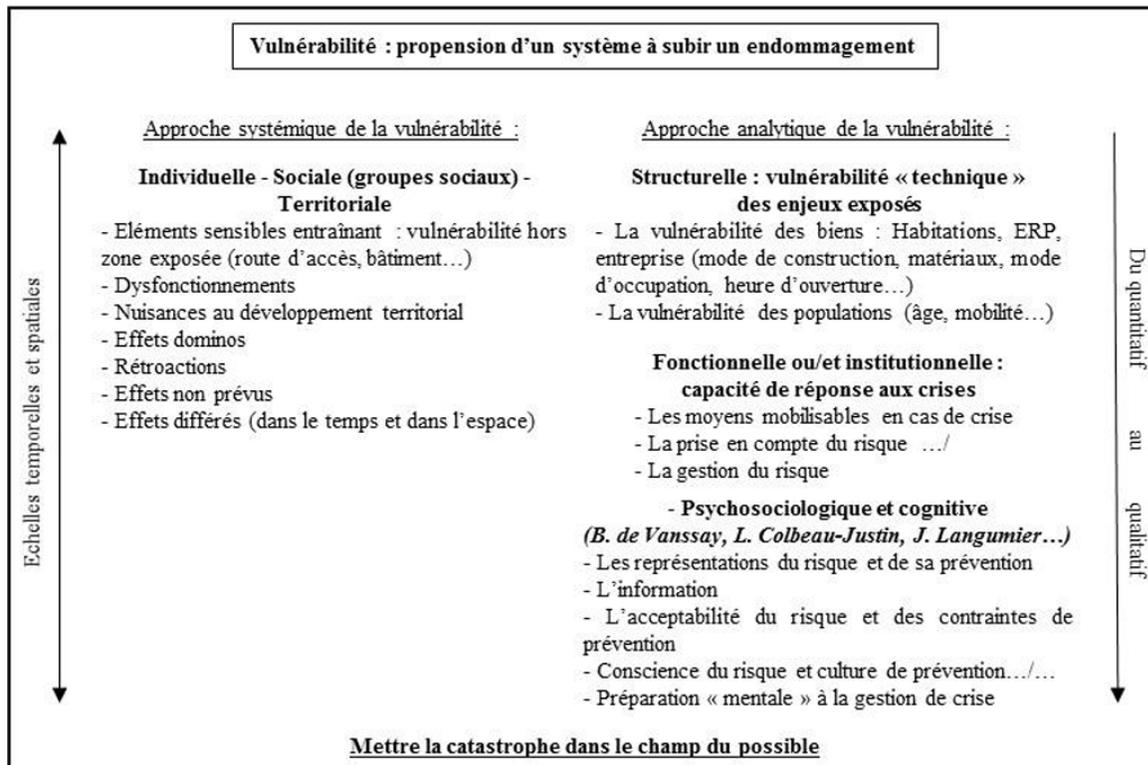


Figure 1. Approches d'évaluation de la vulnérabilité. © Defossez *et al.*, 2018. Reproduit avec permission.

1.3 ÉVALUATION DE LA VULNERABILITE

La vulnérabilité peut être appréhendée sous deux grands courants de pensée à savoir les facteurs de vulnérabilité ou l'endommagement potentiel (D'Ercole *et al.*, 1994 ; Provitolo, 2007; Dauphiné, 2003). Le ministère de la sécurité civile du Québec définit la vulnérabilité comme une condition résultant de facteurs physiques, sociaux, économiques ou environnementaux, qui prédispose les éléments exposés à la manifestation d'un aléa à subir des préjudices ou des dommages (ministère de la sécurité civile du Québec, 2008). Cette définition fait ressortir le caractère polysémique de la vulnérabilité car elle désigne à la fois les dommages et les conditions préexistantes menant à ces dommages. Il s'agit de deux conceptions de la vulnérabilité qui se traduisent par deux approches dans l'évaluation de la

vulnérabilité (figure 2) : la première est l'endommagement potentiel et la deuxième concerne les facteurs de vulnérabilité.

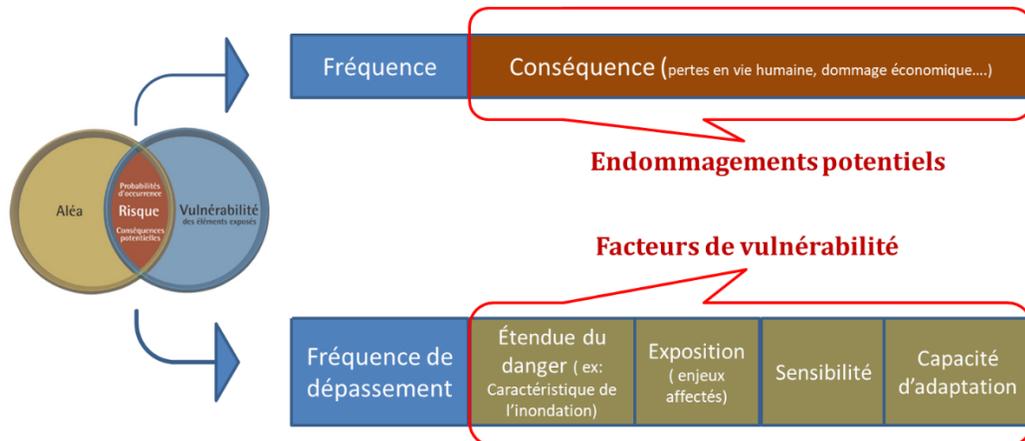


Figure 2. Approches d'évaluation de la vulnérabilité utiles dans la trajectoire de la vulnérabilité aux inondations

L'approche classique dite analytique de la vulnérabilité aux inondations analyse la vulnérabilité à partir d'endommagement potentiel des personnes et des biens. La vulnérabilité dans cette approche est perçue comme une composante passive du risque. En effet, elle part de l'identification des enjeux (éléments vulnérables), puis fait l'évaluation des dommages des enjeux après une catastrophe et enfin aboutit à l'évaluation des dommages de chaque enjeu soumis à l'aléa. Cette approche classique a une vision restrictive de l'analyse de la vulnérabilité car elle ne permet pas d'appréhender les variables favorables aux endommagements ou influant sur la capacité de réponse de la population (Provitolo, 2007).

L'approche moderne dite synthétique de la vulnérabilité est basée sur la capacité à se construire ou à surmonter une crise. Cette approche présente la vulnérabilité comme une composante active du risque (Gilbert, 2006). En effet, elle intègre, en plus des éléments vulnérables, les facteurs de la vulnérabilité telles que la capacité physique de résistance, l'alerte aux crues, la perception du danger, la qualité des réactions individuelles et la qualité des interventions des secours. Il est reproché à cette approche qu'elle ne permet pas d'obtenir

une vulnérabilité globale et n'est basée sur aucune équation mathématique (Provitolo, 2007). L'importance des concepts de l'endommagement potentiel et de facteurs de vulnérabilité, dont la maîtrise est essentielle dans l'évaluation de la trajectoire de la vulnérabilité, justifie que l'on s'y attarde afin de comprendre les principales dimensions.

1.3.1 La vulnérabilité vue sous l'angle de l'endommagement

La vulnérabilité aux inondations peut être vue sous l'angle de l'endommagement. L'évaluation des dommages causés par les inondations permet d'estimer le risque suivant la relation de la probabilité par les conséquences. Pour cela les fonctions dommages sont importantes pour la prédiction des dommages potentiels causés par les inondations.

1.3.1.1 Évaluation des dommages

Selon Grigg et Helweg (1975), il existe dans la littérature trois méthodes pour obtenir une relation fonctionnelle entre le dommage direct sur les enjeux exposés à l'inondation et le niveau d'eau correspondant à diverses crues : historique, agrégée et distribuée-empirique. La méthode historique, proposée par Eckstein en 1958, est la plus ancienne. Elle consiste à représenter sur un graphique les dommages observés dans le passé en fonction des niveaux d'eau atteints par les crues. Cependant, il est parfois reproché à cette méthode historique le manque de représentativité à l'égard de la situation courante et de disponibilité de données (Leclerc *et al.*, 2003). James (1972) et Brown et ses collaborateurs (1973) sont les premiers à développer la méthode agrégée. Cette méthode consiste à utiliser un modèle linéaire surfacique en fonction du niveau d'eau globale pour calculer les dommages directs d'un évènement spécifique dans une zone donnée. La difficulté de cette méthode réside dans la complexification de paramétrage surfacique des enjeux (Leclerc *et al.*, 2003). La méthode distribuée-empirique, développée par la Tennessee Valley Authority (1969), est basée sur l'utilisation d'un modèle empirique défini par une loi de comportement qui permet d'estimer les dommages directs sur chaque bâtiment ou groupe de bâtiments en fonction du niveau d'eau ou de la submersion. Cette méthode fait apparaître les courbes de dommages. Dans

chacune de ces méthodes, les niveaux ou hauteurs d'eau sont indirectement liés à une probabilité de l'aléa. La méthode distribuée est la plus utilisée dans l'évaluation des dommages.

Plusieurs sources de données sont utiles pour mener à bien l'évaluation des dommages. La caractérisation des enjeux et de leur vulnérabilité nécessite les données issues des bases de données spatiales existantes et des enquêtes décrivant les caractéristiques physiques, sociales, économiques des enjeux et leurs sensibilités aux inondations. Les données sur l'aléa telles que les limites d'inondations et les hauteurs d'eau ou de submersion sont issues des modèles hydrodynamiques. Ils permettent de délimiter la zone impactée par l'aléa inondation. Les coûts associés aux dommages sont issus des bases de données statistiques existantes, des enquêtes et des retours d'expérience (Eleuterio *et al.* 2008). Les dommages sont catégorisés en quatre groupes (Messner *et al.*, 2007) : tangibles et directs, tangibles et indirects, intangibles et directs et enfin intangibles et indirects.

Les dommages tangibles et directs supposent qu'une valeur monétaire peut être associée à un enjeu endommagé par un contact direct avec l'aléa (destruction d'un bâtiment résidentiel par les eaux des inondations...) tandis que les dommages tangibles et indirects correspondent à des dommages que l'on peut attribuer une valeur monétaire à un enjeu endommagé sans que ce dernier soit en contact direct avec l'aléa (dysfonctionnement des chaînes économiques...). Cependant, il est difficile d'associer une valeur monétaire à un enjeu endommagé par contact avec l'aléa dans le cas des dommages intangibles et directs (destruction d'un monument culturel...). Pour les dommages intangibles et indirects, il est également difficile d'associer une valeur monétaire à un enjeu endommagé sans contact avec l'aléa (impact psychologique...).

Les dommages indirects, difficilement quantifiables, sont généralement estimés proportionnellement aux dommages directs. Par exemple, pour les travaux d'Eleuterio *et al.* (2008), les dommages indirects pour les activités sont estimés à la moitié des dommages directs causés aux activités basées sur les orientations de l'évaluation des dommages tangibles liés aux inondations du département des ressources naturelles et des mines

d’Australie. L’évaluation des dommages passe par trois étapes : la caractérisation de la vulnérabilité de l’occupation du sol; la quantification des impacts potentiels liés à l’aléa et la monétarisation des impacts quantifiés.

1.3.1.2 Fonctions dommages

Les fonctions d’évaluation des dommages liés aux inondations se focalisent généralement sur les dommages causés aux éléments vulnérables de l’occupation du sol. La hauteur d’eau ou de submersion est le paramètre le plus utilisé caractérisant l’aléa inondation dans les fonctions de dommage (Eleuterio *et al.*, 2008; Leclerc *et al.*, 2003; Bouillon *et al.*, 1999; Glas *et al.*, 2020; Jongman *et al.*, 2012). Elles peuvent être catégorisées au regard de la présence ou l’absence du sous-sol, de la superficie du bâtiment, de la nature de l’activité dans le bâtiment, du taux d’occupation (Eleuterio *et al.*, 2008) et de la valeur du bâtiment (Leclerc *et al.*, 2003). De ce fait, les études ont montré qu’il existe toute une variété de fonctions dommages (Vanneuville *et al.*, 2003; Vrisou Van Eck *et al.*, 1999; Leclerc *et al.*, 2003; Torterotot, 1993) dépendant du contexte de l’occupation du sol et de la sensibilité des enjeux. Les fonctions dommages sont contextualisées car les enjeux ne font pas face aux mêmes réalités. Les fonctions dommages décrivant les risques liés aux inondations respectent les caractéristiques générales d’une fonction monotone, continue, définie positive et croissante (Dantzig, 1956). Elles peuvent être exprimées, soit sous forme de dommage en valeur monétaire globale, soit en valeur monétaire par unité de propriété (Bouillon *et al.*, 1999), soit en valeur monétaire par unité surfacique (Glas *et al.*, 2020; Eleuterio *et al.*, 2008) ou soit sous forme de taux d’endommagement (valeur du dommage d’un bâtiment affecté par l’inondation sur sa valeur totale au moment de l’évaluation) qui peut répondre à une loi de distribution à déterminer (Leclerc *et al.*, 2003). Les fonctions de dommages directs économiques sont élaborées, non seulement pour les différents types de bâtiments, mais également, pour les infrastructures linéaires et les différents types de produits agricoles sur des superficies emblavées dans les zones inondables.

La fiabilité de la méthode d'évaluation du coût des dommages engendrés aux bâtiments par les inondations est proportionnelle au nombre et à la qualité des données mobilisées (Eleuterio *et al.*, 2008). La sensibilité des résultats des modèles des fonctions dommages peuvent varier. En effet, dans la littérature scientifique, ils existent plusieurs modèles prédictifs pour la détermination des dommages liés aux inondations : par exemple, FLEMO (Belgique), Scanner dommage (Pays-bas), l'atlas Rhin (bassin du Rhin), le modèle flamand (Belgique), le manuel multi-coloré (Angleterre), HAZUS-MH (Etats-Unis) et le modèle JRC (commission européenne/HKV). Les études comparatives de ces sept modèles de simulation développés pour les dommages directs liés aux inondations, utilisant tous la profondeur d'inondation comme paramètre déterminant et effectuées dans les conditions économiques similaires, ont montré que les dommages simulés sont souvent sous-estimés ou surestimés (Jougman *et al.*, 2012). Les incertitudes sont issues de la qualité des données de base, de l'hétérogénéité locale de la densité des enjeux à l'intérieur d'une même classe d'utilisation du sol qui peut avoir un fort impact sur les dommages estimés à l'échelle des zones relativement petites, de l'utilisation des données agrégées ou objectives d'occupation du sol, du modèle de profondeur d'inondation de la zone inondée utilisé (Jougman *et al.*, 2012).

1.3.1.3 Monétarisation des dommages

Après la quantification des dommages vient leurs monétarisations. La monétarisation des dommages directs repose sur des données existantes des endommagements et de leurs valeurs économiques de réparation. Une valeur monétaire est reliée à chaque enjeu économique endommagé dénombré dans la zone inondée. Les fonctions dommages, issues du processus de quantification et de monétarisation des dommages, permettent de tracer des courbes des dommages en fonction de la hauteur d'eau ou de submersion. Dans le cas des taux d'endommagement, tous les éléments à risque identifiés dans la zone d'inondation sont reliés à leur valeur de remplacement du moment de l'évaluation afin de déterminer les facteurs de dommage (Glas *et al.*, 2020; Leclerc *et al.*, 2003). Les valeurs monétaires attribuées aux impacts sont issues des données d'enquête et des retours d'expériences utiles

pour la construction des courbes de dommages. Ces courbes de dommages sont importantes dans la prédiction des dommages potentiels liés aux inondations.

1.3.2 La vulnérabilité vue sous l'angle de facteurs de vulnérabilité

La vulnérabilité vue sous l'angle de facteurs de vulnérabilité explore les conditions préexistantes à l'endommagement. Son évaluation consiste à analyser la nature de la vulnérabilité et à mesurer la vulnérabilité par la méthode indicielle à travers l'identification des indicateurs liés aux facteurs de vulnérabilité, leur pondération et leur agrégation en indices composites.

1.3.2.1 Indicateurs de vulnérabilité

Plusieurs facteurs prédisposent les sociétés à subir les effets de l'aléa. Sans être exhaustif, nous en citons quelques-uns identifiés et utilisés dans l'évaluation de la vulnérabilité : les facteurs socio-économiques, les facteurs psycho-sociologiques, les facteurs culturels et historiques des sociétés exposées, les facteurs techniques, les facteurs fonctionnels, les facteurs institutionnels et politico-administratifs. Ces facteurs peuvent être regroupés en quatre grandes catégories associées aux aspects sociaux, économiques, physiques et environnementaux (ministère de la sécurité civile du Québec, 2008). Le développement des indicateurs se base sur ces facteurs ou ces catégories et constitue une étape importante dans la construction des indices de la vulnérabilité. Les indicateurs sont généralement des paramètres qui renseignent sur des états ou des conditions spécifiques qui ne sont pas directement mesurables (Meyer, 2011). Hinkel (2011) identifie quatre approches pour le développement des indicateurs : L'« *approche déductive* » se base sur les connaissances actuelles, les théories et les modèles existants pour identifier les indicateurs d'un système vulnérable donné. L'« *approche inductive* » utilise des données existantes pour construire des modèles statistiques qui expliquent le danger observé à travers certaines variables indicatrices. L'« *approche normative* » se base sur des jugements de valeur par les experts. Enfin, l'« *approche nonsubstantielle* » est basée sur les variables indicatrices donc

indépendante des connaissances sur la vulnérabilité. Le développement des indicateurs peut combiner ces différents types d'approches.

Les indicateurs liés à la vulnérabilité aux inondations permettent de mesurer ou d'analyser les facteurs ou les composantes de la vulnérabilité pour les comparer à des seuils critiques ou des mesures antérieures (GIZ/WRI, 2017). Un bon indicateur de la vulnérabilité aux inondations doit être valable et pertinent pour bien représenter le paramètre ou le facteur à évaluer. Il est fiable et crédible et permet l'acquisition des données à l'avenir. Il a un sens précis et accepté par les acteurs dans le contexte de la vulnérabilité aux inondations. Le sens de l'évolution de l'indicateur est clair et compréhensible par les acteurs. Il est pratique et vient d'une source de données accessibles. La résolution temporelle et spatiale de l'indicateur est cohérente avec l'analyse de vulnérabilité (GIZ/WRI, 2011 ; ACIDI, 2004). L'indicateur est une fonction simple c'est-à-dire linéaire, monotone, croissante ou décroissante (Hinkel, 2011). Dans la reconstitution de la trajectoire de la vulnérabilité aux inondations, l'utilisation des mêmes indicateurs sur toute la période considérée permet de faire les comparaisons à chaque pas de temps décennal afin de bien cerner les indicateurs qui font varier la vulnérabilité.

1.3.2.2 Pondérations des indicateurs de la vulnérabilité

Dans certains cas, le recours à la pondération des indicateurs de la vulnérabilité est nécessaire pour évaluer la vulnérabilité. Il existe plusieurs méthodes de pondération qui vont des plus objectives aux plus subjectives. Mais l'objectivité d'une méthode de pondération est à relativiser. De l'analyse de huit différentes méthodes de pondérations telles que l'analyse en composantes principales (ACP), l'approche *benefit of doubt* (BOD), modèle à composantes inobservables (MCI), l'analyse conjointe, l'approche *data envelopment analysis* (DEA), l'analyse hiérarchique des procédés (AHP), la pondération égale, la pondération par allocation budgétaire ou *budget allocation process* (BAP) et la perception du public aussi bien statistiques que participatives, réalisées par l'OCDE (2008), aucun d'eux n'est un moyen « objectif » de définir les pondérations. Ces dernières sont considérées

comme des jugements des valeurs. De ce fait, le choix d'une méthode pour la construction des indices doit être justifié pour ne souffrir de manque de légitimation pour l'orientation de l'action publique (Dialga & Le, 2014).

1.3.2.3 Construction des indices

La vulnérabilité vue sous l'angle de facteurs de vulnérabilité consiste à appréhender les variables favorables à l'endommagement ou influant sur la capacité de réponse d'une société face à une catastrophe (Provitolo, 2007). La vulnérabilité appréhendée sous forme de facteurs de vulnérabilité est une démarche qualitative et synthétique qui permet de comprendre le sens de la variabilité de la vulnérabilité des éléments vulnérables. Plusieurs méthodes existent dans la littérature scientifique pour évaluer la vulnérabilité sous l'angle de facteurs de vulnérabilité. Une des méthodes les plus utilisées est la méthode indicielle. La méthode de construction des indices de vulnérabilité est une des méthodes permettant de mesurer la vulnérabilité qui se veut 'opératoire' (Dauphiné et Provitolo, 2013). La vulnérabilité mesurée par la méthode indicielle permet, d'une part, de synthétiser plusieurs dimensions de la vulnérabilité et, d'autre part, de créer la cartographie de la vulnérabilité (Leone *et al.*, 2010). Plusieurs études sur l'analyse de la vulnérabilité sont basées non seulement, sur la sélection et l'analyse des indicateurs (Dottori *et al.*, 2018 ; Fernandez *et al.*, 2016 ; Nasiri *et al.*, 2019 ; Pricope *et al.*, 2019 ; Rufat *et al.*, 2015 ; Rufat *et al.*, 2017) mais également sur la quantification de la vulnérabilité et sa cartographie à partir des différents types d'indicateurs (Adger 1998 ; Barroca *et al.*, 2006 ; Colburn & Seara 2011 ; Jean-Baptiste *et al.*, 2011 ; Kissi *et al.*, 2015 ; Villordon, 2015 ; Rufat *et al.*, 2015 ; Karmaoui *et al.*, 2016 ; Balica *et al.*, 2017 ; Fatemi *et al.*, 2016 ; Tomety *et al.*, 2017 ; Frigerio *et al.*, 2018) dans l'approche synthétique/systemique. Ces indicateurs ont été conçus pour analyser et mesurer la vulnérabilité à différentes échelles spatiales, à savoir nationale, régionale, locale ou territoriale.

Les indicateurs peuvent être agrégés en indices agrégés ou composites. Ainsi, Ramieri *et al.* (2011) ont distingué deux approches sur les indicateurs et ont tenté d'expliquer la

différence de ces deux approches, qui n'est souvent pas évidente, dans leurs travaux sur la vulnérabilité côtière: il s'agit d'approches basées sur des indices et sur des variables. Les approches basées sur les indices expriment la vulnérabilité par un indice de risque ou de vulnérabilité unidirectionnelle et généralement sans unité mais ces approches ne sont pas immédiatement transparentes puisque l'indice final ne permet pas de comprendre les hypothèses et les agrégations qui ont conduit à son calcul (eg. Thomas *et al.*, 2017). Les approches basées sur les variables expriment la vulnérabilité par un ensemble de variables assez indépendantes combinées généralement dans un indice composite final qui caractérise les principaux problèmes (eg. Preston *et al.*, 2007; Balica & Wright, 2012). Ces approches à base des variables permettent d'évaluer différents aspects de la vulnérabilité pour produire des variables évaluées correspondant à ces étapes dans un contexte d'évaluation parfaitement cohérent. Une même unité est utilisée pour agréger les indicateurs tandis que différentes unités peuvent être utilisées pour composer les indicateurs dans une cartographie holistique de la vulnérabilité (Schauer *et al.*, 2010; Abson *et al.*, 2012).

Les indices (composites ou agrégés) sont simples à construire et représentent un outil pédagogique pertinent dans l'analyse de la vulnérabilité (Nardo *et al.*, 2005). Ils offrent également une connaissance simplifiée des risques et facilite l'interprétation pour l'aide à la décision (Rakotoarisoa *et al.*, 2018). Cependant, certaines critiques émergent quant aux choix arbitraires sur les indicateurs, la pondération, les données manquantes, la normalisation, l'agrégation, la discrétisation (Nardo *et al.*, 2005) et les méthodes de calcul. L'adéquation de la simplification de la réalité dans une équation de vulnérabilité et sa conformité avec la réalité sur le terrain est discutable (Nardo *et al.*, 2005).

En effet, l'analyse statistique multivariée permet d'évaluer la pertinence de l'ensemble de données et fournir une compréhension des implications des choix méthodologiques (par exemple la pondération et l'agrégation des indicateurs) lors de la phase de construction d'un indice de vulnérabilité. L'analyse factorielle et l'analyse de la fiabilité ou des éléments peuvent être utilisées pour regrouper les informations sur les indicateurs pour s'assurer que tous les phénomènes sont bien équilibrés (sur le plan statistique) dans l'indicateur composite

ou agrégé. Plus la corrélation est forte entre les indicateurs, moins les dimensions statistiques seront présentes dans l'ensemble de données (Alvarez *et al.*, 2014). Cependant, si les dimensions statistiques ne coïncident pas avec les dimensions théoriques de l'ensemble de données, une révision de l'ensemble des sous-indicateurs pourrait être envisagée (Nardo *et al.*, 2005). Saisana *et al.* (2005) font remarquer que selon l'école de pensée, une forte corrélation entre les indicateurs peut être parfois vue comme quelque chose à corriger, par exemple en affectant le poids pour un indicateur donné inversement proportionnel à la moyenne arithmétique des coefficients de détermination pour chaque corrélation bivariée qui inclut l'indicateur donné. En revanche, les praticiens de l'analyse décisionnelle multicritère auraient tendance à considérer l'existence de corrélations comme une caractéristique du problème, n'entraînant pas une correction, car les indicateurs corrélés peuvent en effet refléter des différences non compensables des différents aspects du problème (Nardo *et al.*, 2005).

Dans certains cas, certaines données peuvent être manquantes pour la construction des indices. Nardo *et al.* (2005), distinguent trois méthodes génériques pour traiter les données manquantes : la suppression de cas, l'imputation simple ou l'imputation multiple. Si la donnée est manquante pour l'indicateur, la méthode par suppression de cas suppose la suppression de l'indicateur de l'analyse. L'inconvénient de cette méthode est qu'elle ignore les éventuelles différences systématiques entre un échantillon complet et incomplet et peut produire des estimations biaisées si les enregistrements supprimés ne sont pas un sous-échantillon aléatoire de l'échantillon initial. Pour cela, les erreurs standards seront généralement plus grandes dans un échantillon réduit car moins d'informations sont utilisées. La méthode de l'imputation simple (par exemple la substitution par la moyenne, la médiane ou le mode, l'imputation par la régression, l'algorithme espérance-maximisation) et l'imputation multiple (par exemple la méthode de Monte Carlo par chaînes de Markov, l'algorithme d'Amelia II) ont l'avantage de minimiser les biais et les coûts de collecte de données. Cependant, Dempster & Rubin (1983) estime que l'idée de l'imputation est à la fois séduisante car l'utilisateur peut croire que les données sont complètes après tout et dangereuse parce qu'il regroupe les situations où le problème est suffisamment mineur pour

qu'il puisse légitimement être traité de cette façon et les situations où les estimateurs standards appliqués aux données réelles et imputées ont des biais substantiels. Dans le cas de la trajectoire de la vulnérabilité, la suppression de l'indicateur est préconisée pour les données manquantes pour mieux appréhender l'évolution des indicateurs et l'indice de vulnérabilité dans le temps.

Le nombre total d'indicateurs pour représenter un facteur de vulnérabilité peut varier d'un cas à l'autre et il est préférable que le choix des indicateurs soit orienté par les experts (GIZ, 2017). Toutefois, les décideurs et le public trouvent souvent plus facile de comprendre un indice (agrégé ou composite) que de nombreux indicateurs séparés (OCDE, 2008). Même si McLaughlin & Cooper (2010) affirment qu'il est tentant d'utiliser toutes les données disponibles dans la construction d'un indice, Dal Cin et Simeoni (1989) ont affirmé plus tôt que l'utilisation de nombreuses variables donnait des résultats plus corrects. Les résultats peuvent ne pas être nécessairement vrais lorsque les variables ou les indicateurs présentent de forte corrélation (Balica & Wright, 2009) car si deux variables sont fortement corrélées, cela donnerait deux fois plus de poids dans l'analyse multivariée à l'information donnée par ces variables (Alvarez *et al.*, 2014). Dans ce cas, le nombre d'indicateurs peut être réduit par l'utilisation des méthodes mathématiques pour sélectionner les plus pertinents et éviter les redondances (Balica & Wright, 2010; Cutter *et al.*, 2003).

La normalisation des indicateurs sert à les ramener dans une même unité avant de les agréger dans une valeur finale. Les méthodes de classement, de standardisation, de min-max, de remise à l'échelle, d'échelle catégorielle, sont quelques-unes des méthodes disponibles pour la normalisation (Nardo *et al.*, 2005; Shauser *et al.*, 2010). Elle sert également à comparer les résultats. Les travaux de Stevens et Aleamoni (1986) montre que la standardisation sert à mieux comparer et à interpréter les résultats de l'agrégation de plusieurs scores.

Il existe plusieurs méthodes d'agrégation utilisées dans la construction d'un indice final dans l'analyse de la vulnérabilité. Les méthodes les plus courantes sont l'agrégation additive, l'agrégation géométrique et l'agrégation multicritère. Les méthodes d'agrégation additive et

géométrique impliquent un effet de phénomène compensatoire et imposent l'indépendance des indicateurs (OCDE, 2008) tandis que la méthode d'agrégation multicritère est une méthode non compensatoire et n'impose pas une indépendance entre les indicateurs (Munda, 1995). Le guide de l'OCDE (2008) relate que les effets de l'agrégation dépendent de la méthode d'agrégation utilisée. Ainsi, les phénomènes de « pleine compensation » c'est-à-dire qu'un score élevé pour un indicateur peut compenser un faible score d'un autre indicateur et entraînant le retrait des valeurs extrêmes observées de l'indice final par la méthode d'agrégation arithmétique pondérée. La méthode d'agrégation géométrique fait observer les phénomènes de « compensation partielle » lorsqu'un score très faible d'un indicateur ne peut compenser que partiellement le très haut score d'un autre indicateur entraînant un biais important envers les valeurs très faibles. Quelle que soit la méthode d'agrégation utilisée, la technique d'agrégation doit prendre en compte la nature des indicateurs utilisés (OCDE, 2008).

Le recours à la discrétisation est nécessaire pour transformer les indices quantitatifs en indices qualitatifs (en différentes classes) faciles d'utilisation et d'interprétation sur une cartographie. Plusieurs méthodes de discrétisation telles que les discrétisations intuitives, exogènes, mathématiques (les égales étendues, la progression arithmétique et la progression géométrique), statistiques et probabilistes (les quantiles, la moyenne et l'écart-type, les moyennes emboîtées, la variance et en classes équiprobables), graphiques (les seuils observés et l'adaptation de la courbe clinographique) et expérimentales existent mais chacune d'elles présente ses avantages et ses inconvénients (Cauvin *et al.*, 1987). Pour chaque méthode, il convient de vérifier que les différentes classes couvrent l'ensemble de la distribution avec des valeurs limites précises et facilement appréhendables. De plus, la discrétisation ne doit pas présenter de classes vides ou de chevauchement. Le nombre de classe est réduit quand les résultats sont adressés au grand public et peuvent atteindre 10 quand les résultats sont adressés à un public averti sur une thématique bien donnée (Cauvin *et al.*, 1987).

1.3.3 Choix d'un courant de pensée pour l'évaluation de la vulnérabilité aux inondations

Le risque exprimé par l'interaction entre la gravité de l'aléa et la sévérité des impacts est utilisé à travers le croisement de la probabilité et les conséquences imputables à la crue d'une amplitude (débit local) donné (Bouillon *et al.*, 1999). Le risque global est la somme des risques imputables à toutes les amplitudes. Le risque peut être calculé pour les événements d'inondations historiques de grandes ampleurs à travers le temps permettant d'analyser la trajectoire du risque global ainsi que la trajectoire du risque global normalisé en valeur monétaire. Le risque global normalisé est le risque global divisé par le nombre de propriétés année par année. Il permet de déterminer le fardeau financier que chaque personne vivant dans une municipalité contribuera à payer par année pour le dédommagement si les dommages sont uniquement à la charge de la municipalité (Bouillon *et al.*, 1999).

Le risque lié aux inondations progresse en fonction des périodes de retour. La période de retour minimale à laquelle le dommage maximum est observé est essentielle pour définir l'ampleur des travaux de protection et leur rentabilité. Bouillon *et al.*, (1999) ont identifié que 75% des dommages sont observés à partir de périodes de retour de 4 ans dans le cas de leur étude. Cela permet d'évaluer la rentabilité des interventions supposées pour réduire le risque lié aux inondations au niveau individuel et collectif. Le risque social est généralement exprimé en nombre de victimes par unité de surface et par année (Glas *et al.*, 2020). Il peut être exprimé par la fonction mortalité-profondeur (Vrisou *et al.*, 1999). Il est éthiquement difficile d'attribuer une valeur monétaire à une personne décédée des suites du risque lié aux inondations. Les victimes des inondations constitueraient des dommages auxquels une valeur monétaire ne peut être attribuée.

L'évaluation du risque lié aux inondations par endommagement est privilégiée dans l'adoption des mesures structurelles. En effet, il faut une quantification en terme monétaire pour démontrer que les ouvrages de protection projetés permettront de faire des économies pour les pouvoirs publics dans la réduction des risques liés aux inondations. Dans ce sens, le critère d'analyse coût/bénéfice est privilégié pour l'aide à la décision au premier niveau. La

mesure quantitative du risque permet de faire une analyse coût-bénéfice à partir des fonctions dommages et la monétarisation de ces dommages afin d'aider les décideurs politiques dans le choix des ouvrages de protection à construire contre les risques d'inondation (Rehan, 2018 ; Tung, 2005 ; Jonkman *et al.*, 2009 ; Kind, 2010). Bien que l'analyse multicritère puisse permettre de renforcer le bénéfice social et environnemental du projet pour la consolidation de l'argumentaire de la décision, elle sert parfois de justification suffisante quand l'analyse coût/bénéfice ne permet pas de trancher dans le processus de décision concernant la construction d'un ouvrage de protection. Par ailleurs, l'analyse du risque lié aux inondations vue sous l'angle de l'endommagement en génie civil, par exemple, va au-delà des dommages potentiels à éviter à travers la construction des ouvrages de protection. Selon Breysse (2009), elle vise à répondre à deux objectifs fondamentaux : -i- contribuer à assurer une protection efficace et à améliorer la sécurité des populations soumises aux aléas naturels ; -ii- dimensionner et concevoir les ouvrages pour qu'ils ne soient eux-mêmes des sources potentielles de risques.

La vulnérabilité abordée sous l'angle de facteurs de vulnérabilité est privilégiée dans l'adoption des mesures non structurelles. Elle passe par la quantification de la vulnérabilité par une approche indicielle pour permettre aux décideurs de mesurer la vulnérabilité et son évolution puis d'apprécier leur effort dans la réduction de cette vulnérabilité de la société dans le temps sur leur territoire. De plus, cette démarche offre aux décideurs la possibilité d'identifier les indicateurs sociaux, économiques, physiques et environnementaux les plus importants qui font varier la vulnérabilité et sur lesquels ils peuvent agir pour réduire les risques liés à l'inondation sur leur territoire. Par exemple une politique d'aide aux résidents pour rehausser les premiers planchers des bâtiments au-dessus du terrain naturel ou d'établissement d'une cote critique minimale dans une zone inondable permet de réduire le nombre de bâtiments dont leurs côtes critiques seront atteintes par de futures crues. Cette approche indicielle combinée avec l'approche synthétique conduit à une approche systémique où nous allons confronter les rétroactions et les interactions entre éléments vulnérables et les processus ayant conduit à leurs différents niveaux de vulnérabilité à travers le temps dans la zone d'étude. Cette analyse systémique permet de comprendre comment les

perceptions sociales du risque, les expériences des acteurs liées aux inondations, les intérêts et les relations entre les acteurs, la culture, les valeurs, la réceptivité des politiques préventives, la dynamique sociale et les comportements adoptés en cas d'inondations par les populations, ont contribué à modifier la vulnérabilité aux inondations des personnes et des sociétés dans leurs territoires dans le temps (D'Ercole *et al.*, 1994 ; Magnan *et al.*, 2012 ; Duvat, 2016).

Dans l'analyse du risque lié aux inondations, les économistes, les ingénieurs, les aménagistes, les urbanistes, et les architectes ont tendance à aborder le risque lié aux inondations sous l'angle de l'endommagement tandis que les géographes, les sociologues et les psychologues se penchent plus sur la compréhension des facteurs de vulnérabilité et de la manifestation de l'aléa. Les conditions préexistantes et la perception sociale du risque sont au cœur de l'analyse du risque pour les champs disciplinaires prônant davantage les mesures non structurelles tandis que la réduction voire la maîtrise de l'aléa, la quantification des dommages et leur monétarisation préoccupent énormément les disciplines abordant la construction des mesures structurelles afin de justifier la rentabilité de leurs projets de construction des ouvrages de protection contre les inondations. Cette approche d'endommagement potentiel trouve toute sa pertinence dans la politique de protection et du relèvement liée au risque. La connaissance des facteurs de vulnérabilité offre une opportunité substantielle pour mieux cerner les conditions préexistantes à l'endommagement. L'évaluation de la vulnérabilité sous l'angle de facteur de vulnérabilité met en exergue les facteurs qui font varier la vulnérabilité dans la trajectoire de la vulnérabilité contribuant à renforcer les politiques préventives de la gestion du risque et les politiques d'intervention d'urgence pendant la crise. La vulnérabilité vue sous l'angle de facteurs de vulnérabilité a l'avantage d'analyser les dimensions qualitatives et les dynamiques sociales dans sa construction dite « sociale ». De plus, elle offre un meilleur cadre d'appréhension des impacts intangibles difficilement quantifiables.

Au regard de l'analyse des deux courants de pensée dans l'évaluation de la vulnérabilité, la différence fondamentale réside dans le fait que les facteurs de vulnérabilité

à travers les indicateurs de vulnérabilité mettent en avant les processus qui ont contribué à construire la vulnérabilité individuelle, sociétale et territoriale, alors que la vulnérabilité aux inondations vue sous l'angle de l'endommagement traduit les conséquences de ces processus sur les éléments vulnérables en termes de dommages économiques et de pertes. La trajectoire de la vulnérabilité aux inondations peut être reconstituée à travers ces deux courants de pensée. Le choix d'un courant de pensée dans l'analyse de la vulnérabilité dépend des objectifs et de la finalité de l'étude. Le tableau 1 met en lumière les avantages, les intérêts et les applications de chacun de ces courants de pensée dans la trajectoire de la vulnérabilité aux inondations.

Tableau 1

Avantages, intérêts et applications des approches d'analyse de la vulnérabilité dans la trajectoire de vulnérabilité aux inondations

Courants de pensées	Avantages	Intérêts	Applications
Vulnérabilité vue sous l'angle de l'endommagement potentiel	<p>Comprendre la portée de l'endommagement</p> <p>Monétarisation des dommages</p> <p>Outil de justification économique des choix des ouvrages de réduction de risque</p> <p>Meilleure évaluation des impacts directs et tangibles (par exemple destruction de bâtiment) et des impacts tangibles et indirects (par exemple dysfonctionnement des chaînes économiques)</p>	<p>Analyse des cout-bénéfices de la mise en œuvre des ouvrages de réduction du risque</p> <p>Compréhension de la vulnérabilité passive</p> <p>Prédiction des dommages potentiels à travers les fonctions dommages</p> <p>Outils de mesure des efforts d'adaptation des décideurs dans la réduction de la vulnérabilité</p>	<p>Politique de protection</p> <p>Politique de relèvement</p>
Vulnérabilité vue sous l'angle de facteurs de vulnérabilité	<p>Enjeux considérés non seulement comme éléments vulnérables mais également participant à l'adaptation</p> <p>Compréhension des conditions préexistantes à l'endommagement et les mécanismes transformationnels du territoire</p> <p>Possibilité de prendre en compte la perception de la population dans l'évaluation de la vulnérabilité</p> <p>Meilleure appréhension des impacts intangibles et directs (par exemple l'impact de la destruction d'un monument culturel) et des impacts intangible et indirects (par exemple l'impact psychologique)</p>	<p>Compréhension de la vulnérabilité passive et active</p> <p>Repérages des zones de plus grande fragilité physique, socio-économique et environnementaux sur le territoire</p> <p>Compréhension des choix sociétaux modifiant la vulnérabilité</p> <p>Apprentissage issu des dynamiques sociétales passées pour anticiper le futur</p> <p>Ajustement des politiques</p> <p>Outils de mesure des efforts d'adaptation des décideurs dans la réduction de la vulnérabilité</p>	<p>Politique de prévention</p> <p>Politique d'intervention d'urgence</p>

1.4 POURQUOI ETUDIER LA TRAJECTOIRE DE LA VULNERABILITE AUX INONDATIONS ?

Pour comprendre les changements globaux qui ont façonné la vulnérabilité aux inondations au fil du temps d'une communauté dans son territoire, il faut recourir à la notion de trajectoire de la vulnérabilité aux inondations. La trajectoire traduit un « enchaînement de processus qui définit une évolution spécifique à chaque territoire et dans des temporalités pouvant être variables » (Baud & Bonnemains, 2018). Les processus sont constitués de dynamiques territoriales et sociétales et leurs interactions. Ainsi, la trajectoire de la vulnérabilité est définie comme un « enchaînement dans le temps de facteurs d'altération de l'organisation des sociétés et de leurs relations avec l'environnement » (Rebaï et Alvarado Vélez, 2018). La trajectoire donne un caractère dynamique et temporel à la vulnérabilité (Baud & Bonnemains, 2018). Elle peut montrer les points de rupture dans les dynamiques territoriales liés aux chocs internes et externes des territoires (Baud & Bonnemains, 2018). La compréhension de la vulnérabilité des sociétés dans le monde est cruciale pour comprendre les tendances historiques du risque lié aux inondations et pour produire des projections précises des décès et des pertes (Jongman *et al.*, 2015).

Très peu d'auteurs ont étudié la trajectoire de la vulnérabilité. Certains l'ont appréhendée sous l'angle de l'endommagement (Mechler & Bouwer, 2015 ; Bankoff G. 2007 ; Bouillon *et al.*, 1999) et d'autres sous l'angle de facteurs de vulnérabilité (Guipponi *et al.*, 2013 ; Duvat *et al.*, 2017 ; Magnan *et al.*, 2012 ; Deudon, 2016 ; Tomety *et al.*, 2017). Les articles consultés donnent un panorama de divers territoires questionnés par la problématique de la trajectoire de la vulnérabilité à différents aléas dont les inondations, qu'ils soient situés au Québec, en France, dans les pays insulaires du pacifique (Tuvalu, Kiribati, Iles Marshall, Iles Salemon, Vanuatu, Iles Cook), au Bangladesh, au Burkina Faso et dans la région himalayenne de l'île de Tortola (îles Vierges britanniques). Dans chaque cas, la trajectoire de la vulnérabilité a été abordée de façon holistique, dynamique et globale pour montrer la double notion relative de la vulnérabilité par rapport au contexte d'une part,

et par rapport au temps, d'autre part. Comment toutes ces différentes données ont permis de reconstituer la trajectoire de la vulnérabilité aux inondations et pourquoi recourir au concept de la trajectoire de la vulnérabilité aux inondations sur un territoire ?

Tout d'abord, l'article de Bankoff (2007) met en avant le recours au concept de la trajectoire de la vulnérabilité pour faire des comparaisons entre les communautés d'une part, et au sein d'une même communauté d'autre part. Cette perspective comparative ne part pas de l'hypothèse que l'approche d'une culture donnée est supérieure à toutes autres mais permet d'apprendre les façons dont les populations ont géré le risque dans le temps et dans l'espace. En se focalisant sur des processus qui ont conduit les populations à être à risque et sur la façon dont elles ont réagi avec la vulnérabilité qui en résulte, les catastrophes fournissent la mesure d'évaluer comment les sociétés se sont adaptées avec succès à leur environnement. L'auteur poursuit en soulignant que la vulnérabilité n'est pas de déterminer seulement les conditions non sécuritaires dans le présent, mais aussi de comprendre l'importance de la signification de l'évaluation de l'exposition aux aléas des populations passées. La comparaison des vulnérabilités nous encourage à voir les catastrophes, par exemple les événements d'inondations dommageables, non seulement, comme de purs événements destructeurs dans le court terme mais également, de les considérer comme des agents transformateurs pour le long terme.

La contribution de Reinhard Mechler & Bouwer (2015) s'intéresse à la trajectoire de la vulnérabilité économique (les pertes matérielles) et à la vulnérabilité sociale (les pertes en vies humaines) liée aux inondations au Bangladesh. En se concentrant sur le rôle de la vulnérabilité dans la détermination des pertes liés aux futurs risques de catastrophes et en comparant les scénarii dynamique et statique de la vulnérabilité, les auteurs ont montré à travers une étude de cas de modélisation des pertes observées et projetées des inondations fluviales au Bangladesh qu'en l'absence de quantifications dynamiques de vulnérabilité, les études sur les pertes futures dues au changement climatique peuvent surestimer les pertes futures.

Les travaux de Deudon (2016) sur la trajectoire de la vulnérabilité ont permis de faire une comparaison historique de la vulnérabilité entre la vallée de l'Escaut en France et la vallée du Saint-Laurent au Canada entre les XVIIe et XIXe siècles. Ces travaux ont identifié les points communs et les contrastes entre les différentes périodes dans les processus de construction de la vulnérabilité des deux territoires.

Duvat *et al.* (2017) ont reconstitué la trajectoire de l'exposition et de la vulnérabilité des petites îles du pacifique au changement climatique. Leurs travaux ont mis en avant l'existence des effets de dépendance anthropogénique de trois périodes successives dans le changement de la trajectoire de l'exposition et de la vulnérabilité. Ils concluent que l'analyse de la dimension temporelle de l'exposition et de la vulnérabilité constitue une condition préalable à la science afin d'être en mesure d'éclairer les processus politiques et décisionnels en vue d'une adaptation robuste.

Dans leur article, Guipponi *et al.* (2013) ont analysé la trajectoire anticipée de la vulnérabilité aux inondations dans les scénarios AB1 et B1 des scénarios d'émission du rapport spécial du GIEC de la région himalayenne. Ils ont montré l'impact des trajectoires des différentes variables de leur modèle, basé sur une approche participative, sur la trajectoire de la vulnérabilité afin de déterminer la tendance de la vulnérabilité aux inondations à l'horizon 2050.

Au Burkina Faso, les travaux de la trajectoire de la vulnérabilité aux inondations dans la ville de Dori de Tomety *et al.* (2017) ont mis en exergue l'accroissement de la vulnérabilité engendré par les effets inattendus des politiques d'aménagement. Cette étude a montré que pour les questions d'attribution des parcelles d'habitation dans les zones non exposées aux inondations aux personnes à risque d'inondation, certaines personnes se sont volontairement installées dans les zones inondables afin de se faire recenser en vue d'être qualifiées pour ces terrains d'habitation attribués par la municipalité de Dori. Entre la période de l'annonce de la politique municipale et sa mise en œuvre effective, les personnes à risque ont été victimes d'une grande inondation accentuant le degré de vulnérabilité de la ville pendant cette période malgré les bonnes intentions des autorités municipales à réduire le risque lié aux inondations.

Magnan *et al.* (2012) ont utilisé la démarche du programme VulneraRE dans l'île Tortola. Cette démarche consiste dans un premier temps à appréhender les trajectoires de la vulnérabilité à travers l'évaluation de la vulnérabilité actuelle et passée pour reconstituer les trajectoires de la vulnérabilité. Dans un deuxième temps, la démarche consiste à comprendre ces trajectoires de la vulnérabilité à travers l'analyse par pas de temps et l'analyse évolutive pour poser les bases de connaissance pour l'approche prospective. Enfin, cette démarche permet d'anticiper le futur à travers la synthèse des impacts du changement climatique, l'élaboration des scénarii d'évolution des trajectoires et de construire les stratégies d'adaptation et de réduction de la vulnérabilité future. La démarche met l'accent sur le dialogue opérant qui doit exister entre les décideurs et les gestionnaires sur l'acceptabilité et la faisabilité des scénarii afin d'élaborer un plan de réduction de la vulnérabilité sur le long terme.

Ces différentes études sur les trajectoires de la vulnérabilité ont montré le caractère dynamique, temporel et transformationnel de la vulnérabilité qui ne peut se focaliser sur un temps « t » donné (Baud & Bonnemains, 2018). L'analyse de la vulnérabilité par pas de temps intervient dans une démarche de la trajectoire de vulnérabilité afin d'appréhender la vulnérabilité du passé, comprendre la vulnérabilité du présent et anticiper sur la vulnérabilité du futur comme le décrivent Magnan et ses collaborateurs (2012) dans la structure de la démarche VulneraRE (figure 3). Cette figure conceptualise la notion de trajectoire de la vulnérabilité aux inondations et matérialise l'évolution spatio-temporelle de la vulnérabilité sur le territoire. La vulnérabilité future peut être construite à partir des scénarii possibles ou par concertation avec les acteurs pour retenir les scénarii souhaitables ou acceptables en adoptant des stratégies d'adaptation et de réduction de la vulnérabilité. La figure 3 montre également que la compréhension de la vulnérabilité se veut holistique vue sous l'angle des facteurs de la vulnérabilité.

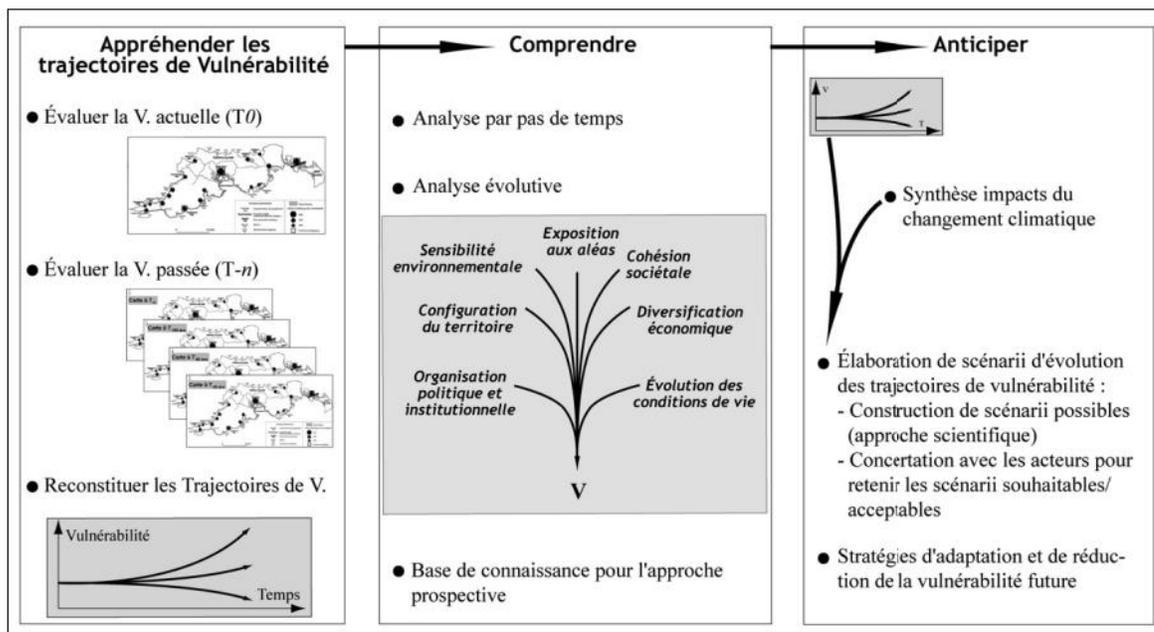


Figure 3. Trajectoire de vulnérabilité mettant en lumière les axes structurants de la démarche VulneraRE. © Magnan *et al.*, 2012. Reproduit avec permission.

L'analyse des trajectoires de la vulnérabilité revêt également une dimension prospective (Defossez *et al.*, 2018 ; Magnan *et al.*, 2012) pour les décideurs dans la construction des stratégies prospectives dans la gestion des risques naturels. Ainsi, les décideurs pourront avoir une grille de pensée systémique, globale et multidimensionnelle à travers l'identification des catalyseurs transformationnels du territoire, de certains effets inattendus des politiques sur la vulnérabilité sociale et environnementale et des facteurs aggravants des vulnérabilités afin d'indiquer des moyens alternatifs pour atténuer les événements à venir et/ou construire les stratégies d'adaptation durables. Elle permet aussi d'identifier des cycles d'aménagement, d'orientations politiques et des dynamiques socio-politiques historiques ayant entraîné des phénomènes de dépendance, de rupture ou de bifurcation dans l'évolution du territoire (Bruley *et al.*, 2012; Duvat *et al.*, 2021).

1.5 IMPORTANCE DE LA CARTOGRAPHIE DANS LA TRAJECTOIRE DE LA VULNERABILITE AUX INONDATIONS

Dans de nombreuses études en géographie des risques naturels, la cartographie a été utilisée comme outil de base pour la représentation spatiale du risque et ses composantes que sont l'aléa et la vulnérabilité. Elle constitue un outil d'aide à la décision et d'anticipation pour les décideurs dans la gestion des risques naturels, dans les missions d'aménagement et opérationnelles du risque ainsi que dans la réglementation (Givone, 1998). Elle sert également d'outil de quantification des incertitudes associées aux dommages estimés dans la gestion du risque lié aux inondations (Oubennaceur, 2017). Si la cartographie a contribué fortement dans les études de la trajectoire de l'aléa inondation à travers les modèles et prédire son évolution spatio-temporelle (Oubennaceur *et al.*, 2021 ; Hostache *et al.*, 2005 ; L'Homme, 2006), elle s'intègre lentement dans la trajectoire de la vulnérabilité aux inondations à travers des récentes études sur la trajectoire de la vulnérabilité (Liu & Shi, 2017 ; Magnan *et al.*, 2012 ; Duvat *et al.*, 2017 ; Duvat *et al.*, 2021 ; Giacona *et al.*, 2019). Elle permet, non seulement, de situer les connaissances préalables des phénomènes et régler l'occupation des sols dans la phase d'avant la crise, mais aussi, intervient dans la phase de la crise en indiquant les enjeux vitaux et les cheminements dans la gestion de la crise (Garry G., 1994). La cartographie sert à la planification, l'aménagement du territoire, la prospection, l'interprétation géomorphologique des zones inondables, la création d'atlas interactifs, à décrire des scénarios de catastrophes, renseigne sur les phénomènes historiques, la dynamique spatio-temporelle des aléas et de la vulnérabilité. De nos jours, la cartographie intègre de plus en plus la complexité des dynamiques sociétales nécessaires dans l'évaluation de la vulnérabilité et sa trajectoire pour répondre aux attentes de la société devenue de plus en plus exigeante aux regards de nouveaux instruments et logiciels d'information géographique disponibles et performants.

1.6 CONCLUSION

La reconstitution de la trajectoire de la vulnérabilité aux inondations vue sous l'angle de l'endommagement est privilégiée dans les politiques de protection contre les risques liés aux inondations. Dans de nombreuses situations, les décisions préliminaires sur les options des ouvrages de protection se basent en premier lieu sur leurs coûts de réalisation. L'analyse comparative des coûts-bénéfices de ces ouvrages de protection par rapport aux pertes qu'aurait engendrées une inondation sans la construction de ces ouvrages est savamment utilisée par les ingénieurs de construction pour démontrer la viabilité de leur projet sur le plan économique.

La reconstitution de la trajectoire de la vulnérabilité à travers les facteurs de vulnérabilité est importante dans les politiques préventives et d'intervention d'urgence. Elle explore les conditions préexistantes dans les sociétés et leurs expériences qui façonnent leur réaction face au risque. La compréhension de ces facteurs favorise la mise en place des politiques préventives qui tient compte de la dynamique de la société.

La trajectoire de la vulnérabilité est intrinsèquement un déclencheur d'interdisciplinarité car elle exige de trouver une connexion entre les sciences du passé, celles du présent et celles du futur (Magnan *et al.*, 2012). Visiter le passé à travers la reconstitution de la trajectoire de la vulnérabilité, contribue à comprendre les mécanismes transformationnels du territoire, la dynamique des sociétés et les changements menant à l'état de la vulnérabilité actuelle dans la perspective d'orienter le futur.

CHAPITRE 2

TRAJECTOIRES DE LA VULÉRABILITÉ AUX INONDATIONS

2.1 RESUME EN FRANÇAIS DE L'ARTICLE

La reconstitution de la trajectoire de la vulnérabilité aux inondations d'une communauté dans son territoire explique les tendances précédentes des processus et des déterminants clés de la vulnérabilité dans le passé, mène à une compréhension de la vulnérabilité du présent tout en posant des bases pour son évolution possible dans le futur. L'évaluation de la trajectoire de la vulnérabilité aux inondations, basée sur la construction des indices de vulnérabilité utilisant les indicateurs d'exposition, de sensibilité et d'adaptation, révèle les variables les plus importantes contribuant à varier la vulnérabilité dans le temps dans les corridors fluviaux des rivières Cascapédia et petite Cascapédia. L'évolution de l'exposition des bâtiments dans la zone d'inondation étudiée a accru la vulnérabilité dans le corridor de la rivière petite Cascapédia tandis qu'elle est restée quasi stationnaire dans celui de la rivière Cascapédia. Cette étude expose également le caractère dynamique, temporel et transformationnel de la vulnérabilité. Les cartographies de vulnérabilité générées en maillages de 200 m x 200 m et les enquêtes sur le terrain ont permis de mieux appréhender les changements globaux qui ont contribué à l'évolution de la vulnérabilité aux inondations et de comprendre la nature de la vulnérabilité aux inondations. Cette analyse permettra aux décideurs d'anticiper le futur pour une planification concrète de l'adaptation et des mesures de prévention.

Cet article, intitulé « *Trajectoires de la vulnérabilité aux inondations* », fut rédigé par moi-même en tant que premier auteur. Le professeur Thomas Buffin-Bélanger et la professeure Isabelle Thomas ont contribué à m'accompagner dans l'application de la rigueur

scientifique, à m'orienter vers les ressources documentaires spécifiques et à la révision de l'écriture de cet article. Cet article sera traduit en anglais puis soumis au journal *Flood Risk Management* durant l'été 2022. Une version abrégée de l'article a été présentée au webinaire du *Réseau Inondations InterSectoriel du Québec* en mars 2022 et au *16^e colloque sur les risques naturels au Québec* lors du *89^e congrès de l'ACFAS* en mai 2022 au Québec.

2.2 INTRODUCTION

Le risque lié aux inondations évolue avec le temps selon les changements conjoints ou individuels de l'aléa et de la vulnérabilité, deux composantes essentielles de la définition du risque. On reconnaît que la vulnérabilité peut être analysée à différentes échelles dans l'espace (Fekete *et al.*, 2010) et présente un aspect externe concernant l'exposition au danger et un aspect interne relatif au fait d'être sans défense (Chambers, 1989, 1995) qui peuvent changer dans le temps. La genèse de la vulnérabilité présente appartient au passé (Bankoff, 2007 ; Birkmann, 2006). Le recours à la notion de trajectoire de la vulnérabilité reconnaît ce caractère changeant dans le temps (Baud & Bonnemains, 2018 ; Deudon, 2016, Liu & Shi, 2017 ; Duvat *et al.*, 2017 ; Duval *et al.*, 2021). Les études sur la vulnérabilité aux inondations ont longtemps focalisé sur la vulnérabilité en un temps « t » donné mais la trajectoire de la vulnérabilité aux inondations fait progressivement son parcours car elle offre un cadre d'analyse adéquat pour mieux appréhender le caractère dynamique de la vulnérabilité (Baud & Bonnemains, 2018). Très peu d'études existent sur la trajectoire de la vulnérabilité aux inondations (Bankoff, 2007 ; Magnan *et al.*, 2012 ; Baud & Bonnemains, 2018 ; Deudon, 2016, Liu & Shi, 2017 ; Duvat *et al.*, 2017 ; Duval *et al.*, 2021 ; Tomety *et al.*, 2017 ; Armstrong & Lazarus, 2019 ; Zischg *et al.*, 2018). Ces études sur la trajectoire offrent un éclairage sur la contribution de la trajectoire dans la compréhension et la réduction du risque ainsi que le rehaussement de la résilience. Elles mettent en lumière le dialogue opérant qui doit exister entre les décideurs et les gestionnaires sur l'acceptabilité et la faisabilité des scénarii d'évolution pour élaborer les adaptations sur le long terme (Magnan *et al.*, 2012, Guipponi *et al.*, 2013) en se basant sur les tendances historiques de la vulnérabilité aux inondations (Jongman *et al.*, 2015). La trajectoire permet également de déceler les effets inattendus dans le comportement humain face aux interprétations biaisées des politiques de prévention par les populations (Tomety *et al.*, 2017) et de déterminer les différentes périodes marquant le changement dans les dynamiques territoriales dans la vulnérabilité du territoire (Baud & Bonnemains, 2018 ; Deudon, 2016). La reconstitution de la trajectoire de la

vulnérabilité a l'avantage de faire des comparaisons au sein d'une même communauté ou entre les communautés différentes à travers le temps dans le but de comprendre les processus ayant conduit à leurs états de vulnérabilité et les différentes stratégies mises en place dans la réduction du risque lié aux inondations (Bankoff, 2007).

La trajectoire de la vulnérabilité se définit comme « un enchaînement dans le temps de facteurs d'altération de l'organisation des sociétés et de leurs relations avec l'environnement » (Rebaï & Alvarado Vélez, 2018). Trois approches méthodologiques existent pour étudier la trajectoire de la vulnérabilité aux inondations dans un espace terrestre donné : (i) elle peut être étudiée sur des zones d'inondations vécues correspondant chacune à une période de retour vécue dans le passé (eg. Bouillon *et al.*, 1999), (ii) sur des zones d'inondations modélisées selon différentes périodes de retour (e.g. Liu & Shi, 2017 ; Armstrong & Lazarus, 2019 ; Zischg *et al.*, 2018) ou encore (iii) sur une seule zone d'inondation statique modélisée ou vécue. La trajectoire étudiée sur différentes étendues d'inondations vécues est qualifiée de « trajectoire historique sociétale » (Bankoff, 2007) et concerne davantage les catastrophes. Elle est reconstituée à travers les catastrophes vécues dans le passé. La trajectoire étudiée sur les zones inondables modélisées évalue la vulnérabilité selon plusieurs zones d'inondations correspondant aux différentes périodes de retour des débits de crues. Elle met en évidence à la fois les variations de la vulnérabilité pour un temps « t » donné selon une gamme de débit et l'évolution de toutes ces variabilités de la vulnérabilité dans le temps. La trajectoire étudiée sur une zone d'inondation statique modélisée ou vécue explore davantage l'évolution dans le temps de l'utilisation du sol et des enjeux sur le territoire lorsque croisés avec cette zone d'inondation.

La ville de New Richmond et la municipalité de Cascapédia Saint-Jules, situées dans l'Est du Québec, ont expérimenté plusieurs inondations récemment : les événements d'inondations du 14 décembre 2010, de 6 mai 2011, du 8 mai 2017 et du 2 décembre 2020 ont marqué les populations dans la ville de New Richmond (MSP, 2019). La municipalité de Cascapédia Saint-Jules a été aussi affectée par les crues du 5 mai 2004, 6 mai 2011, 24 avril 2012 et du 8 mai 2017 (MSP, 2019). Ces événements d'inondations, à l'instar des grandes

inondations survenues dans plusieurs municipalités du Québec en 2017 et 2019, ont eu de graves conséquences sur les municipalités impactées et ont remis en cause les politiques de gestion préventives des risques liés aux inondations ainsi que les cartographies des zones inondables qui sont devenues caduques.

Il y a lieu de revisiter le passé pour appréhender les processus physiques et humains qui ont façonné la vulnérabilité afin de mieux orienter le futur. Quels sont alors les facteurs de vulnérabilité qui font varier la vulnérabilité dans le temps et dans l'espace dans les corridors fluviaux des rivières Cascapédia et petite Cascapédia? Le recours à la trajectoire de la vulnérabilité aux inondations trouve alors tout son sens et elle peut être analysée par endommagements potentiels (Bouillon *et al.*, 1999 ; Bryant *et al.*, 2022) ou par facteurs de vulnérabilité (Magnan *et al.*, 2012 ; Baud & Bonnemains, 2018 ; Deudon, 2016, Liu & Shi, 2017). La trajectoire de la vulnérabilité aux inondations dans cette étude est analysée sur une zone d'inondation simulée et statique de période de retour fixe. La zone d'inondation est définie par une inondation fluviale simulée de période de retour 350 ans afin de s'aligner sur les limites maximales des cartographies des zones inondables définies dans les lignes directrices du gouvernement du Québec.

C'est dans cette perspective que cette étude vise à évaluer la trajectoire de la vulnérabilité aux inondations dans le temps. Les objectifs spécifiques sont d'identifier les indicateurs les plus pertinents et leurs interactions et d'analyser l'évolution spatio-temporelle de la vulnérabilité. Cette étude contribue à poser les bases de réflexion sur la mise en place et l'utilisation de la trajectoire de vulnérabilité comme outil d'analyse prospective et d'appréhension de la vulnérabilité dynamique. L'approche de facteurs de vulnérabilité (exposition, sensibilité et capacité d'adaptation) est privilégiée afin de mieux connaître les conditions préexistantes, les processus et les facteurs qui font varier la vulnérabilité dans le temps dans la perspective de contribuer à l'orientation des nouvelles politiques préventives pratiques pour les gestionnaires. La trajectoire de la vulnérabilité aux inondations est appliquée, dans cette étude, sur les corridors fluviaux des rivières Cascapédia et petite Cascapédia dans la MRC de Bonaventure dans l'Est du Québec.

2.3 SITES A L'ETUDE

Les corridors fluviaux des rivières Cascapédia et petite Cascapédia se trouvent respectivement dans la municipalité de Cascapédia Saint-Jules et la Ville de New Richmond. Ces deux collectivités territoriales se trouvent dans la Municipalité Régionale de Comté (MRC) de Bonaventure au Québec. Les sites à l'étude représentant les zones potentielles exposées aux risques liés aux inondations sont représentés sur la figure 4. Les rivières Cascapédia et petite Cascapédia présentent des méandres dynamiques avec, pour la rivière petite Cascapédia, des tronçons de rivière divagante où la migration latérale et les avulsions sont nombreuses. Il existe également de nombreux embâcles de bois dans ces deux rivières provenant des nombreuses zones de recrutement le long des méandres dynamiques. Toutes deux se jettent dans la baie des Chaleurs et forment avec chacune d'elles une dynamique estuarienne à l'embouchure des deux rivières étudiées.



Figure 4. Les corridors fluviaux des rivières Cascapédia dans la municipalité de Cascapédia Saint-Jules et petite cascapédia dans la ville de New Richmond au Québec

L'étude des séries chronologiques des débits¹ journaliers des rivières Cascapédia et petite Cascapédia, respectivement sur les périodes de 1961 à 2021 et de 1966 à 2021 est utilisée pour l'analyse tendancielle des événements d'inondation mais aussi pour l'analyse fréquentielle des débits de récurrence. Les analyses fréquentielles ont permis de déterminer les débits correspondant aux périodes de retour de 2 ans, 20 ans, 100 ans et 350 ans. Ces différentes périodes de retour sont préconisées dans les lignes directrices du ministère des affaires municipales et de l'habitation du Québec afin d'orienter les futures politiques de prévention des risques liés aux inondations.

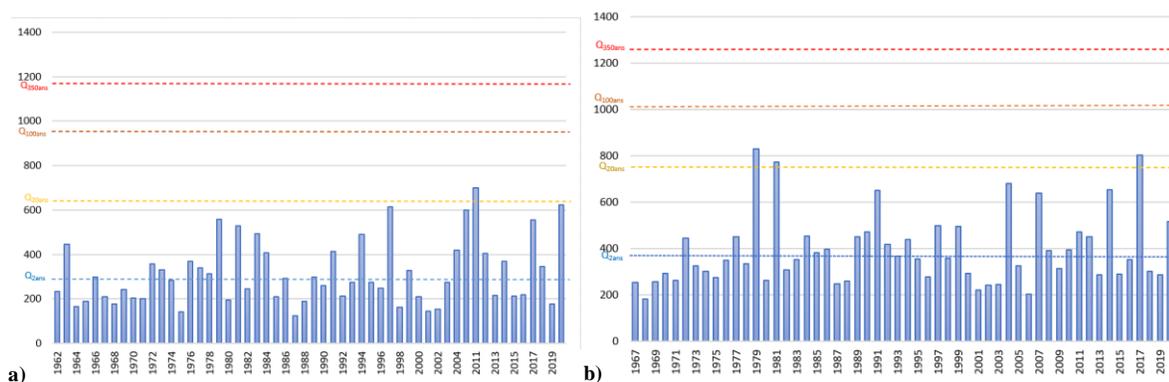


Figure 5. Histogramme des débits maximaux annuels journaliers moyens des rivières a) petite Cascapédia de 1962 à 2020 et b) Cascapédia de 1967 à 2020. Les lignes bleues, jaunes, oranges et rouges discontinues représentent les seuils de récurrences.

Les inondations maximales vécues dans les deux corridors ont une récurrence autour de 20 ans et que les inondations de récurrences 100 ans et 350 ans ne sont jamais survenues dans la période 1962-2020 (figure 5). Il y a eu 24 et 23 événements d'inondations

¹ Les débits de la rivière petite Cascapédia proviennent des stations hygrométriques n°010901 (septembre 1961 à juin 1981) et n° 010902 (juillet 1980 à septembre 2021) du centre d'expertise hydrique du Québec. Ceux de la rivière Cascapédia proviennent des stations hygrométriques n°011001 (octobre 1966 à septembre 1978) et n°011003 (août 1978 à septembre 2021) du même centre.

respectivement dans les bassins versants des rivières petite Cascapédia et Cascapédia dont les débits des rivières sont supérieurs au débit de récurrence 2 ans.

Sur le plan démographique, la ville de New Richmond et la municipalité de Cascapédia-Saint-Jules comptent respectivement 3 706 habitants soit 1665 ménages (2.2 personnes en moyenne par ménage) et 730 habitants soit 220 ménages (2.8 personnes en moyenne par ménage) (Statistique Canada, 2016). La population est concentrée le long de la côte et le long des deux cours d'eau. On y dénombre 14,2% de personnes ayant entre 0 et 14 ans dans la ville de New Richmond et 16,4% dans la municipalité de Cascapédia Saint-Jules contre 16,3% pour la province de Québec. Parallèlement, les personnes âgées de plus de 64 ans représentent respectivement 24,9% et 21,9% de la population de la ville de New Richmond et de la municipalité de Cascapédia Saint-Jules contre 18,3% dans la province de Québec. Ces deux localités étudiées présentent une proportion des personnes âgées dépassant la moyenne provinciale. L'ensemble des personnes âgées de plus de 64 ans et les enfants de moins de 15 ans correspond aux groupes de personnes les plus vulnérables aux risques liés aux inondations car ayant des caractéristiques de mobilité réduite pour les deux groupes de personnes. De plus, les jeunes enfants sont fortement dépendants des adultes tandis que les personnes âgées ont une dépendance relative au regard de leurs forces physiques fébriles.

Concernant l'économie, la ville de New Richmond constitue la deuxième force économique de la MRC de Bonaventure avec 250 places d'affaires (Ville de New Richmond, 2020). Par ailleurs, toutes les deux villes sont traversées par la route 132, un axe routier hautement stratégique au regard de son important trafic pour toutes les MRC de l'Est du Québec. Ces deux collectivités territoriales se trouvent dans la municipalité régionale de comté de Bonaventure.

2.4 METHODES

2.4.1 Évaluation de la vulnérabilité aux inondations

2.4.1.1 Base conceptuelle de l'évaluation de la vulnérabilité aux inondations

L'étendue de la zone d'analyse de la vulnérabilité aux inondations est une zone inondable correspondant à une crue potentielle simulée de période de retour 350 ans à partir d'un modèle hydraulique HEC-RAS développé pour les deux corridors fluviaux dans le cadre d'un projet de mise à jour des cartographies des zones inondables dans la MRC (Buffin-Bélanger *et al.*, 2022). La zone d'inondation considérée est inconnue des acteurs et de la population de la MRC de Bonaventure. Cette zone d'inondation a été subdivisée par maillages de 200 m x 200 m. La vulnérabilité est évaluée sur chacune des 139 mailles dans le corridor de la rivière petite Cascapédia et sur chacune des 54 mailles dans celui de la rivière Cascapédia qui contiennent des enjeux. Les dimensions des mailles de 200 m x 200 m retenues sont, à la fois, suffisamment petites pour permettre une analyse ciblée et détaillée de la vulnérabilité avec un niveau de précision nécessaire pour la planification efficace de l'adaptation dans une zone peu densément peuplée et suffisamment grandes pour permettre une agrégation de l'utilisation des données primaires (issues des enquêtes) garantissant la confidentialité des données personnelles. De plus, le maillage est adapté pour agréger les indicateurs d'exposition de type surfacique (bâtiments), de type linéaire (réseaux routiers, ferroviaires, d'aqueducs, d'égouts et électriques) et de type ponctuel (personnes). Par ailleurs, le maillage de 200 m x 200 m a été utilisé dans les travaux de Thomas et ses collaborateurs (2017) dans certaines municipalités du Québec pour l'analyse de la vulnérabilité aux inondations. D'autres échelles spatiales sont également utilisées pour la trajectoire de la vulnérabilité par exemple à l'échelle d'un territoire (eg. Deudon, 2016 ; Duvat *et al.*, 2017 ; Magnan *et al.*, 2012) ou par maillages plus réduits dans les zones à forte densité d'enjeux (eg. Liu & Shi, 2017). Tous les indicateurs construits à l'intérieur de la zone d'inondation s'appliquent aux enjeux effectivement présents, établis et recensés dans la zone d'inondation considérée. Tous les indicateurs construits sur l'ensemble de la municipalité

dont dépend la zone d'inondation sont des indicateurs liés aux services d'urgence s'appliquant aux enjeux de la municipalité pendant la survenue de l'inondation pour la gestion de la crise.

Le pas de temps décennal est retenu pour mieux appréhender les changements survenus dans le territoire. Ainsi, les périodes considérées sont de 1976-1986, 1987-1996, 1997-2006, 2007-2016 et les différents indices de vulnérabilité sont générés pour les années 1986, 1996, 2006 et 2016 qui récapitulent les changements intervenus pendant la décennie considérée. Ces années sont choisies pour coïncider avec les données démographiques et socio-économiques réalisées par Statistique Canada et utilisées dans cette étude. Le retour dans le passé jusqu'à l'année 1976 comme le début de la trajectoire de la vulnérabilité a permis de faire intervenir la mémoire collective de la société, ainsi que les mémoires individuelles des personnes pour mieux renseigner sur les indicateurs provenant des données d'enquêtes et qui sont basées sur les expériences collectives et personnelles et la culture du risque liées aux événements d'inondations observés sur leur territoire. De plus, les données socio-économiques sur les secteurs de dénombrement ne sont pas disponibles pour la décennie 1966 - 1976. Elles ne sont disponibles qu'à partir de l'année 1971 dans la base de données de Statistique Canada.

Les indicateurs sont développés pour la zone d'inondation considérée mais certains indicateurs d'adaptation sont construits au niveau de la municipalité dont dépend la zone d'inondation utiles dans la phase de la crise (figure 6).

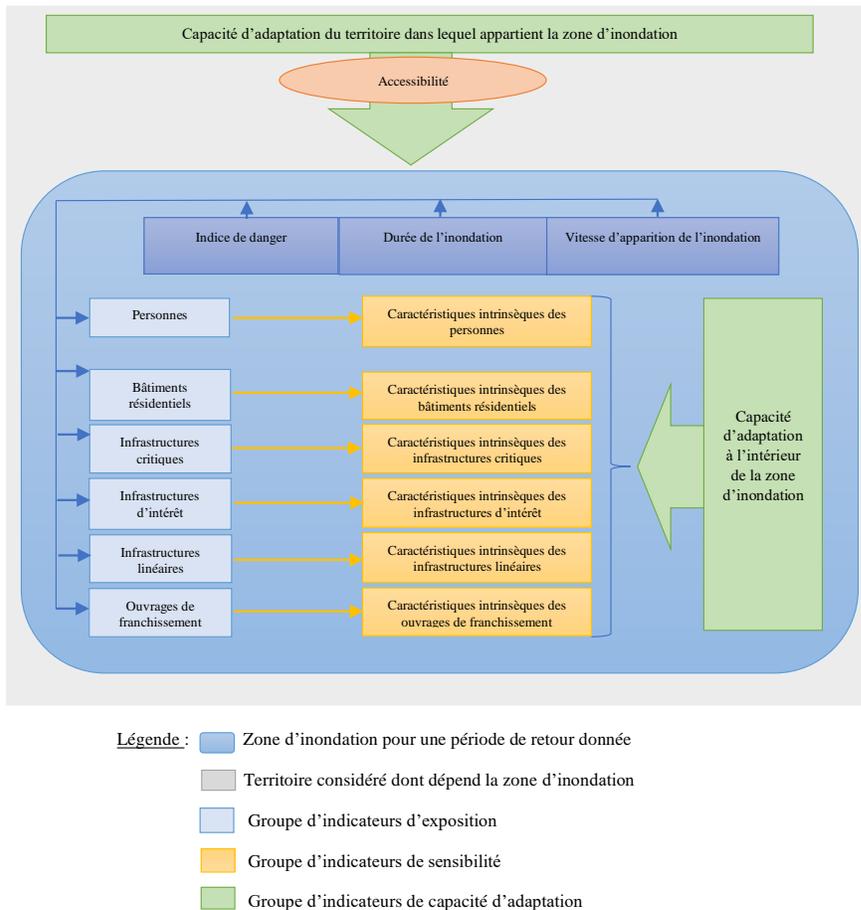


Figure 6. Base conceptuelle de l'évaluation de la vulnérabilité aux inondations

Les indicateurs d'exposition sont distincts et représentent les groupes d'enjeux exposés à l'inondation. Les personnes, les bâtiments et les ouvrages de franchissement sont dénombrés tandis que les infrastructures linéaires sont exprimées en mètre. Il n'existe pas de double comptage pour les indicateurs d'exposition. Nous faisons l'hypothèse que les personnes exposées se trouvent dans leurs résidences avant le début de l'inondation. Les bâtiments, les personnes, les ouvrages de franchissement, les routes, les chemins de fer, les égouts, les aqueducs, les lignes électriques représentent les groupes d'enjeux exposés. Les bâtiments principaux et ses annexes ont été digitalisés en éléments surfaciques et

géoréférencés à partir de la photographie aérienne de 2016 fournie par le ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques du Québec. Les caractéristiques des bâtiments tels que le nombre d'étages, l'année de construction, le nombre de logements, proviennent des bases de données du rôle d'évaluation 2018 de la MRC de Bonaventure et du cadastre. Les données géoréférencées des infrastructures linéaires (routes, aqueducs, égouts, lignes électriques et chemin de fer) sont issues de la base de données AQ réseaux et de la MRC de Bonaventure.

Les indicateurs de la sensibilité de la zone sont indiqués sous forme d'un pourcentage en fonction des caractéristiques fonctionnelles ou intrinsèques des enjeux par rapport aux groupes d'enjeux exposés correspondants dans la maille. Par exemple l'indicateur « pourcentage de bâtiments avec les cotes critiques atteintes » est le rapport, exprimé en pourcentage, du nombre des bâtiments ayant leurs cotes critiques atteintes par l'inondation sur l'ensemble des bâtiments de la maille. Les cotes critiques de submersion des bâtiments et des ouvrages de franchissements (ponts et ponceaux) ont été relevées par le DGPS, avec une précision altimétrique centimétrique, lors des campagnes de terrain. Les indicateurs de la sensibilité sociale sont indiqués en pourcentage en fonction des caractéristiques intrinsèques de la population dans la maille (par exemple pourcentage de la population de plus de 65 ans sur l'ensemble de la population dans la maille). L'analyse des données socio-économiques a été réalisée sur l'aire de diffusion pour les années 2006 et 2016 et sur les secteurs de dénombrement pour les années 1986 et 1996 puis transposée sur l'échelle de représentation de maillage 200 m x 200 m dans le calcul des indices de la vulnérabilité. Les secteurs de dénombrement ont été remplacés par les aires de diffusion pendant le recensement de 2001 par Statistique Canada. Les indicateurs de sensibilité peuvent ne pas être distincts car un enjeu peut être affecté par plusieurs fragilités.

Les indicateurs d'adaptation sont de trois types : les indicateurs de la capacité d'adaptation à l'intérieur de la zone d'inondation, les indicateurs de la capacité d'adaptation au niveau de la municipalité et les indicateurs d'alerte. En effet, les indicateurs de la capacité d'adaptation à l'intérieur de la zone d'inondation concernent les bâtiments à plusieurs

niveaux, certaines caractéristiques socio-économiques des populations qui contribuent à renforcer la capacité à faire face à l'inondation pendant et après la crise. Les indicateurs d'alerte, issus des enquêtes sur le terrain, concernent les résidences couvertes par les alertes, le temps mis entre la réception de l'alerte et le début de la survenue de l'inondation et les résidences ayant pris des actions après la réception de l'alerte. Les indicateurs de la capacité d'adaptation à l'échelle de la municipalité représentent la capacité des services d'urgence hors zone d'inondation ou non affectées par les inondations de continuer à fonctionner, à fournir les services qui leurs sont demandés et être accessibles pour les populations affectées pendant la survenue de l'inondation. Il s'agit des indicateurs concernant la capacité de fonctionnement des services des sapeurs-pompiers, de la police et des centres de santé. Chacun des trois indicateurs de la capacité d'adaptation à l'échelle de la municipalité (services des centres de santé, de la police et des sapeur-pompiers) est construit à partir de l'équation 2. Ces indicateurs sont une combinaison des défaillances des infrastructures stratégiques et le dysfonctionnement de leur service. Les infrastructures des sapeurs-pompiers et de la police sont défaillantes si respectivement la hauteur de submersion est inférieure à 60 cm et 30 cm et non fonctionnel si ces seuils sont dépassés (Poulin *et al.*, 2012). Une infrastructure hospitalière est défaillante et non fonctionnelle dès que sa cote de submersion critique est atteinte.

$$CFi = \frac{B*(1-\frac{A}{P})}{P} * Pi \quad (\text{Eq.2})$$

Où CFi est l'indicateur de la capacité de fonctionnement des services des centres de santé ou des sapeurs-pompiers ou de la police dans la maille i ; Pi est la population inondée dans la maille i ; B est le pourcentage des infrastructures non inondées des centres de santé ou des sapeurs-pompiers ou de la police de la municipalité ; A est la population inondée dans la municipalité ; P est la population totale de la municipalité. Cette expression montre que si aucune infrastructure d'urgence n'est affectée par les inondations et aucune personne n'est affectée par les inondations, alors toutes les infrastructures sont aux services des populations et la valeur de l'indicateur est maximale. Si toutes les infrastructures d'urgence sont inondées alors il n'y a plus d'infrastructures d'urgence dans la municipalité accessibles aux

populations sinistrées et la valeur de l'indicateur est nulle. De même, l'indicateur prend une valeur nulle si toute la population est inondée. L'hypothèse initiale est de considérer que les infrastructures d'urgence existantes de la municipalité permettent un fonctionnement ordinaire avant la survenue de l'inondation. Les indicateurs d'adaptation sont soit en pourcentage, soit en ratio. Les indicateurs de la capacité d'adaptation retenus sont pour la plupart des proxys quantitatifs. D'autres indicateurs qualifiant cette capacité d'adaptation tels que les niveaux de zonage, de réglementaire, de la sensibilisation de la population, et d'infrastructures de protection peuvent être considérés (Drejza *et al.*, 2021).

L'indice de danger est le seul indicateur de la manifestation de l'aléa utilisé explicitement et il correspond dans chaque maille à la valeur maximale de l'indice de danger sur un bâtiment. Il est obtenu à partir d'un modèle hydraulique HEC-RAS d'une inondation de période de retour 350 ans. L'indice de danger est le produit de la vitesse par la hauteur d'eau et représente la force déstabilisatrice de l'eau sur les enjeux. L'indice de danger est donné par l'expression de l'équation 3 (HR Wallingford, 2006) :

$$HR = h * (V + 0,5) + DF \quad (\text{Eq.3})$$

Dans cette expression HR représente l'indice de danger, h est la hauteur d'eau de submersion en mètre, V est la vitesse de l'écoulement des eaux en mètre par seconde, DF est le facteur de débris qui peut prendre des valeurs 0, 0,5 ou 1 dépendant de la probabilité que les débris accroissent l'aléa de manière significative. L'indice de danger est appliqué aux bâtiments en période de crise. Les autres paramètres caractéristiques de la manifestation de l'aléa interviennent de manière implicite sur les indicateurs.

Tous les indicateurs développés sont de sens positif. L'analyse de la trajectoire de la vulnérabilité requiert l'utilisation d'un même type d'indicateurs pour toutes les périodes considérées pour une bonne comparaison entre les différentes périodes.

2.4.1.2 Développement des indicateurs

Le développement des indicateurs est basé sur les connaissances existantes dans la littérature sur la vulnérabilité aux inondations et adaptées au contexte des pays industrialisés. Les indicateurs utilisés dans l'analyse de la vulnérabilité sont sélectionnés suivant trois étapes. La première étape consiste à analyser les indicateurs utilisés dans les études récentes de vulnérabilité aux inondations de Thomas *et al.* (2017) avec 93 indicateurs, Barette *et al.* (2018) avec 19 indicateurs, Frini *et al.* (2019) avec 67 indicateurs, Choé *et al.* (2019) avec 6 indicateurs et Balica & Wright (2012) avec 32 indicateurs et de l'agence environnementale britannique (HR Wallingford, 2006) ainsi que ceux de l'Institut National de la Santé Publique du Québec (INSPQ, 2007). Les indicateurs préliminaires sélectionnés sont des indicateurs fréquemment utilisés dont les données existent ou sont faciles à collecter dans le contexte de cette étude. Ces indicateurs sont classés en fonction des facteurs de la vulnérabilité : exposition, sensibilité et capacité d'adaptation. En effet, la sélection des indicateurs démographiques et socio-économiques des facteurs de sensibilité sociale et de capacité d'adaptation au niveau de la zone d'inondation est basée sur les travaux de Thomas et ses collaborateurs (2017). Ils avaient réalisé une analyse en composante principale (ACP) pour sélectionner les indicateurs les plus pertinents et éviter les redondances. Les indicateurs d'alerte sont des indicateurs utilisés dans les travaux de HR Wallingford (2006) pour mesurer l'efficacité du système d'alerte aux inondations. Les indicateurs de la capacité de fonctionnement au niveau de la municipalité sont des indicateurs institutionnels relevant des services d'urgence qui sont mis en action à travers le numéro d'urgence 911. Les indicateurs de la sensibilité de la zone sont liés aux caractéristiques intrinsèques ou de fonctionnement des bâtiments et des infrastructures. Les indicateurs d'exposition sont liés aux types d'enjeux exposés dans la zone d'inondation et de l'indice de danger. Les indicateurs retenus devraient être non redondants au regard de la distinction de leurs sources de provenance et de l'ACP réalisée dans les études de Thomas *et al.* (2017) pour les indicateurs démographiques et socio-économiques.

La deuxième étape consiste à faire valider ces indicateurs par les acteurs concernés surtout la MRC de Bonaventure. Cette validation conforte d'une part le choix préliminaire des indicateurs et d'autre part, permet d'apporter des amendements substantiels aux indicateurs préliminaires en tenant compte des spécificités contextuelles des sites à l'étude. Cette deuxième étape met les acteurs concernés au cœur de l'action afin qu'ils contribuent et s'approprient des résultats de l'étude dans la gestion préventive des risques liés aux inondations.

La troisième étape consiste à s'assurer que les indicateurs décrivent et cadrent avec les enjeux réellement présents sur la zone d'étude. Cette effectivité des enjeux est réalisée au moyen des enquêtes sur le terrain et de la collecte des informations sur le dénombrement des enjeux se trouvant dans la zone d'inondation considérée.

Le processus du développement des indicateurs a conduit à sélectionner 11 indicateurs d'exposition dont un indicateur lié à la manifestation de l'aléa, 11 indicateurs de sensibilité de la zone, huit indicateurs de sensibilité sociale et 13 indicateurs d'adaptation (figure 7). Les autres paramètres de la manifestation de l'aléa (étendue de l'inondation, la hauteur d'eau, la vitesse d'apparition de l'inondation, la durée de l'inondation) ne constituent pas des indicateurs mais interagissent avec les autres indicateurs pour mieux les définir. Le nombre d'indicateurs sélectionnés (43 indicateurs) dans cette étude est relativement important en comparaison avec le nombre d'indicateurs utilisés par Balica et Wright (2012) avec 32 indicateurs et Barette *et al.* (2018) avec 19 indicateurs mais reste relativement faible par rapport au nombre plus important d'indicateurs utilisés par Frini *et al.* (2019) avec 67 indicateurs et Thomas *et al.* (2017) avec 93 indicateurs.

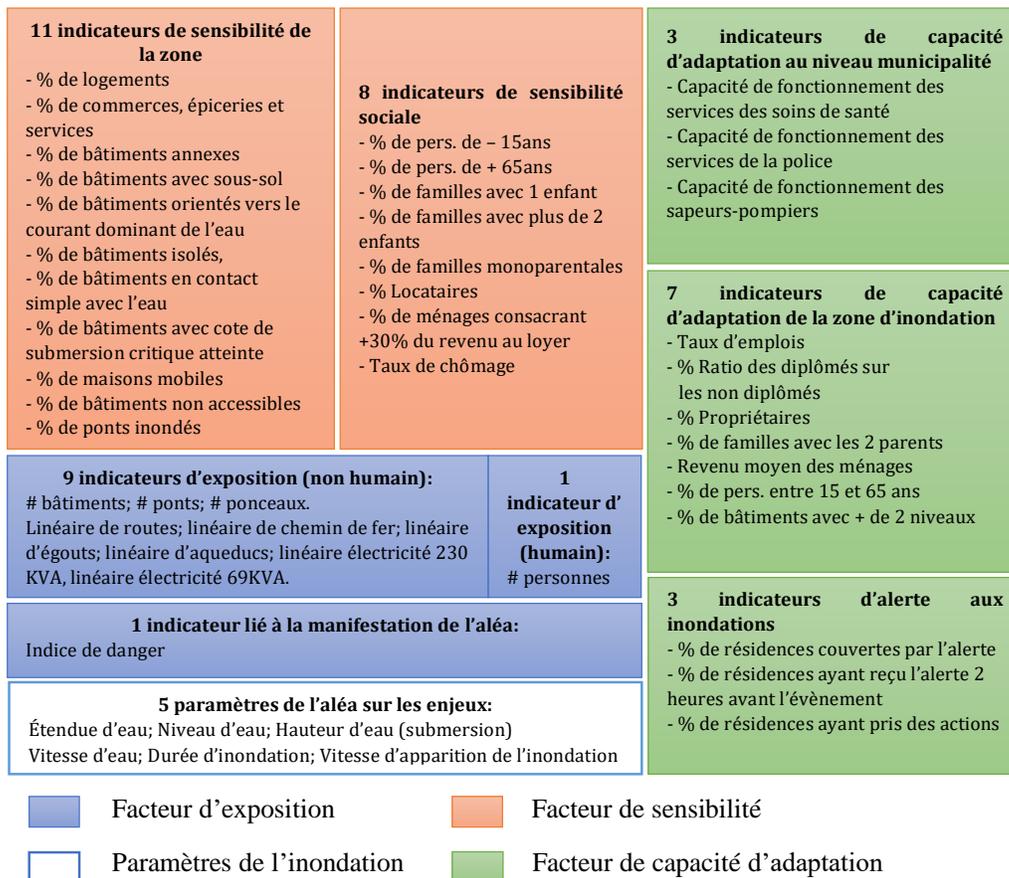


Figure 7. Indicateurs de vulnérabilité et paramètres de l'aléa retenus pour l'évaluation de la vulnérabilité et de sa trajectoire

2.4.1.3 Pondération des indicateurs

Tous les indicateurs de la sensibilité sélectionnés, qui représentent les caractéristiques intrinsèques des enjeux, n'ont pas la même importance pour les populations à risques d'inondations et par conséquent leur exposition à l'inondation entraîne un degré de fragilité différencié. La prise en compte de cette importance relative de ces indicateurs de sensibilité passe par leur pondération (Barroca *et al.*, 2005 ; Poulin *et al.*, 2012). Cette pondération peut

être réalisée par diverses méthodes allant du plus objectif au plus subjectif. Nous privilégions la méthode de la perception du public qui consiste à pondérer les indicateurs au regard des expériences vécues, des connaissances reçues et de fébrilité que les enjeux représentent sur le plan individuel ou collectif dans leur perte en cas d'inondation. Cet exercice se veut comme un des moyens pour prendre en compte la perception de la population dans l'évaluation de la vulnérabilité aux inondations. La pondération est réalisée sur une échelle numérique de 1 à 4 où 1 signifie que l'indicateur est moins important dans le calcul de la vulnérabilité et 4 représente l'indicateur le plus important dans le calcul de la vulnérabilité. La pondération finale de l'indicateur est la médiane des pondérations des experts, des gestionnaires et de la population de chaque collectivité territoriale. Le tableau 2 présente la pondération des acteurs dans les deux corridors.

Tableau 2
Pondération des indicateurs de sensibilité sociale et de la zone par les experts, les gestionnaires et la population

Indicateurs de sensibilité	Justification	Sources	Médiane des pondérations des acteurs pour le corridor de la rivière petite Cascapédia (n=12)	Médiane des pondérations des acteurs pour le corridor de la rivière Cascapédia (n=7)
Indicateurs de sensibilité sociale				
% Personnes moins de 15 ans	Moins mobiles, moins autonomes et dépendantes	Thomas <i>et al.</i> 2017	2,5	3
% Personnes de 65 ans et plus	Moins mobiles, plus fébriles et dépendantes	Cutter <i>et al.</i> 2003; thomas <i>et al.</i> 2017	4	4
% Familles avec 1 enfant	Plus sensible et requiert plus de ressources	Thomas <i>et al.</i> 1017	2	2
% Familles avec 2 enfants et plus	Davantage sensibles surtout lorsque ces familles doivent être déplacées et hébergées	Sherrieb <i>et al.</i> 2010; Thomas <i>et al.</i> 2017	2	2
% Familles monoparentales	Moins de ressources financières et sociales en temps de crise. Individus sensibles à gérer au sein de la famille	Sherrieb <i>et al.</i> 2010; Thomas <i>et al.</i> 2017	2	2
% Locataires	Pas de pouvoir décisionnel sur l'état de leur habitation qui pourrait engendrer une sensibilité accrue aux aléas	Cutter <i>et al.</i> 2003; thomas <i>et al.</i> 2017	1	1

% Ménages consacrant +30% de revenu au loyer	Plus de ressources aux coûts de l'habitation et plus de sensibilité en termes de rétablissement	Thomas & Bleau (2012)	2	2
Taux de chômage	Dépendants du gouvernement et gagnent très peu d'argent car les chômeurs ne possèdent pas d'emploi	Cutter <i>et al.</i> 2003; Sherrieb <i>et al.</i> 2010; Thomas <i>et al.</i> 2017	2,5	2
Indicateurs de sensibilité de la zone				
% Logements			3	3
% Commerces, épiceries et services			2	2
% Bâtiments annexes			1	1
% Bâtiments avec sous-sol			2,5	2
% Bâtiments orientés vers le courant dominant de l'eau			2	2
courants d'eau dominants	Pondération accordée aux différents bâtiments et infrastructures selon l'impact qu'aurait leur perturbation sur le bon fonctionnement de la société en cas d'inondation.	Réflexion basée sur les travaux de Fedeski & Gwilliam (2007); Thomas et Bleau (2012) et Thomas <i>et al.</i> 2017	2	2
% Bâtiments isolés			3	3
% Bâtiments en contact simple avec l'eau			4	4
% Bâtiments avec cote de submersion critique atteinte			2	2
% Maisons mobiles			2	2
% Bâtiments inaccessibles			3	3
% Ponts inondés			3	3

Seuls les indicateurs relatifs aux personnes de moins de 15 ans, au taux de chômage et aux bâtiments avec sous-sol ont été pondérés différemment dans les deux corridors. Le résultat des pondérations des autres indicateurs de sensibilité est identique pour les deux corridors. La prise en compte des perceptions dans l'évaluation de la vulnérabilité facilite l'engagement des acteurs dans les stratégies d'adaptation (Guillemot *et al.*, 2014 ; Hellequin *et al.*, 2013). Les personnes, dans l'évaluation de la vulnérabilité, sont considérées non seulement comme des enjeux vulnérables mais également comme des acteurs dans le processus de réduction de la vulnérabilité. Elles sont les mieux placées pour donner une appréciation sur les indicateurs

de sensibilité et à sélectionner les plus pertinents pour elles, car relevant directement de leur caractéristique socio-économique, de leur mémoire individuelle et collective, de leur culture du risque d'inondation et de l'importance qu'elles accordent aux éléments à risque.

Pour les indicateurs d'exposition et d'adaptation, la pondération est égale à 1 car ils sont considérés comme ayant le même poids au regard respectivement de leur caractère externe (influence de l'aléa sur le système) et interne (la capacité d'organisation et d'adaptation au sein du système). En ce qui concerne l'agrégation des indices de vulnérabilité, tous les facteurs d'exposition, de sensibilité et d'adaptation auront le même poids égal à 1 car chacun de ces facteurs entrant dans l'analyse de la vulnérabilité interagissent avec chacune des composantes sociale, économique et environnementale (y compris la dimension physique) qui relèvent du domaine du développement durable. Or, dans le développement durable, on ne peut se prévaloir qu'une composante est au-dessus de l'autre ou l'une est plus importante que l'autre (Dialga & Le, 2014).

2.4.1.4 Construction de l'indice de la vulnérabilité par addition d'indicateurs pondérés

La méthodologie utilisée pour la construction de l'indice de vulnérabilité est basée sur les orientations méthodologiques de Thomas (2017). L'indice de vulnérabilité aux inondations est calculé par addition d'indicateurs pondérés pour chacune des années 1986, 1996, 2006 et 2016 et les 5 étapes suivantes sont mises en œuvre.

Les indicateurs sont d'abord centrés réduits (équation 4) pour standardiser les unités de mesure.

$$Score_Z(xi) = \frac{xi - E(xi)}{\sigma(xi)} \quad (\text{Eq. 4})$$

Où $Score_Z(xi)$ est l'indicateur i standardisé dans la maille 200 m x 200 m, xi est la valeur de l'indicateur i dans la maille 200 m x 200 m, $E(xi)$ est la moyenne des valeurs de l'indicateur i et $\sigma(xi)$ est l'écart type des valeurs de l'indicateur i . Les moyennes et les

écarts-types sont calculés sur l'ensemble de chaque type d'indicateurs des années 1986, 1996, 2006 et 2016.

Ensuite, pour transformer les valeurs standardisées en valeurs positives, un changement d'échelle des indicateurs standardisés (Score_Z) en indicateurs échelle (Score_C) sur une échelle de 1 à 5 est réalisé (équation 5).

$$\frac{Score_C(x_i)-1}{5-1} = \frac{Score_Z(x_i)-Min(Score_Z(x_i))}{Max(Score_Z(x_i))-Min(Score_Z(x_i))} \quad (\text{Eq. 5})$$

Les indices d'exposition, de sensibilité de la zone, de la sensibilité sociale et d'adaptation sont alors calculés à partir des indicateurs respectifs (Figure 7) et l'agrégation de ces indices de facteurs de vulnérabilité en un indice de vulnérabilité est réalisé. Le tableau 3 expose les équations 6 permettant ces calculs et agrégation.

Tableau 3
Équation des indices de la vulnérabilité (Eq.6)

Indice d'exposition - <i>Iexp</i>	Indice de sensibilité sociale - <i>Iss</i>	Indice de sensibilité de la zone - <i>Isz</i>	Indice d'adaptation - <i>Iadpt</i>
$Iexp = \sum Score_C(x_i)$	$Iss = \sum (Score_C(x_i) * Z_i)$	$Isz = \sum (Score_C(x_i) * Z_i)$	$Iadpt = \sum Score_C(x_i)$
Indice de vulnérabilité - <i>Iv</i>			
$Iv = Iexp + (Iss + Isz) - Iadpt$			
<hr/>			
x_i est la valeur de l'indicateur i dans la maille de 200 m x 200 m			
Z_i est la pondération associée à l'indicateur i			
<hr/>			

Les indices des facteurs de vulnérabilité et l'indice de vulnérabilité sont finalement normalisés (Équation 7) et discrétisés en cinq classes selon le mode de ruptures naturelles

(Jenks) : très faible (0 à 0,079), faible (0,080 à 0,2060, moyen (0,207 à 0,396), élevée (0,397 à 0,683) et très élevée (0,684 à 1). Ces opérations permettent de représenter adéquatement sur une cartographie l'évolution spatio-temporelle par maillage de 200 m x 200 m de l'indice de vulnérabilité.

La normalisation des indices des facteurs de vulnérabilité (indice d'exposition, indice de sensibilité sociale, indice de sensibilité de la zone et l'indice d'adaptation) et de l'indice de la vulnérabilité est réalisée à l'échelle des corridors fluviaux pour toutes les périodes étudiées à partir de l'équation 7

$$\text{Indice normalisé} = \frac{\text{Indice}}{\text{Indice maximale}} \quad (\text{Eq.7})$$

La méthodologie de la reconstitution de la trajectoire de la vulnérabilité montrant les grandes étapes est résumée dans la figure 8.

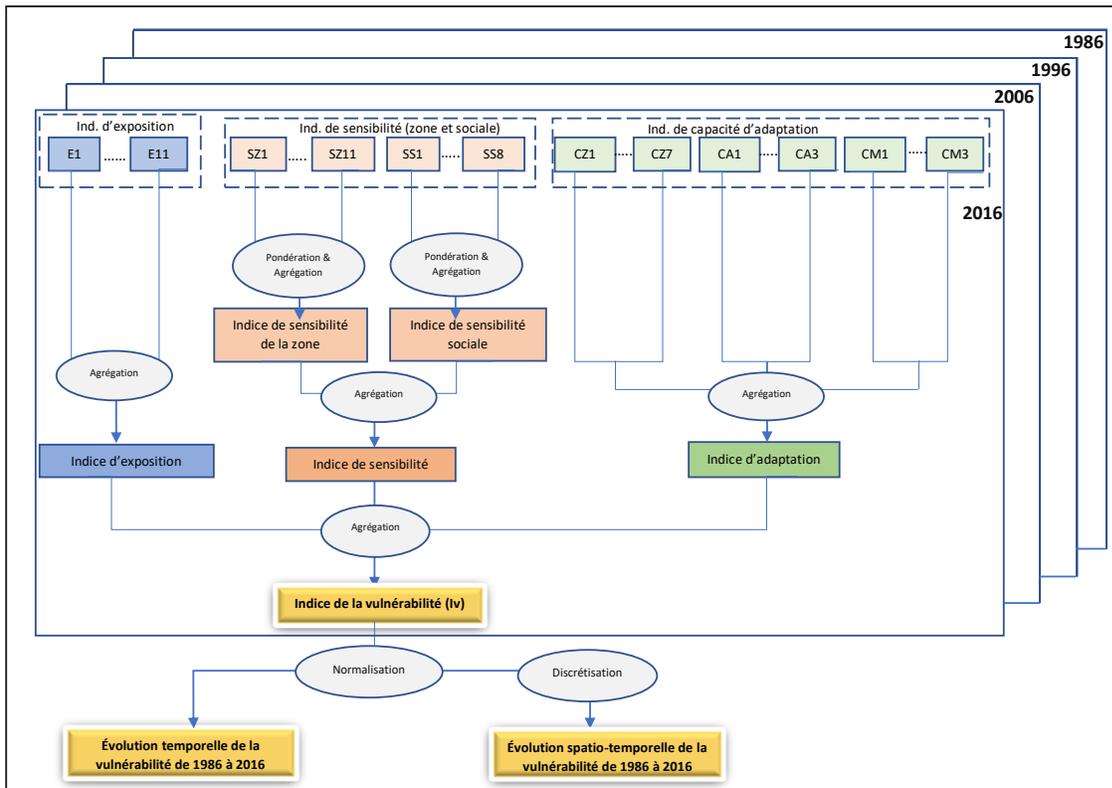


Figure 8. Schéma méthodologique de la reconstitution de la trajectoire de la vulnérabilité

2.4.2 Enquête sur le terrain

Trois questionnaires ont été construits en français et en anglais, validés par le laboratoire de la géomorphologie et de la dynamique fluviale de l'Université du Québec à Rimouski (UQAR) et la MRC de Bonaventure et ayant reçu une certification éthique de l'UQAR numéro CER-114-877. Les questionnaires ont été administrés en ligne, par téléphone ou par courrier à trois catégories d'acteurs pendant la pandémie de la covid 19 durant la période de février à novembre 2021. Le questionnaire Q1 (annexe I) a été administré aux personnes dont leurs résidences ont été affectées au moins une fois par les inondations. Le questionnaire Q2 (annexe II) a été administré aux personnes dont leurs

résidences n'ont pas été affectées par les inondations et vivant aux abords des zones inondables. Le questionnaire Q3 (annexe III) a été adressé aux gestionnaires municipaux et aux conseils de l'eau de la Gaspésie. Les participants s'autosélectionnent afin de compléter le questionnaire adapté à leur situation. Les thèmes abordés dans les questionnaires ont concerné la connaissance sur les inondations, l'alerte aux inondations, la notion de la trajectoire de la vulnérabilité, l'impact sur les propriétés et la pondération des indicateurs de sensibilité. Les périodes considérées dans la notion de trajectoire sont les périodes d'avant l'année 2000, entre 2000 et 2010 et après 2010 pour tenir compte des grands événements d'inondations durant ces périodes à travers lesquels les participants peuvent se référer dans leurs mémoires individuelles dans la facilitation de leurs réponses aux questionnaires.

2.5 RESULTATS

2.5.1 Évolution temporelle de la vulnérabilité globale aux inondations

Dans chacun des corridors, la trajectoire de la vulnérabilité aux inondations a varié (figure 9). En effet, l'indice de vulnérabilité a varié sur les périodes allant de 1986 à 1996, de 1996 à 2006 et de 2006 à 2016 respectivement de +12,3%, +5,0% et -2,6% dans le bassin versant de la rivière petite Cascapédia et de + 7%, -2,6% et -7% dans le bassin versant de la rivière Cascapédia.

Deux grandes périodes s'observent dans chacun des bassins versants. On observe une augmentation de la vulnérabilité entre 1986 et 1996 puis une diminution entre 1996 et 2016 dans le bassin versant de la rivière Cascapédia tandis qu'une augmentation est observée entre 1986 et 2006 suivie d'une diminution entre 2006 et 2016 dans le bassin versant de la rivière petite Cascapédia (figure 9).

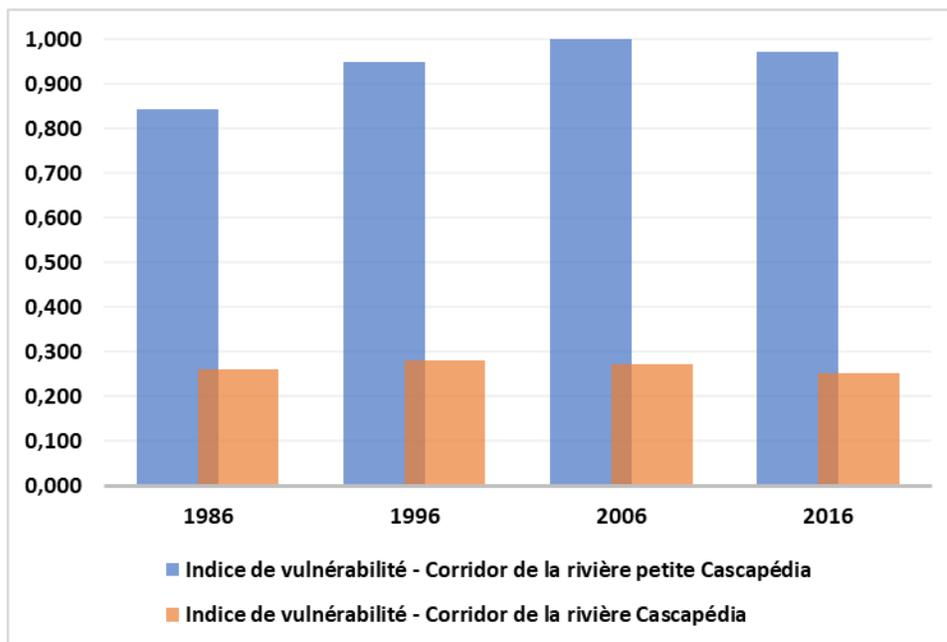


Figure 9. Évolution temporelle de l'indice de la vulnérabilité aux inondations dans les corridors fluviaux des rivières petite Cascapédia et Cascapédia dans la MRC de Bonaventure

2.5.2 Évolution spatio-temporelle de la vulnérabilité aux inondations

La cartographie spatio-temporelle de la vulnérabilité de maillage 200m x 200m révèle les zones les plus vulnérables et leurs transformations dans le temps (figures 10 et 11). Ainsi, la vulnérabilité a augmenté dans certaines mailles dans le temps. D'autres mailles présentent des vulnérabilités qui diminuent dans le temps. Dans le corridor de la rivière petite Cascapédia, on remarque cinq zones les plus vulnérables. Ce sont le domaine Lepage, la Boisée Napoléon, le Saint-Edgard, La zone du chemin du Saint-Edgard, et le centre-ville de New Richmond (figure 10a). La vulnérabilité a augmenté dans 11% des mailles, dans la zone du chemin du Saint-Edgard, du centre-ville et majoritairement concentrées dans le domaine Lepage et Boisée Napoléon et a diminué dans 23% des mailles majoritairement concentrées à Saint-Edgar, la zone du chemin du Saint-Edgar et dans le centre-ville de New Richmond dans le corridor de la rivière petite Cascapédia sur la période de 1986 à 2016 (figure 10).

L'exposition des bâtiments dans le corridor de la rivière petite Cascapédia a augmenté de 84,2% dans le domaine Lepage et de 91,6% dans la Boisée Napoléon (figure 10a) entre 1986 et 2016.

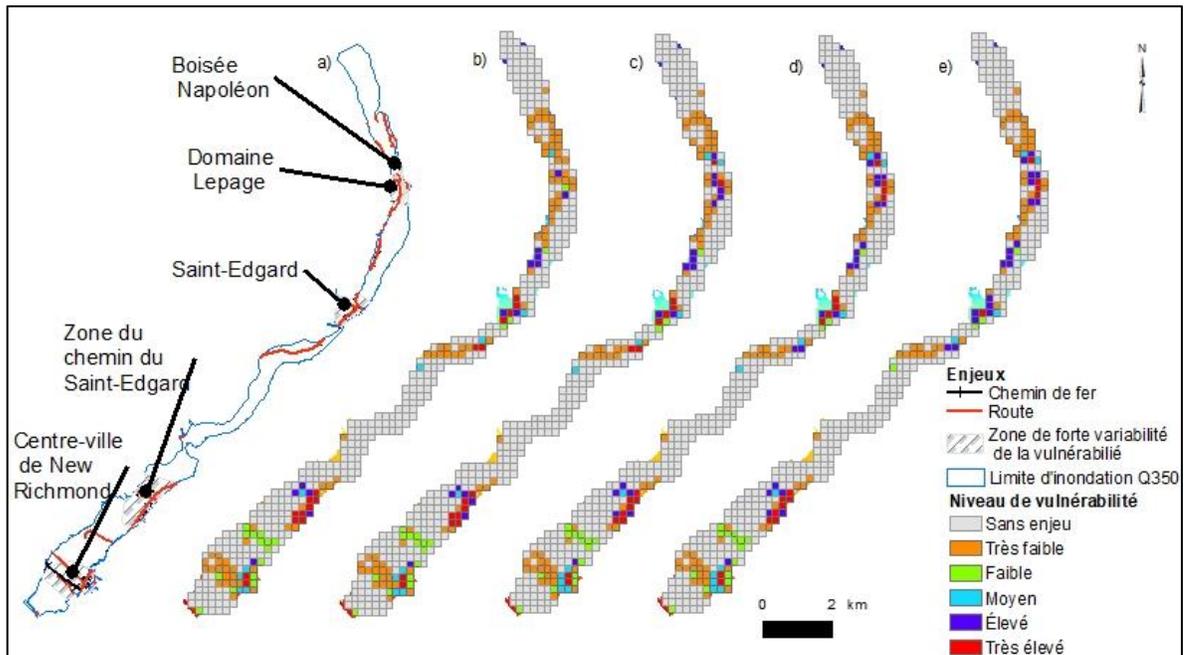


Figure 10. Évolution spatio-temporelle de l'indice de la vulnérabilité aux inondations mettant en exergue a) les zones de forte variabilité de la vulnérabilité pour les périodes b) 1986, c) 1996, d) 2006 et e) 2016 dans le corridor fluvial de la rivière petite Cascapédia dans la MRC de Bonaventure.

Dans le corridor de la rivière Cascapédia, on ne remarque que deux zones de forte vulnérabilité dénommées zone A et zone B (figure 11a). La vulnérabilité n'a augmenté que dans 2% des mailles localisées dans la zone A et a diminué dans 18,5% des mailles localisées également dans la zone A et B mais majoritairement concentrées dans la zone B dans le corridor de la rivière Cascapédia sur la même période (figure 11).

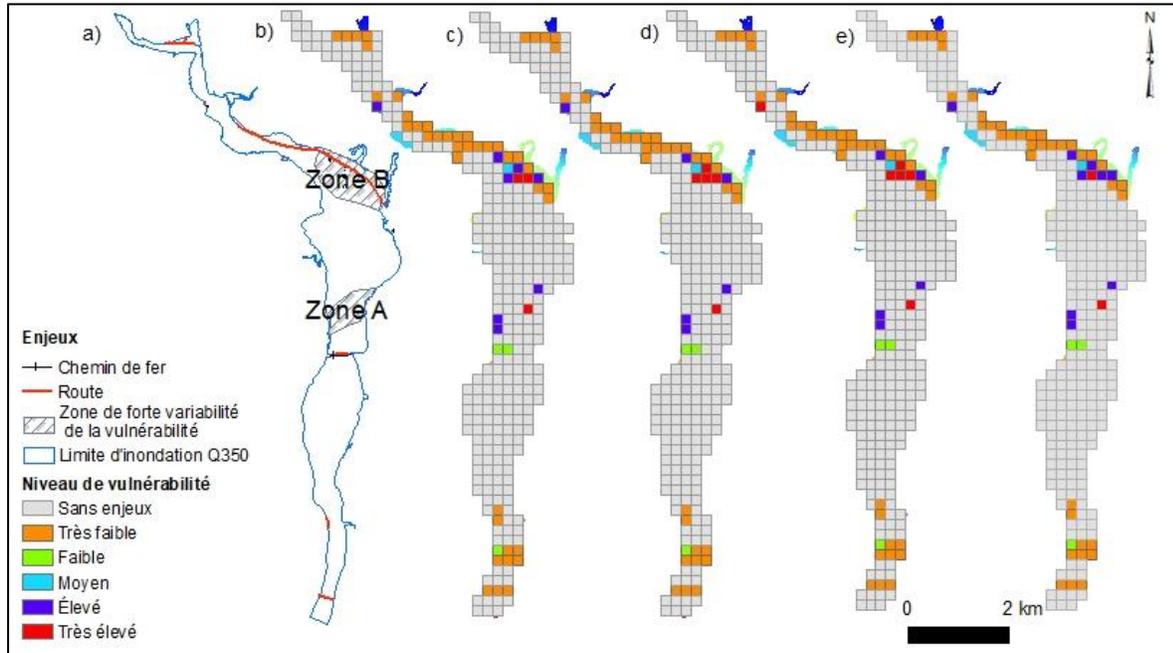


Figure 11. Évolution spatio-temporelle de l'indice de la vulnérabilité aux inondations mettant en exergue a) les zones de forte variabilité de la vulnérabilité pour les périodes b) 1986, c) 1996, d) 2006 et e) 2016 dans le corridor fluvial de la rivière Cascapédia dans la MRC de Bonaventure.

2.5.3 Évolution des indicateurs et des facteurs de la vulnérabilité aux inondations dans le temps

La figure 12 présente les trajectoires des facteurs de la vulnérabilité qui permettent de comprendre l'influence relative de leurs évolutions, leurs variabilités et leurs poids dans la trajectoire globale. Les trajectoires des facteurs de la vulnérabilité ont été dynamiques sur la période 1986 à 2016 à l'exception des trajectoires des facteurs d'exposition et de sensibilité de la zone qui sont restées statiques dans le corridor fluvial de la rivière Cascapédia.

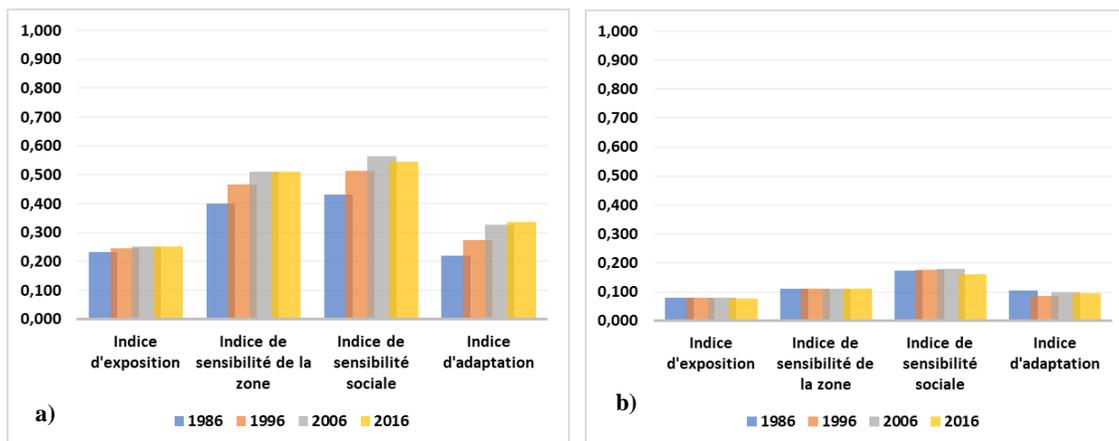


Figure 12. Évolution temporelle des indices des facteurs de vulnérabilité aux inondations dans a) le corridor de la rivière petite Cascapédia et b) corridor de la rivière Cascapédia

La trajectoire des facteurs d'exposition a augmenté dans le corridor fluvial de la rivière petite Cascapédia mais elle est restée statique dans le corridor fluvial de la rivière Cascapédia (figure 12 ; tableau 4). L'exposition des bâtiments aux inondations a accru dans la zone d'inondation de la rivière petite Cascapédia tandis qu'elle est restée stationnaire dans la zone d'inondation de la rivière Cascapédia (tableau 4). La population exposée est restée quasi stationnaire entre 1986 et 2006 et a décréu entre 2006 et 2016 dans la zone d'inondation du corridor de la rivière petite Cascapédia entraînant une hausse tendancielle (pente=0,48) et une variabilité de 8,5% sur la période de 1986 à 2016 (tableau 4) tandis qu'elle a accru de 1986 à 1996 et a décréu de 1996 à 2016 dans la zone d'inondation du corridor de la rivière Cascapédia correspondant à une baisse tendancielle (pente= -0,09) et une variabilité de 6,5% sur la même période (tableau 4).

Tableau 4

Coefficients de variation, pentes et poids moyens des scores des indicateurs et des facteurs de vulnérabilité sur la période de 1986 à 2016

Indicateurs	Zone d'inondation de la rivière petite Caspédia					Zone d'inondation de la rivière Caspédia				
	Coefficient de variation (CV)	Poids moyen par rapport au niveau de la vulnérabilité	Pente	R ²	P-value	Coefficient de variation (CV)	Poids moyen par rapport au niveau de la vulnérabilité	Pente	R ²	P-value
Exposition										
Indice de danger sur les bâtiments	0,6%	2,8%	0,03	0,83	<0,1%	0,0%	3,3%	0	-	-
Nombre de personnes	8,5%	3,3%	0,48	0,67	<0,1%	6,3%	3,5%	-0,09	0,53	<0,1%
Nombre de bâtiments	11,5%	4,7%	1,08	0,89	<0,1%	0,0%	3,8%	0	-	-
Linéaire de routes	0,0%	11,0%	0	-	-	0,0%	13,3%	0	-	-
Linéaire de chemin de fer	0,0%	0,9%	0	-	-	0,0%	1,0%	0	-	-
Linéaire d'égouts	0,0%	0,6%	0	-	-	-	-	-	-	-
Linéaire aqueducs	0,0%	1,6%	0	-	-	-	-	-	-	-
Linéaire électricité 230 KVA	0,0%	0,6%	0	-	-	0,0%	1,0%	0	-	-
Linéaire électricité 69 KVA	0,0%	0,9%	0	-	-	0,0%	1,0%	0	-	-
Nombre de ponts	0,0%	1,0%	0	-	-	0,0%	2,6%	0	-	-
Nombre de ponceaux	0,0%	0,6%	0	-	-	-	-	-	-	-
Indice d'exposition	3,0%	28,1%	1,59	0,83	<0,1%	0,7%	29,6%	-0,09	0,53	<0,1%
Sensibilité de la zone										
% Logements	13,2%	9,5%	2,47	0,88	<0,1%	0,0%	12,1%	0	-	-
% Commerce, épicerie et service	11,5%	1,5%	0,35	0,90	<0,1%	-	-	-	-	-
% Bâtiments annexes	9,0%	3,2%	0,51	0,69	<0,1%	0,0%	3,0%	0	-	-
% Bâtiments avec sous-sol	6,0%	3,9%	0,45	0,85	<0,1%	0,0%	3,3%	0	-	-
% Bâtiments dont ouvertures orientés vers courant dominant	15,0%	7,2%	2,13	0,88	<0,1%	0,0%	3,1%	0	-	-
% Bâtiments isolés	10,6%	5,6%	1,16	0,89	<0,1%	0,0%	3,5%	0	-	-
% Bâtiments en contact simple avec l'eau	10,1%	8,9%	1,7	0,81	<0,1%	0,0%	7,6%	0	-	-
% Bâtiments avec cote de submersion critique atteinte	13,1%	7,6%	1,97	0,89	<0,1%	0,0%	9,5%	0	-	-
% Maisons mobiles	3,6%	0,7%	-0,05	0,84	<0,1%	-	-	-	-	-
% Bâtiments inaccessibles	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
% Ponts inondés	0,0%	0,6%	0	-	-	-	-	-	-	-
Indice de sensibilité de la zone	11,2%	48,7%	10,68	0,87	0,11%	0,0%	42,1%	0	-	-
Sensibilité sociale										
% Personnes mois de 15 ans	5,5%	7,7%	0,56	0,40	<0,1%	33,9%	12,5%	-0,88	0,13	<0,1%
% Personnes de 65 ans et plus	19,3%	12,9%	5,16	0,97	<0,1%	11,8%	14,1%	0,55	0,33	<0,1%
% Familles avec 1 enfant	16,0%	6,9%	0,69	0,09	<0,1%	66,7%	5,8%	0,52	0,05	<0,1%
% Familles avec 2 enfants et plus	9,3%	5,6%	0,07	0,00	<0,1%	25,8%	7,8%	-0,75	0,42	<0,1%
% Familles monoparentales	16,3%	6,6%	1,64	0,54	<0,1%	21,4%	8,5%	-0,11	0,01	<0,1%
% Locataires	21,3%	2,8%	1,21	0,94	<0,1%	6,7%	3,5%	-0,03	0,05	<0,1%
% Ménages consacrant +30% de revenu au loyer	39,2%	1,6%	0,77	0,35	<0,1%	115,6%	3,4%	-1,08	0,23	<0,1%

Taux de chômage	10,2%	8,9%	0,98	0,26	<0,1%	23,3%	9,0%	0,73	0,36	<0,1%
Indice de sensibilité sociale	11,5%	53,0%	11,08	0,76	0,26%	4,8%	64,6%	-1,04	0,34	<0,1%
Adaptation										
Taux d'emplois	17,2%	3,5%	1,25	0,99	<0,1%	8,2%	3,3%	0,03	0,03	<0,1%
% Ratio des diplômés sur les non diplômés	66,6%	2,4%	3,15	0,88	<0,1%	66,8%	2,7%	0,33	0,10	<0,1%
% Propriétaires	11,8%	3,6%	0,75	0,69	<0,1%	1,2%	3,8%	0,001	0,00	<0,1%
% Familles avec les 2 parents	12,0%	3,3%	0,81	0,97	<0,1%	35,6%	3,2%	0,11	0,03	<0,1%
Revenus moyens des ménages	30,0%	3,5%	2,08	0,91	<0,1%	16,9%	3,8%	0,37	0,99	<0,1%
% personnes de 15 à 65 ans	11,5%	3,4%	0,64	0,59	<0,1%	11,3%	3,6%	-0,005	0,00	<0,1%
Bâtiments de 2 niveaux et plus	7,3%	0,6%	0,09	0,79	<0,1%	0,0%	2,3%	0		
% Résidences à risque couvert par le système d'alerte	10,4%	0,4%	0,08	0,80	<0,1%	-	-	-	-	-
% Résidences ayant pris des actions	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
% de résidence ayant reçu l'alerte 2 heures avant l'évènement	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Capacité de fonctionnement des hôpitaux	12,5%	3,0%	0,73	0,84	<0,1%	17,3%	4,5%	-0,4	0,77	<0,1%
Capacité de fonctionnement des pompiers	12,5%	3,0%	0,73	0,84	<0,1%	17,3%	4,5%	-0,4	0,77	<0,1%
Capacité de fonctionnement de la police	12,5%	3,0%	0,73	0,84	<0,1%	17,3%	4,5%	-0,4	0,77	<0,1%
Indice d'adaptation	18,3%	29,9%	11,04	0,93	0,02%	7,2%	36,3%	-0,36	0,06	<0,1%
Indice de vulnérabilité	7,1%	100,0%	12,3	0,68	0,22%	4,4%	100,0%	-0,77	0,09	<0,1%

Les scores des indicateurs d'exposition et de sensibilité augmentent le score de la vulnérabilité tandis que les scores des indicateurs d'adaptation diminuent le score de la vulnérabilité. Le tableau 4 montre la variabilité, la tendance et l'influence relative des indicateurs et des facteurs de vulnérabilité dans la trajectoire de la vulnérabilité aux inondations. Le coefficient de variation est le rapport entre l'écart-type et la moyenne. Il est exprimé en pourcentage. Les coefficients de variation, servant comme mesure de sensibilité dans le calcul de la vulnérabilité (Luers *et al.*, 2003) et utiles pour documenter le dynamisme de la vulnérabilité, sont subdivisés en quatre classes par le mode de ruptures naturelles de Jenks : 0% à 6% pour faible variabilité, 6,1% à 19,2% pour une variabilité moyenne, 19,3% à 39,1% pour une variabilité élevée et une variabilité très élevée si la variabilité est supérieure à 39,2%.

Dans la zone d'inondation de la rivière petite Cascapédia, le coefficient de variation de l'indice de la vulnérabilité aux inondations est moyen (CV=7,1 %) et a une tendance à la

hausse (pente= 12,3) sur la période allant de 1986 à 2016. Les indices d'adaptation (CV= 18,3), de sensibilité sociale (CV=11,5%) et de sensibilité de la zone (CV=11,2%) ont une variabilité moyenne. Le score de l'indicateur de la sensibilité relatif aux ménages consacrant +30% des revenus au loyer (CV=39,2%) a une variabilité très élevée. Les scores des personnes âgées (CV=19,3%) et des locataires (CV= 21 %) ont une variabilité élevée. Le score de l'indicateur de la capacité d'adaptation relatif aux ratios des diplômés sur les non diplômés (CV=66,6%) a une variabilité très élevée tandis que celui relatif aux revenus du ménage (CV=30%) a une variabilité élevée.

Dans la zone d'inondation de la rivière Cascapédia, le coefficient de variation de l'indice de la vulnérabilité aux inondations est faible (CV=4,4 %) et a une tendance à la baisse (pente= -0,77) sur la période allant de 1986 à 2016. Les indices de sensibilité sociale (CV=64,6%) et de sensibilité de la zone (CV=42,1%) ont une variabilité très élevée. Les indices d'adaptation (CV= 36,3) et d'exposition (CV=29,6) ont une variabilité élevée. Les scores des indicateurs de la sensibilité relatifs aux familles vivant avec un enfant (CV= 66,7%) et aux ménages consacrant +30% des revenus au loyer (CV=115%) ont une variabilité très élevée tandis que ceux relatifs aux enfants de moins de 15 ans (CV=33,9%), aux familles vivant avec deux enfants et plus (CV= 25,8%), aux familles monoparentales (CV= 21,4%) et aux taux de chômage (23,3%) ont une variabilité élevée. Le score de l'indicateur de la capacité d'adaptation relatifs aux ratios des diplômés sur les non diplômés (CV=66,8%) a une variabilité très élevée tandis que celui relatif aux familles ayant les deux parents (CV=35,6%) a une variabilité élevée.

Les figures 13a et 13b mettent en exergue l'évolution de ces indicateurs les plus importants (CV>19,3) dans la variabilité de la vulnérabilité entre 1986 et 2016 respectivement dans le corridor de la rivière petite Cascapédia et celui de la rivière Cascapédia.

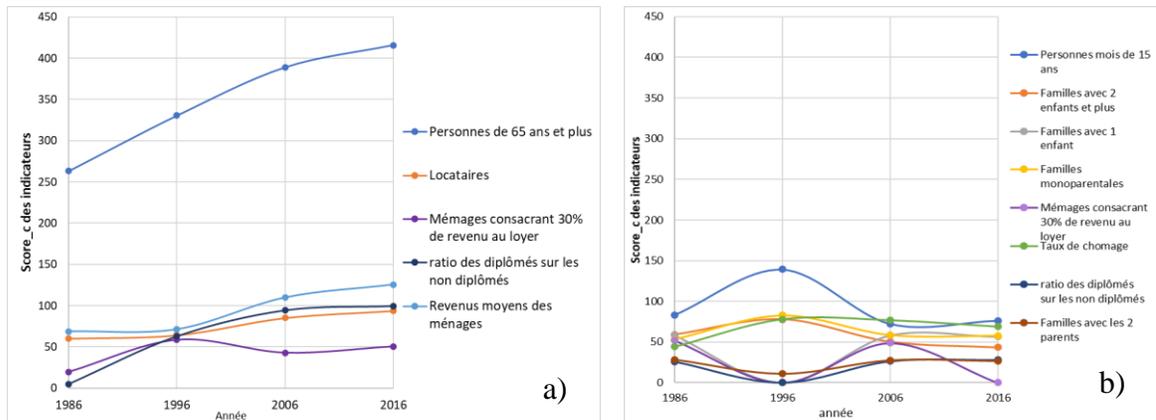


Figure 13. Évolution des scores des indicateurs avec une variabilité importante entre 1986 et 2016 a) dans le corridor fluvial de la rivière petite Cascapédia et b) dans le corridor fluvial de la rivière Cascapédia

2.5.4 Impacts de la réglementation sur les propriétés

Pour les 17 répondants du questionnaire Q1, les enquêtes ont montré que, malgré le fait d’habiter dans une zone inondable qui a un impact sur la valeur de la propriété (88% des répondants) et sur l’incapacité de procéder à des rénovations majeures (76% des répondants), seuls 18% des répondants sont favorables à une relocalisation (figure 14a). Les résultats similaires sont observés pour les 23 répondants se déclarant non inondés. En effet, 87% des répondants estiment que la valeur de leur propriété serait impactée par le fait de se retrouver dans la zone d’inondation, 61% estiment qu’ils seraient dans l’incapacité de procéder à des rénovations majeures mais seuls 26% des répondants pencheraient en faveur d’une relocalisation (figure 14b).

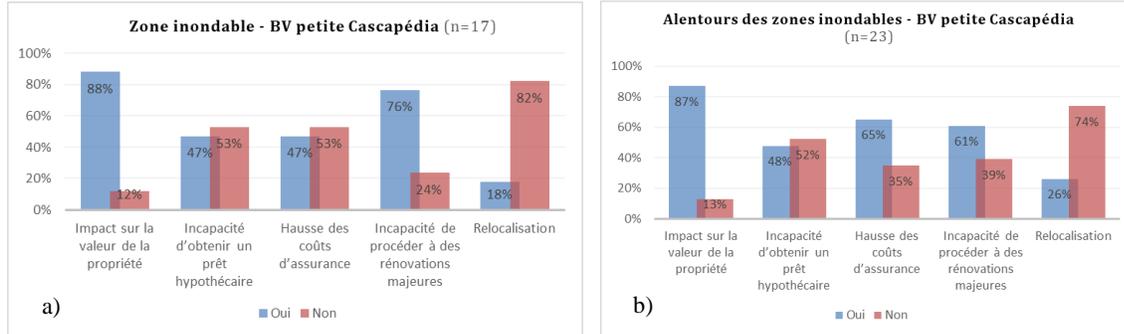


Figure 14. Impact de la localisation géographique des résidences sur la propriété dans le bassin versant de la rivière Cascapédia a) dans les zones inondables vécues b) aux alentours des zones inondables vécues

2.6 DISCUSSIONS

2.6.1 Dynamisme de la vulnérabilité dans le temps

Le niveau de vulnérabilité est trois fois plus élevé dans le corridor du bassin versant de la rivière petite Cascapédia que celui de la rivière Cascapédia (figure 9) car le corridor de la rivière petite Cascapédia présente plus d'enjeux exposés que celui de la rivière Cascapédia. La trajectoire de la vulnérabilité aux inondations montre que la vulnérabilité est inégalement répartie et, de plus, elle est dynamique dans l'espace (variabilité de la vulnérabilité dans les mailles) et dans le temps (évolution dans le temps). Elle ne peut pas être mesurée uniquement qu'en un temps « t » donné. Les travaux de Thomas et collaborateurs (2017), réalisés dans une autre municipalité du Québec, ont également montré que la vulnérabilité aux inondations est répartie spatialement de façon inégale sur un territoire donné.

La sensibilité de la zone aux inondations (respectivement 48,7% et 42,1% pour les corridors des rivières petite Cascapédia et Cascapédia) et la sensibilité sociale (respectivement 53,0% et 64,6% pour les corridors des rivières petite Cascapédia et Cascapédia) sont les deux facteurs dont les poids sont importants dans l'augmentation du niveau de vulnérabilité. Les indicateurs de sensibilité sociale sont tous dynamiques dans les

deux corridors. Les indicateurs de la sensibilité de la zone sont restés constants avec un coefficient de variation égal à zéro dans la zone d'inondation de la rivière Cascapédia entre 1986 et 2016 car la zone n'a plus connu de nouvelles constructions de bâtiments depuis 1977 recensées dans la base de données du cadastre. Le degré de fragilité étudiée des bâtiments n'a donc pas changé. En revanche, ces indicateurs, à l'exception des ponts inondés, sont restés dynamiques dans la zone d'inondation de la rivière petite Cascapédia qui a connu de nouvelles constructions de bâtiments.

L'augmentation de la valeur intrinsèque de la vulnérabilité est due à la pondération des indicateurs de la sensibilité. Les travaux de Barroca et ses collaborateurs (2005) ont également montré l'importance relative de la pondération des indicateurs dans l'évaluation de la vulnérabilité. Ainsi, la pondération des indicateurs de sensibilité par la méthode de la perception du public est une façon de prendre en compte la perception des acteurs qui sont à la fois enjeux vulnérables et acteurs de l'adaptation. Bien que cette méthode de la perception du public utilisée pour la pondération soit subjective et que les indicateurs de la sensibilité soient liés aux caractéristiques intrinsèques des éléments à risque qui décrivent leurs degrés de fragilisation auxquels ils sont exposés (Bankoff *et al.*, 2004), elle a l'avantage d'être participative et transparente dans la co-construction de la vulnérabilité. La participation des acteurs permet d'accepter à l'unanimité les résultats de l'évaluation, minimiser les sources potentielles de conflits et appliquer facilement les politiques de gestion des risques (Fritzsche *et al.*, 2015). De plus, l'application de cette méthode confère une légitimité rehaussée pour l'orientation et l'évaluation de l'action publique des collectivités territoriales. En outre, il est important de garder la même pondération pour servir de la même base de comparaison dans l'analyse de la trajectoire de la vulnérabilité.

Les scores des indicateurs d'alerte sont très faibles, ce qui se traduit par leurs poids relativement très faibles dans la trajectoire de la vulnérabilité pour le corridor de la petite rivière Cascapédia et nuls pour le corridor de la rivière Cascapédia (tableau 4). Seuls 29% des répondants ayant de l'expérience d'inondation dans le corridor de la rivière petite Cascapédia ont déclaré avoir reçu une alerte à partir des années 2000. Sur les 29% de ces

répondants ayant reçu l'alerte, 40 % ont reçu l'alerte par le canal de la radio, 40% à travers l'observation directe in situ et 20% par l'intermédiaire d'un voisin. Une analyse croisée avec les réponses des questionnaires explique ce faible taux de réception d'alerte. En effet, il n'existe pas de système d'alerte dans les collectivités territoriales sur la période de l'étude de la trajectoire et ces systèmes sont mis en place en 2019 pour la ville de New Richmond et en 2020 pour la municipalité de Cascapédia Saint-Jules soit après la dernière période d'analyse (2006-2016). Malgré la présence du site internet « *vigilance* » sur l'alerte aux inondations du gouvernement du Québec, il n'a pas été mentionné comme source d'alertes par les populations. Il est urgent de se questionner sur le meilleur canal de diffusion de ces alertes vers la population de la MRC de Bonaventure. L'alerte aux inondations est un des caractères « actif » (Gilbert, 2006) de la vulnérabilité car la réception des alertes à temps amène les populations préparées à prendre des actions efficaces en cas d'urgence pour se protéger ou pour trouver des abris (HR Wallingford, 2006).

Les différents niveaux de variabilité des indicateurs témoignent de la différence des dynamiques sociétales qui prévalent dans chacun des deux corridors. Bien que les indicateurs statiques ne fassent pas varier la vulnérabilité dans le temps, ils contribuent de même que les indicateurs dynamiques dans la variation du niveau de la vulnérabilité dans le temps. D'autres études ont également montré le caractère dynamique et temporel de la vulnérabilité aux inondations (e.g. Liu & Shi, 2017 ; Armstrong & Lazarus, 2019 ; Zischg *et al.*, 2018, Mechler & Bouer, 2015) et qu'elle ne peut donc pas être figée dans le temps (Baud & Bonnemains, 2018). De plus, la variabilité des indicateurs dans le temps dans les deux corridors dépend du contexte qui comme le souligne Defossez *et al.* (2018) permet de comprendre les spécificités de l'évolution de la vulnérabilité. Ainsi, cinq importants indicateurs font varier la vulnérabilité dans le temps dans le corridor de la rivière petite cascapédia (les personnes de 65 ans et plus, les locataires, les ménages consacrant +30% de revenu au loyer, le ratio des diplômés sur les non diplômés et le revenu moyen des ménages) contre huit importants indicateurs dans celui de la rivière Cascapédia (les personnes de moins de 15 ans, les familles avec un enfant, les familles avec deux enfants et plus, les familles monoparentales, les familles avec les deux parents, les ménages consacrant +30% de revenu

au loyer, le ratio des diplômés sur les non diplômés et le taux de chômage) (figure 13). Ces importants indicateurs de grande variabilité dans la trajectoire de la vulnérabilité sont essentiellement des indicateurs socio-économiques. Bien que les indicateurs relatifs aux ménages consacrant +30% de revenu au loyer et aux ratios des diplômés sur les non diplômés soient communs aux deux corridors contribuant fortement à la variabilité de la vulnérabilité dans le temps, la variabilité des ménages consacrant +30% de revenu au loyer est trois fois plus importante dans le corridor de la rivière Cascapédia que celui de la rivière petite Cascapédia.

La reconstitution de la trajectoire de la vulnérabilité aux inondations a une tendance à la hausse dans le corridor de la rivière petite Cascapédia tandis qu'elle présente une baisse tendancielle dans le corridor de la rivière Cascapédia. La compréhension des spécificités et des tendances de l'évolution de la vulnérabilité orientera les décideurs dans les stratégies d'adaptation. Les ajustements des mesures structurelles et non structurelles existantes peuvent être opérés en fonction de ces spécificités et tendances mises en lumière par l'étude de trajectoire de la vulnérabilité car la reconstitution de la trajectoire de la vulnérabilité aux inondations à travers les catastrophes peut entraîner les ajustements politiques, économiques et sociaux déclenchant les stratégies d'adaptation nécessaires dans le comportement humain et la construction de l'environnement (Tainter 1998 ; Diamond 2005). De plus, l'utilisation de la trajectoire de la vulnérabilité est utile, non seulement pour bâtir de nouvelles stratégies de communications surtout dans la diffusion des alertes mais également, pour rehausser la résilience comme, par exemples, l'éducation de la population sur les risques liés aux inondations et le changement de conception architecturale des bâtiments résilients aux inondations assortis des coûts de construction accessibles aux ménages.

2.6.2 Mobilisation des connaissances de la vulnérabilité vers les actions de gouvernance

2.6.2.1 Rôle de la trajectoire de la vulnérabilité aux inondations

La taille des mailles de dimensions 200 m x 200 m a permis de mesurer et de comprendre la répartition spatiale de la vulnérabilité (des personnes, de leurs propriétés et des infrastructures essentielles) aux inondations au sein de la communauté afin de pouvoir fournir, en priorité, des ressources et des services de préparation, de prévention et de protection nécessaires aux personnes les plus à risque. Les opérations de secours et de rétablissement des sinistrés, en cas d'inondations, peuvent se baser également sur cette répartition spatiale particulièrement sur les mailles ou les zones à forte vulnérabilité aux inondations. Ainsi, les personnes âgées et les personnes vivant avec un handicap en danger peuvent être repérées facilement en cas d'alerte aux inondations pour les aider à procéder aux évacuations nécessaires. En outre, cette analyse à petite échelle permet de prendre en compte le lien entre la vulnérabilité des personnes et celle du bâti. En effet, selon la nature de l'inondation, les personnes qui résident dans les bâtiments à plusieurs niveaux peuvent trouver refuge dans les étages supérieurs tandis que les personnes qui habitent les bâtiments à un niveau ou au sous-sol peuvent être sérieusement affectées. Bien que l'analyse de la vulnérabilité à l'échelle spatiale plus restreinte nécessite plus de temps et de moyens, elle génère une analyse détaillée dont le niveau de précision est nécessaire pour planifier concrètement l'adaptation et des mesures de prévention et de secours (Wilhelmi & Morss, 2012). La trajectoire de la vulnérabilité dans chaque maille met en lumière les mailles dont la vulnérabilité a été dynamique ou statique dans le temps.

L'analyse de la trajectoire de la vulnérabilité aux inondations a l'avantage d'être un outil de mesure des efforts de réduction de la vulnérabilité aux inondations dans le futur par les gestionnaires. En effet, la flexibilité qu'offre la méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité par addition d'indicateurs pondérés dans la trajectoire de la vulnérabilité permettra aux gestionnaires de mesurer la réduction de la vulnérabilité à travers leurs actions

soit la limitation ou la réduction de l'exposition des enjeux dans la zone d'inondation ou soit en renforçant les mesures d'adaptation ou combiner les deux facteurs. Les autorités locales peuvent comparer leurs efforts de réduction de la vulnérabilité au regard des seuils acceptables convenus dans leur politique de réduction de la vulnérabilité à travers la trajectoire de la vulnérabilité. Il faut noter qu'il est souvent difficile pour les autorités locales de se prononcer sur le risque acceptable voulu car les difficultés de prévoir l'évolution des enjeux dans le futur, de prédire le climat futur et les différents effets liés aux inondations mettent la pression sur ces décideurs qui se résignent parfois dans l'indécision (Jebens *et al.*, 2016). De plus, les seuils acceptables des risques peuvent être différents entre les acteurs politiques et des sujets des politiques ou entre les experts et les profanes (Clavez, 2007). Tous ces différents points de vue des différentes catégories de personnes sont liés à leur contexte et sont structurellement marqués par des conflits de perspective car ils partent des différentes prémisses et partagent différentes réalités (Clavez, 2007). La trajectoire de la vulnérabilité offre alors une avenue aux décideurs de mener à bien cet exercice car disposant d'éléments et de méthodes qui peuvent expliquer les résultats de leur action afin d'accroître la transparence de la gouvernance du risque liée aux inondations. De plus, la méthode indicielle fournit un ordre de grandeur de la vulnérabilité afin de permettre la comparaison et ne peut donc représenter une fin en soi (Nardo *et al.*, 2005).

2.6.2.2 Nécessité de communiquer sur les cartographies des risques liés aux inondations

La communication sur le risque incluant la cartographie et la trajectoire de la vulnérabilité permet d'accroître la conscience du risque tout en élucidant les incompréhensions qui pourraient naître de l'application de la réglementation. En effet, l'analyse croisée de la position géographique de 23 répondants qui se déclarent ne pas être dans la zone inondable, montre que 47,8 % se trouvent dans la zone d'inondation réglementaire définie par la MRC de Bonaventure depuis 1988 et actualisée en 2008 qui est en vigueur à la date de la réalisation de cette recherche. Il en résulte un sentiment de frustration pour ces personnes qui considèrent que leurs propriétés se retrouvent injustement

dans la zone d'inondation réglementaire. L'analyse croisée avec les témoignages recueillis sur le terrain et la configuration de la délimitation de la zone d'inondation modélisée pour une crue de période de retour 350 ans montrent trois types de propriétés de configuration différente face à la manifestation de l'inondation : Il s'agit (i) des propriétés dont une partie du terrain est inondée mais le bâtiment principal sur le terrain n'est pas inondé, (ii) tout le terrain est inondé mais le bâtiment n'est pas inondé car se trouvant sur une élévation, (iii) tout le terrain est inondé et le bâtiment est seulement en contact avec l'eau. Dans le dernier cas, il est souvent revenu dans les témoignages que « *l'eau était arrivée juste sur les marches de mes escaliers mais n'avait pas pénétré dans ma maison donc je n'étais pas inondé* ». Ainsi, les termes « être inondé », « être dans une zone inondable » et « être dans une zone d'inondation réglementaire » doivent être clarifiés aux populations à travers une communication active afin d'harmoniser la compréhension de la portée et de lever des ambiguïtés de ces termes dans l'adaptation des politiques préventives et l'application de ces mesures préventives dans le futur.

De plus, dans la littérature scientifique, les travaux de Billet (2000) montrent qu'il existe cinq typologies de limites d'inondations : la délimitation des zones d'inondation peut se faire à partir des limites constatées à caractère cognitif, les limites retrouvées basées sur les recherches historiques, les limites présumées fondées sur les analyses hydrologiques et hydrauliques, les limites extrapolées à caractère d'ordre public et les limites dupliquées faisant appel aux limites préexistantes dans les documents de références. Les limites présumées sont de plus en plus utilisées car elles offrent les caractéristiques hydrauliques des crues permettant de mieux représenter la réalité dans un monde contemporain devenue de plus en plus exigeant face aux politiques de gestion des risques liés aux inondations. La trajectoire dans cette étude, se fait sur les limites présumées fondées sur l'analyse hydrologique et hydraulique mais il serait pertinent d'évaluer la trajectoire de la vulnérabilité selon d'autres limites. Le choix des limites des zones inondables dans l'étude de la trajectoire dans cet article repose sur la possibilité d'utiliser le modèle hydraulique disponible. La délimitation des limites des zones inondables repose sur l'acceptabilité sociale du risque qui nécessite un compromis, parfois au détriment de la protection, entre la maîtrise et l'utilisation

de l'eau, l'occupation et l'aménagement des terres, la recherche de sécurité et la pression foncière (Billet, 2000). Malgré une acceptation sociale de départ, certains riverains se trouvant dans la zone inondable revendiquent d'être libérés des servitudes et des restrictions particulières sur l'utilisation des sols qu'imposent la réglementation des zones inondables au détriment de leur sécurité. Les cartographies des zones inondables et les cartographies de la vulnérabilité aux inondations ainsi que les cartographies des niveaux du risque jusqu'à la prise des mesures réglementaires sur ces zones doivent se faire dans un processus de compromis alliant à la fois l'acceptabilité sociale du risque, les connaissances scientifiques de délimitation des zones inondables et la responsabilité pour une réglementation acceptée par les populations et l'administration. Quelle que soit la méthode utilisée pour délimiter les zones inondables, tout se passe comme si les résultats de la délimitation sont la base de discussion avec la population pour définir les limites d'inondations acceptables (Billet, 2000). La délimitation des zones inondables, quelles que soient les méthodes utilisées pour tracer les limites, a une implication juridique qui demande un compromis sur le droit de propriété affecté par les contours de la délimitation et l'acceptabilité sociale du risque lié aux inondations. La communication du risque avec la population contribuera à trouver ce compromis acceptable. La communication du risque implique la cartographie mais peut aussi intégrer la trajectoire telle que présentée dans cette étude pour faire prendre conscience de l'évolution du risque lié à des décisions d'aménagement sur le territoire.

2.6.2.3 La trajectoire de la vulnérabilité : une alternative pour appréhender l'impact des représentations des habitants soumis à la réglementation en zone inondable

La trajectoire de la vulnérabilité met en lumière l'impact de l'évolution de la réglementation sur les propriétés en zone inondable. Les indicateurs d'exposition, à l'exception des bâtiments et des personnes exposés dans la zone d'inondation de la rivière petite Cascapédia et des personnes exposées dans la zone d'inondation de la rivière Cascapédia, sont restés statiques dans le temps. Les nouvelles constructions des bâtiments y compris les logements ont augmenté l'exposition des bâtiments sur toute la période étudiée

dans certains secteurs de la zone d'inondation de la rivière petite Cascapédia. En revanche, il n'y a pas eu de nouvelles constructions de bâtiments dans la zone d'inondation dans le corridor de la rivière Cascapédia. L'accroissement de l'exposition des bâtiments dans la zone d'inondation 350 ans dans le corridor de la rivière petite Cascapédia révèle l'importance d'une connaissance accrue des limites des zones inondables. De plus, la zone 350 ans correspondant à la plaine alluviale fonctionnelle mais absente de la réglementation fait qu'elle est inconnue par les acteurs et par la population. Cela peut être à l'origine d'une augmentation de la vulnérabilité dans certains secteurs de la rivière petite Cascapédia. La zone d'inondation de récurrence 350 ans est une zone simulée donc cette inondation n'est jamais vécue par les populations et n'a jamais été matérialisée d'où cette méconnaissance par les acteurs. La zone d'inondation vécue a une récurrence d'environ 20 ans (figure 5). Une hausse tendancielle est observée dans les séries de débits maximaux journaliers annuels d'où l'importance d'étudier la trajectoire de la vulnérabilité sur la zone de récurrence 350 ans pour anticiper sur les effets du climat futur sur le risque lié aux inondations. Au Québec, le cadre normatif issu de la politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables (PPRLPI) repose essentiellement sur les zones inondables 20 et 100 ans or l'inondabilité peut excéder ces zones et dans le cadre actuel on observe une augmentation de l'exposition à l'inondation. Par ailleurs, cette augmentation de l'exposition à l'inondation pourrait être née de la responsabilité partagée entre les populations et les municipalités locales. En effet, le manque ou l'insuffisance des ressources financières, techniques, humaines et temporelles dans les municipalités locales peuvent expliquer une faiblesse de l'application la politique dans la zone inondable réglementaire qui est contenue dans la zone d'inondation de récurrence 350 ans. Si les citoyens ne se conforment pas à la réglementation en matière de construction, les recours des municipalités à des procédures judiciaires peuvent connaître des difficultés d'aboutissement au regard des ressources financières limitées des municipalités (Bouchard, 2009).

Un parallélisme effectué entre la trajectoire de la vulnérabilité et l'évolution de la réglementation montre qu'il y a une influence mutuelle entre l'évolution de l'exposition des bâtiments et la réaction des propriétaires de ces bâtiments. En effet, le souhait formulé par

les citoyens de demeurer dans leurs résidences, 82% des répondants affectés par les inondations (figure 14a) et 74 % des répondants se déclarant non affectés par les inondations dans le corridor fluvial de la rivière petite Cascapédia (figure 14b), malgré leur vulnérabilité interpelle les autorités locales dans l'orientation des actions de réduction de la vulnérabilité. Les travaux de Hellequin et ses collaborateurs (2013) ont aussi montré cette tendance qu'ont les populations exposées de demeurer dans les zones inondables.

L'évolution des lois et politiques en zones inondables telles que, l'adoption de la loi sur l'aménagement et l'urbanisme en 1979, l'adoption de PPRLPI en 1987 par le gouvernement du Québec (MELCC, 2015), leur application et leur mise en œuvre dans la MRC de Bonaventure entraînant des contraintes de sévérité graduée sur les constructions et les rénovations des bâtiments ont progressivement animé un sentiment de frustration de plus en plus expressif des résidents. Ce résultat présage qu'une politique de relocalisation sera moins acceptée et qu'il faille découvrir les motivations et les perceptions des populations exposées afin de guider la mise en œuvre des stratégies d'adaptation consensuelles et contextuelles. La communication avec la population est plus que jamais indispensable dans l'orientation des actions préventives et la compréhension de l'engagement de la population et des décideurs dans une perspective de distribution de responsabilité différenciée face aux inondations.

Par ailleurs, il est nécessaire de porter un autre regard sur les zones inondables. En effet, les aléas naturels varient à travers les années et peuvent causer des dommages sur les personnes et leurs biens. Cependant, ils ne peuvent pas être considérés uniquement comme des événements dommageables car Bankoff (2007) fait remarquer la signification de l'histoire et de l'établissement humain favorisés par l'importance des inondations annuelles du Nil dans la prospérité de l'Égypte ou des passages saisonniers des typhons sur le niveau de précipitations aux Philippines. Au regard des évolutions dans le temps et dans l'espace de l'aléa inondation et de la vulnérabilité des personnes et de leurs biens, les zones inondables doivent être pensées autrement. La préservation des écosystèmes, la considération des cobénéfices et la réorientation des usages en zones inondables ainsi que l'accroissement de

la capacité à composer avec l'eau d'inondation sont des pratiques qui doivent être intégrées aux politiques de gestion préventive des inondations dans le futur. La trajectoire de la vulnérabilité offre une alternative pour penser différemment l'adaptation (Magnan *et al.*, 2012). Ce projet de recherche contribuera à l'amélioration des connaissances, des pratiques et des directives du ministère des affaires municipales et de l'habitation dans la politique de prévention des risques liés aux inondations.

2.7 CONCLUSION

La trajectoire de la vulnérabilité aux inondations, abordée sous l'angle des facteurs de la vulnérabilité (exposition, sensibilité, capacité d'adaptation), a montré les dynamiques sociétales qui ont façonné les niveaux et la variabilité de la vulnérabilité à travers les typologies des trajectoires tant au niveau des facteurs de vulnérabilité qu'au niveau des indicateurs. Ces typologies de trajectoires ont permis d'identifier les variables les plus importantes qui ont contribué à influencer la vulnérabilité dans le temps dans les corridors fluviaux des rivières Cascapédia et petite Cascapédia. La vulnérabilité a augmenté de 1986 à 2006 et diminue de 2006 à 2016 avec une vulnérabilité maximale en 2006 dans le corridor de la rivière petite Cascapédia tandis qu'elle a augmenté de 1996 à 1996 puis elle a diminué de 1996 à 2016 avec un pic en 1996 dans le corridor de la rivière Cascapédia. La vulnérabilité est dynamique et évolue dans le temps et dans l'espace. En effet, l'évolution de l'exposition des bâtiments dans la zone d'inondation étudiée a accru la vulnérabilité dans le corridor de la rivière petite Cascapédia tandis qu'elle est restée quasi stationnaire dans celui de la rivière Cascapédia. L'évolution de l'exposition des personnes a été dynamique dans les deux corridors. Ce qui se reflète sur le dynamisme des facteurs de sensibilité sociale dans le temps. La prise en compte de la perception de la population a non seulement contribué à augmenter l'importance de la sensibilité sociale et de la zone mais aussi revêt un caractère d'implication et de transparence dans l'analyse de la vulnérabilité utile pour l'engagement des acteurs dans la mise en œuvre des stratégies d'adaptation.

Cette analyse a mis en lumière le fait que les enjeux exposés ne sont pas seulement considérés comme des enjeux à risques mais également comme des acteurs ou des éléments d'adaptation. L'intention des personnes à demeurer dans leurs maisons dans la zone inondable amène à changer de paradigme sur la gestion préventive dans une combinaison des mesures structurelles et non structurelles pour mieux s'adapter et à composer avec l'eau d'inondation. La nature différenciée du contact ou non des propriétés avec l'eau, le fait que certains citoyens jugent être inclus injustement dans la zone inondable réglementaire existante, et datant de l'année 1988, et l'impact réglementaire des zones inondables sur leurs propriétés doivent amener les gestionnaires des risques à mieux communiquer sur les cartographies des zones inondables et de la vulnérabilité aux inondations ainsi que sur la trajectoire de la vulnérabilité pour favoriser l'acceptabilité sociale de ces nouvelles cartographies, leurs implications réglementaires et la conscientisation de la dynamique de la vulnérabilité.

Les cartographies de vulnérabilité générées en maillages de 200 m x 200 m dans la trajectoire de la vulnérabilité et les enquêtes sur le terrain ont permis de mieux appréhender les changements globaux qui ont contribué à l'évolution spatio-temporelle de la vulnérabilité aux inondations et de comprendre la nature de la vulnérabilité aux inondations. La trajectoire de la vulnérabilité aux inondations est un outil d'aide à la décision avec un avantage particulier pour les décideurs dans l'élaboration, dans la mesure des efforts consentis et dans l'application des politiques préventives des risques liés aux inondations, d'interventions pendant la survenue du risque et d'aménagement du territoire. La méthodologie développée sur la trajectoire dans cette étude montre la richesse potentielle des interactions qui peuvent exister entre les dynamiques sociétales, spatiales, réglementaires et politiques locales et pose des bases pour affiner les savoirs et les connaissances.

2.8 REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Steeve Hetu et Dany Voyer pour leurs appuis dans l'orientation de cette étude au regard des attentes du ministère des affaires municipales et de l'habitation du Québec et de la MRC de Bonaventure. Ils remercient également les membres du laboratoire de géomorphologie et de dynamique fluviale de l'Université du Québec à Rimouski pour leurs appuis pour la collecte des données sur le terrain et en documentation. Cette recherche a été financée par le ministère des affaires municipales et de l'habitation du Québec, le réseau inondations intersectoriels du Québec et son partenaire fonds de recherche du Québec, la MRC de Bonaventure, la fondation de l'université de Québec à Rimouski et l'université du Québec à Rimouski.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Cette recherche a documenté deux approches d'évaluation de la vulnérabilité en intégrant le concept de trajectoire de vulnérabilité. L'intérêt de chaque approche d'évaluation de la vulnérabilité en intégrant le concept de trajectoire de vulnérabilité et l'importance de la cartographie ont été documentés ainsi que les différentes trajectoires étudiées dans différentes régions du monde. Ce qui a conduit à en déduire trois différents scénarios de trajectoires possibles : la trajectoire de la vulnérabilité aux inondations (i) sur les différentes zones d'inondations vécues correspondant chacune à une période de retour vécue dans le passé, ou (ii) sur les différentes zones d'inondations d'étendues variables par pas de temps et fonction de périodes de retour, ou (iii) sur une zone d'inondation statique. Les étendues des zones d'inondations dans les deux derniers scénarios de trajectoire peuvent être issues de la modélisation ou du vécu.

Cette étude a également montré le caractère dynamique, transformationnel et spatio-temporel de la trajectoire de la vulnérabilité. Elle a montré les indicateurs qui font varier la vulnérabilité dans le temps (surtout les personnes de 65 ans et plus, les locataires, les ménages consacrant +30% de revenu au loyer, le ratio des diplômés sur les non diplômés et le revenu moyen des ménages pour le corridor de la rivière petite Cascapédia et les personnes de moins de 15 ans, les familles avec un enfant, les familles avec deux enfants et plus, les familles monoparentales, les familles avec les deux parents, les ménages consacrant +30% de revenu au loyer, le ratio des diplômés sur les non diplômés et le taux de chômage pour le corridor de la rivière Cascapédia). La représentation cartographique de la trajectoire de la vulnérabilité par maillages de 200 m x 200 m a mis en exergue les mailles de forte variabilité et la répartition spatiale de la vulnérabilité dans la zone d'inondation. La trajectoire des facteurs de vulnérabilité (exposition, sensibilité et capacité d'adaptation) et la trajectoire des principaux indicateurs ont permis de comprendre l'influence relative et les tendances de chaque niveau de trajectoire dans la trajectoire globale de la vulnérabilité aux inondations dans les corridors fluviaux des rivières petite Cascapédia et Cascapédia. Les résultats d'enquêtes ont contribué à comprendre la nature de la vulnérabilité. En effet, l'exposition des bâtiments a augmenté dans le corridor de la rivière petite Cascapédia mais elle est restée stationnaire dans le corridor de la rivière Cascapédia.

Cette étude présente quelques limites et avantages que nous mentionnons ici. En ce qui concerne les limites, seuls les enjeux exposés à l'intérieur de la limite d'inondation sont pris en compte dans l'évaluation de la vulnérabilité et dans la trajectoire de la vulnérabilité. Par conséquent, les mailles qui se trouvent à la lisière de la limite d'inondation ne prennent en compte que les enjeux exposés à l'inondation de récurrence 350 ans. Les mesures d'adaptation qui seront adoptées plus tard par les collectivités territoriales doivent prendre en compte cette réalité afin de mieux intervenir sur les parties exposées en se référant à la cartographie de l'aléa.

L'accessibilité étudiée dans cette étude ne concerne que l'accessibilité des véhicules des sapeurs-pompiers par les routes principales jusqu'à l'entrée de la propriété. Pour cela une submersion d'eau de plus de 50 cm (HR Wallingford, 2006) sur une route la rend inaccessible. L'inaccessibilité due à la dégradation ou à la mise en charge des petits ouvrages de franchissement à l'entrée des propriétés n'a pas été intégrée à la mesure de la vulnérabilité. Elle fait plutôt l'objet d'une évaluation de la vulnérabilité descriptive dans le grand projet de la vulnérabilité du ministère.

Cette étude a conservé la même pondération des indicateurs de sensibilité pour la reconstitution de la trajectoire. La pondération d'un individu peut varier dans le temps car les jugements de valeurs ayant conduit les participants aux enquêtes à faire des pondérations peuvent changer dans le temps au regard de l'évolution de leurs perceptions. Les résultats de la pondération pourraient être différents d'une période à une autre si la pondération avait été administrée en ces différents moments de la trajectoire de la vulnérabilité. Il en résulterait également une modification des résultats de l'indice de vulnérabilité pour chaque période dans la trajectoire de la vulnérabilité.

L'avantage qu'offre la méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité par addition d'indicateurs pondérés dans la trajectoire de la vulnérabilité aux inondations est qu'elle est flexible et donne l'opportunité aux gestionnaires d'ajouter d'autres indicateurs dans le futur si d'autres changements importants s'observent sur le territoire afin de réévaluer la vulnérabilité. Cette réévaluation permettra de faire des comparaisons avec les niveaux de vulnérabilité passés et le niveau de vulnérabilité souhaité à cet instant « t » et s'autoévaluer afin de porter un jugement sur les efforts mis en œuvre jusqu'à ce temps « t » donné. De plus, la communication et la sensibilisation sont nécessaires pour co-construire la résilience de la collectivité territoriale face aux inondations. La transparence dans la gouvernance du risque lié aux inondations et l'implication de la population sont des moyens ultimes qui faciliteront l'acceptabilité des

mesures d'adaptation et le risque résiduel au regard des ressources individuelles et collectives disponibles et mobilisables. En outre, l'analyse de la trajectoire de la vulnérabilité aux inondations à des échelles plus fines contribue à mieux cibler les zones de plus grandes vulnérabilités pour mieux orienter les efforts d'adaptation sur le territoire.

Parallèlement à cette étude, les données d'enquêtes du fait de leurs richesses, seront davantage valorisées dans un autre article dont l'esquisse du sommaire est en annexe IV. Cet article montrera comment la représentation sociale du risque lié aux inondations a des implications sur l'orientation de l'adaptation.

ANNEXES

ANNEXE I - Questionnaire Q1 adressé aux résidences inondées



Questionnaire pour l'enquête sur l'analyse de la vulnérabilité aux inondations dans la MRC de Bonaventure

Nous vous invitons à répondre au meilleur de votre connaissance et selon votre compréhension aux différentes questions de ce questionnaire. Les données collectées seront utilisées dans la confidentialité. Seules les données traitées et agrégées feront état d'éventuelles publications. Ce questionnaire a été certifié par le comité éthique de la recherche de l'Université du Québec à Rimouski sous le numéro CER-114-877 en conformité avec la politique d'éthique de la recherche avec les êtres humains.

Section A : Questionnaire adressé aux résidentes et résidents ayant au moins une fois été affectés par les inondations

Cette partie du questionnaire permettra au laboratoire de la géomorphologie et dynamique fluviale de l'UQAR d'obtenir des informations sur les inondations historiques des rivières sélectionnées dans le cadre de la cartographie des zones inondables et des risques associés aux inondations dans la MRC de Bonaventure. Les données collectées appuieront non seulement l'analyse de la vulnérabilité aux inondations, mais également la compréhension des causes de ces inondations, des expériences des personnes inondées, des mesures de gestion appliquées, et l'évolution de la perception du risque lié aux inondations dans la municipalité.

Date :.....

Municipalité :.....

Adresse complète :.....

Courriel :

Depuis combien de temps habitez-vous à cette adresse dans cette municipalité ?

.....

Votre résidence a-t-elle un sous-sol ? **Oui** **Non**

Si oui, à quelle période ce sous-sol a-t-il été construit ? Cochez la case correspondante.

Avant 2000	Entre 2000 et 2010	Après 2010

Si oui, à quelle période ce sous-sol a-t-il été aménagé complètement ? Cochez la case correspondante

Avant 2000	Entre 2000 et 2010	Après 2010

Veillez nous aider à compléter ce tableau :

Période	Nombre total de personnes vivant dans la résidence (de façon quotidienne ou pendant une période dans l'année)	Nombre de personnes ayant moins de 15 ans	Nombre de personnes ayant plus de 65 ans	Nombre de personnes à mobilité réduite ou non autonome ayant entre 15 et 65 ans
Avant 2000				
Entre 2000 et 2010				
Après 2010				

Aviez-vous une assurance contre les risques liés aux inondations pendant les périodes suivantes ?

Période	Oui	Non
Avant 2000		
Entre 2000 et 2010		
Après 2010		

Si non, pourquoi ?

Si oui, laquelle ?

.....

Avez-vous été inondé ? Oui Non

Si oui, quelle(s) date(s) ?

.....

D'après vous, quelles sont les causes de ces inondations dans votre municipalité ?

.....

D'après vous, quelles sont les causes qui ont contribué à l'inondation de votre résidence ?

.....

D'après vous, existe-t-il des facteurs socio-économiques et/ou politiques qui ont contribué à aggraver le risque lié aux inondations dans votre municipalité ? Oui

Non

Si oui, lesquels et à quel moment les avez-vous observés ?.....

.....

.....

D'après vous, y a-t-il des processus individuels, collectifs et/ou territoriaux qui ont façonné la vulnérabilité/le risque aux inondations dans la municipalité ?

Oui Non

Si oui, lesquels (ou les décrire) et quand ont-ils été mis en place ?.....

.....

.....

.....

D'après vous, existe-t-il des facteurs naturels et/ou anthropiques qui ont contribué à aggraver le risque lié aux inondations dans la municipalité ?

Embâcle de glace

Embâcle de bois

Dynamique estuarienne (effet de marées, ondes de tempête côtière)

Cône alluvial (Forme fluviale associée au débordement soudain et intense d'un cours d'eau plus ou moins à forte pente située à la jonction d'un versant et d'une plaine inondable)

Erosion/sédimentation

Modification dans l'occupation du sol vers les zones inondables

Exfiltration d'eau dans le sous-sol du bâtiment

Autres

Si autres, lesquels ?

.....

A votre niveau personnel, qu'impliquerait le fait que votre résidence soit située dans les surfaces concernées par la nouvelle cartographie des zones inondables.

Impact sur la valeur de la propriété

Incapacité d'obtenir un prêt hypothécaire auprès d'une institution financière

pour l'achat de la maison

Hausse des coûts d'assurance

Incapacité de procéder à des rénovations majeures (agrandissement,

ajout d'un sous-sol...)

Relocalisation

Autre (à préciser)

Quelles actions avez-vous entreprises pour vous préparer contre le risque lié aux inondations avant les inondations ?

.....
.....
.....

Quelles actions avez-vous entreprises pour lutter contre le risque lié aux inondations pendant les inondations ?

.....

Quelles actions avez-vous entreprises pour vous relever après les inondations ?

.....

D'après vous, laquelle de ces actions a été la plus efficace pour diminuer l'impact des inondations ?

.....

Avez-vous été avertis de la survenue des inondations passées dans la municipalité ?

Oui Non

Si oui, par qui ou par quelle institution et par quel moyen ?.....

Si oui, quel est le délai d'avertissement donné à la population avant la survenue de l'inondation (veuillez cocher les cases correspondantes en fonction des périodes) ?

Période	Moins d'une heure	Entre 1 et 2 heures	Entre 2h et 24 h	Entre 24 h et 48 h	Plus de 48 heures
Avant 2000					
Entre 2000 et 2010					
Après 2010					

Si oui, comment avez-vous réagi à cette alerte (veuillez renseigner les cases correspondantes en fonction des périodes) ?

Période	Réaction en cas d'alerte aux inondations
Avant 2000	
Entre 2000 et 2010	
Après 2010	

Aviez-vous reçu une aide financière de la part du gouvernement pour les dommages causés par les inondations ?

Oui Non

Si non, pourquoi ?.....

.....

Craignez-vous d'être à nouveau inondés à l'avenir ? Oui Non

Si l'inondation se reproduisait, envisageriez-vous de déménager ? Oui Non

Si non, pourquoi ?

.....

Quelle(s) coupure(s) de service(s) avez-vous subi pendant les inondations dans les périodes suivantes ?

Période	Electricité	Eau potable	Eaux usées	Téléphone	Gaz	Transport	Commerce d'alimentation	Autre service (à préciser)
Avant 2000								
Entre 2000 et 2010								
Après 2010								

Sur une échelle de 1 à 10, quel niveau de confiance accordez-vous à l'efficacité de gestion du risque lié aux inondations par les autorités municipales ? (1 étant le plus faible niveau de confiance et 10 le niveau de confiance le plus élevé. Ne répondez que pour les périodes durant lesquelles vous résidiez dans la municipalité)

Avant 2000 : 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Entre 2000 et 2010 : 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Après 2010 : 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Sur une échelle de 1 à 10, quel est le niveau de vulnérabilité de votre résidence face au risque lié aux inondations ? (1 étant le plus faible niveau de vulnérabilité et 10 le niveau de vulnérabilité le plus élevé. Ne répondez que pour les périodes durant lesquelles vous résidiez dans la municipalité)

Avant 2000 : 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Entre 2000 et 2010 : 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Après 2010 : 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Sur une échelle de 1 à 10, quel niveau de préparation pensez-vous avoir vis-à-vis de votre capacité à faire face au risque lié aux inondations ? (1 étant le plus faible niveau de préparation et 10 le niveau de préparation le plus élevé. Ne répondez que pour les périodes durant lesquelles vous résidiez dans la municipalité)

Avant 2000 : 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Entre 2000 et 2010 : 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Après 2010 : 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

1 Sur une échelle de 1 à 10, quel est le niveau de vulnérabilité de votre résidence face au risque lié aux inondations du 2 décembre 2020 ? (1 étant le plus faible niveau de vulnérabilité et 10 le niveau de vulnérabilité le plus élevé.)

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

2 Sur une échelle de 1 à 10, quel niveau de préparation pensez-vous avoir vis-à-vis de votre capacité à faire face au risque lié aux inondations du 2 décembre 2020 ? (1 étant le plus faible niveau de préparation et 10 le niveau de préparation le plus élevé.)

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

3 Comment avez-vous réagi face à cette inondation du 2 décembre 2020 ?

.....

Cette question vise à évaluer les motivations à rester ou pas dans une zone inondable.

Pour chacune des motivations suivantes, indiquez sur une échelle de 1 à 100 si c'est une motivation peu importante (1) ou très importante (100) influençant le choix d'un déménagement de votre résidence en zone inondable vers une autre résidence située à l'extérieur de la zone inondable ?

<u>Motivations à rester</u> dans ma résidence malgré les inondations	Echelle de 1 à 100 (1= peu importante pour <u>rester</u> dans ma résidence 100 = très importante pour <u>rester</u> dans ma résidence)
Niveau d'attachement familial à votre résidence	
Niveau d'attachement au voisinage	
Avantages géographiques de la position de votre résidence (déplacements)	
Si autre(s) motivation(s) à rester, précisez	

<u>Motivations à déménager</u> à l'extérieur de la zone inondable	Echelle de 1 à 100 (1 = peu importante pour <u>déménager</u> de ma résidence ; 100 = très importante pour <u>déménager</u> de ma résidence)
Fréquence et intensité des inondations	
Niveau du coût de l'assurance	
Niveau des dommages matériels attribué à l'inondation	
Niveau du soutien de la municipalité pour faire face au risque d'inondation	
Niveau de contrainte de la législation à l'intérieur de la zone inondable	
Fréquence des séjours à l'hôpital causés par les inondations de vous ou l'un de vos proches	
Décès d'un proche attribué à l'inondation	
Existence d'alternative(s) où emménager	
Autre(s) motivation(s) à déménager, précisez	

Quels sont les matériaux dominants de construction utilisés pour votre résidence ?

Parois extérieures du bâtiment :

.....

Parois intérieures du bâtiment :

.....

Le plancher du rez-de-chaussée de votre résidence a-t-il été atteint par les eaux lors des inondations ?

Oui Non

Si votre résidence a un sous-sol, a-t-il été atteint par les eaux lors des inondations ?

Oui Non

Section B. Informations de base du répondant

Cette partie du questionnaire va permettre d'apporter des informations complémentaires pour dresser un portrait sociodémographique des répondants sur la vulnérabilité aux inondations.

Quel est le sexe du répondant ? Féminin Masculin

Quel est votre statut matrimonial ?

Vous vivez avec votre conjoint

Vous ne vivez pas avec un conjoint

Etes-vous propriétaire de cette résidence ? Oui Non

Est-ce votre résidence principale ? Oui Non

Quel est votre niveau d'éducation ?

SVP, veuillez cocher la période à laquelle vous avez été gradués pour le niveau d'éducation suivant :

Période	Secondaire	Postsecondaire
Avant 2000		
Entre 2000 et 2010		
Après 2010		

Quel est votre occupation professionnelle ?

SVP, veuillez cocher les cases correspondantes en fonction des périodes.

Période	Temps complet	Temps partiel	Retraité	Sans emploi	Autres
Avant 2000					
Entre 2000 et 2010					
Après 2010					

Quelle est votre plage de revenu annuel ?

SVP, veuillez cocher les cases correspondantes en fonction des périodes.

Période	Moins de 15 000\$	15001\$-25000\$	25001\$-35000\$	35001\$-45000\$	45001\$-55000\$	55001\$-65000\$	65001\$-75000\$	75001\$-85000\$	85001\$et plus
Avant 2000									
Entre 2000 et 2010									
Après 2010									

Quelle proportion de votre revenu annuel consacrez-vous à votre logement (incluant le bail si locataire/hypothèque, les taxes d'habitation, l'électricité, l'eau, le combustible, l'assurance logement et les travaux de réparations) ?

SVP, veuillez cocher les cases correspondantes en fonction des périodes.

Période	< 20%	21% à 30%	31% à 40%	41% et plus
Avant 2000				
Entre 2000 et 2010				
Après 2010				

Si vous souhaitez témoigner et/ou transmettre des photos concernant les inondations de votre résidence (celle qui fait l'objet de ce questionnaire) ou du territoire de votre municipalité, nous vous invitons à les placer dans cette partie du questionnaire.

ANNEXE II- QUESTIONNAIRE Q2 ADRESSÉ AUX RESIDENCES NON INONDÉES



Questionnaire pour l'enquête sur l'analyse de la vulnérabilité aux inondations dans la MRC de Bonaventure

Nous vous invitons à répondre au meilleur de votre connaissance aux différentes questions dans ce questionnaire. Les données collectées seront utilisées dans la confidentialité. Seules les données traitées et agrégées feront état d'éventuelles publications. Ce questionnaire a été certifié par le comité éthique de la recherche de l'Université du Québec à Rimouski sous le numéro CER-114-877 en conformité avec la politique d'éthique de la recherche avec les êtres humains.

Section A : Questionnaire adressé aux résidentes et résidents qui n'ont jamais été affectés par les inondations.

Cette partie du questionnaire va permettre d'apporter des informations provenant des personnes n'ayant pas été affectées par les inondations mais qui ont côtoyé les personnes affectées par les inondations. Les personnes concernées par cette partie sont des personnes habitant aux alentours immédiats et en dehors des zones affectées par les inondations. Les informations collectées appuieront celles données par les personnes affectées par les inondations sur les causes des inondations, les mesures de gestion, et l'évolution de leur perception du risque lié aux inondations dans la municipalité.

Date :

Municipalité :.....

Adresse

complète :.....

Courriel :.....

Depuis combien de temps habitez-vous à cette adresse dans cette municipalité ?

.....

D'après vous, avez-vous souvenir qu'une partie de la municipalité/ville ait été inondée dans le passé ? Oui Non

Si oui, quelle(s) date(s) ?

.....

Votre résidence a-t-elle un sous-sol ? Oui Non

Si oui, à quelle période ce sous-sol a-t-il été construit ? Cochez la case correspondante.

Avant 2000	Entre 2000 et 2010	Après 2010

A quelle période ce sous-sol a-t-il été aménagé complètement ? Cochez la case correspondante

Avant 2000	Entre 2000 et 2010	Après 2010

Veillez nous aider à compléter ce tableau :

Période	Nombre total de personnes dans la résidence (de façon quotidienne ou pendant une période dans l'année)	Nombre de personnes ayant moins de 15 ans	Nombre de personnes ayant plus de 65 ans	Nombre de personnes à mobilité réduite ou non autonome ayant entre 15 et 65 ans
Avant 2000				
Entre 2000 et 2010				
Après 2010				

D'après vous, existe-il des facteurs socio-économiques et/ou politiques qui ont contribué à aggraver le risque lié aux inondations dans votre municipalité ?

Oui Non

Si oui, lesquels et à quel moment les avez-vous observés ?.....

.....

D'après vous, existe-t-il des processus individuels, collectifs et/ou territoriaux qui ont façonné la vulnérabilité/risque aux inondations dans la municipalité ?

Oui Non

Si oui, lesquels (ou les décrire) et quand ont-ils été mis en place ?

.....

D'après vous, existe-il des facteurs naturels et/ou anthropiques qui ont contribué à aggraver le risque lié aux inondations dans la municipalité ?

Embâcle de glace

Embâcle de bois

Dynamique estuarienne (effet de marées, ondes de tempête côtière)

Cône alluvial (Forme fluviale associée au débordement soudain et intense d'un cours d'eau plus ou moins à forte pente située à la jonction d'un versant et d'une plaine inondable)

Erosion/sédimentation

Modification dans l'occupation du sol vers les zones inondables

Exfiltration d'eau dans le sous-sol du bâtiment

Autres

Si autres, lesquels ?

.....

D'après vous, quelles seraient les implications pour vous de savoir que votre résidence fait partie des zones inondables au regard de la nouvelle réglementation sur des contraintes liées à l'aménagement et à la construction en zone inondable de la cartographie des zones d'inondation qui va être adoptée prochainement ?

Impact sur la valeur de la propriété

Incapacité d'obtenir un prêt hypothécaire auprès d'une institution financière pour l'achat de la maison

Hausse des coûts d'assurance

Incapacité de procéder à des rénovations majeures (agrandissement, ajout d'un sous-sol...)

Relocalisation

Autre (à préciser)

Avez-vous entrepris d'aider les personnes inondées pendant les inondations ?

Oui Non

Si oui, de quelle manière ?

.....
.....
.....

Avez-vous entrepris d'aider les personnes inondées après les inondations ?

Oui Non

Si oui, de quelle manière ?

.....

Quelle(s) coupure(s) de service(s) avez-vous subi à cause des inondations pendant les périodes suivantes ?

Période	Electricité	Eau potable	Eaux usées	Téléphone	Gaz	Transport	Commerce d'alimentation	Autre service (à préciser)
Avant 2000								
Entre 2000 et 2010								
Après 2010								

Sur une échelle de 1 à 10, quel niveau de confiance accordez-vous à l'efficacité de gestion du risque lié aux inondations par les autorités municipales ? (1 étant le plus faible niveau de confiance et 10 le niveau de confiance le plus élevé. Ne répondez que pour les périodes durant lesquelles vous résidiez dans la municipalité)

Avant 2000 : 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Entre 2000 et 2010 : 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Après 2010 : 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Sur une échelle de 1 à 10, quel niveau de perception avez-vous de votre vulnérabilité face au risque lié aux inondations ? (1 étant le plus faible niveau de perception de la vulnérabilité et 10 le niveau de perception de la vulnérabilité le plus élevé. Ne répondez que pour les périodes durant lesquelles vous résidiez dans la municipalité)

Avant 2000 : 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Entre 2000 et 2010 : 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Après 2010 : 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Sur une échelle de 1 à 10, quel niveau de préparation pensez-vous avoir vis-à-vis de votre capacité à faire face au risque lié aux inondations ? (1 étant le plus faible niveau de préparation et 10 le niveau de préparation le plus élevé. Ne répondez que pour les périodes durant lesquelles vous résidiez dans la municipalité)

Avant 2000 : 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Entre 2000 et 2010 : 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Après 2010 : 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Sur une échelle de 1 à 10, quel est le niveau de vulnérabilité de votre résidence face au risque lié aux inondations du 2 décembre 2020 ? (1 étant le plus faible niveau de vulnérabilité et 10 le niveau de vulnérabilité le plus élevé.)

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

Quel est votre niveau d'éducation ?

SVP, veuillez cocher la période à laquelle vous avez été gradués pour le niveau d'éducation suivant :

Période	Secondaire	Postsecondaire
Avant 2000		
Entre 2000 et 2010		
Après 2010		

Quel est votre occupation professionnelle ?

SVP, veuillez cocher les cases correspondantes en fonction des périodes.

Période	Temps complet	Temps partiel	Retraité	Sans emploi	Autres
Avant 2000					
Entre 2000 et 2010					
Après 2010					

Quelle est votre plage de revenu annuel ?

SVP, veuillez cocher les cases correspondantes en fonction des périodes.

Période	Moins de 15000\$	15001\$-25000\$	25001\$-35000\$	35001\$-45000\$	45001\$-55000\$	55001\$-65000\$	65001\$-75000\$	75001\$-85000\$	85001\$ et plus
Avant 2000									
Entre 2000 et 2010									
Après 2010									

Quelle proportion de votre revenu annuel consacrez-vous à votre logement (incluant le bail si locataire/hypothèque, les taxes d'habitation, l'électricité, l'eau, le combustible, l'assurance logement et les travaux de réparations) ?

SVP, veuillez cocher les cases correspondantes en fonction des périodes.

Période	< 20%	21% à 30%	31% à 40%	41% et plus
Avant 2000				
Entre 2000 et 2010				
Après 2010				

Si vous souhaitez témoigner et/ou transmettre des photos concernant les inondations du territoire de votre municipalité, nous vous invitons à les placer dans cette partie du questionnaire.

ANNEXE III- QUESTIONNAIRE ADRESSÉ AUX GESTIONNAIRES



Questionnaire pour l'enquête sur l'analyse de la vulnérabilité aux inondations dans la MRC de Bonaventure

Nous vous invitons à répondre au meilleur de votre connaissance et selon votre compréhension aux différentes questions de ce questionnaire. Les données collectées seront utilisées dans la confidentialité. Seules les données traitées et agrégées feront état d'éventuelles publications. Ce questionnaire a été certifié par le comité éthique de la recherche de l'Université du Québec à Rimouski sous le numéro CER-114-877 en conformité avec la politique d'éthique de la recherche avec les êtres humains.

Section A. Enquête auprès des autorités municipales

Cette partie du questionnaire s'adresse aux autorités municipales et vise à recueillir leurs efforts dans la réduction de la vulnérabilité aux inondations des populations et les causes ayant conduit aux inondations dans leurs municipalités.

Date :

Municipalité de :

Courriel :

Quelles actions la municipalité a-t-elle entreprises pour aider les personnes à risque d'inondation avant les inondations pour les périodes suivantes ?

Période	Actions entreprises pour aider les personnes à risque <u>avant</u> les inondations (mesures structurelles et non-structurelles)
Avant 2000	
Entre 2000 et 2010	
Après 2010	

Quelles actions la municipalité a-t-elle entreprises pour aider les personnes à risque d'inondation pendant les inondations pour les périodes suivantes ?

Période	Actions entreprises pour aider les personnes à risque <u>pendant</u> les inondations (mesures d'intervention d'urgence)
Avant 2000	
Entre 2000 et 2010	
Après 2010	

Quelles actions la municipalité a-t-elle entreprises pour aider les personnes à risque lié aux inondations après les inondations pour les périodes suivantes ?

Période	Actions entreprises pour aider les personnes à risque <u>après</u> les inondations (mesures de rétablissement ou de retour à la normale)
Avant 2000	
Entre 2000 et 2010	
Après 2010	

Existe-il des facteurs naturels et anthropiques qui ont contribué à aggraver le risque lié aux inondations dans la municipalité ?

Embâcle de glace

Embâcle de bois

Dynamique estuarienne (effet de marées, ondes de tempête côtière)

Cône alluvial (Forme fluviale associée au débordement soudain et intense d'un cours d'eau plus ou moins à forte pente située à la jonction d'un versant et d'une plaine inondable)

Erosion/sédimentation

Modification dans l'occupation du sol vers les zones inondables

Exfiltration d'eau dans le sous-sol du bâtiment

Autres

Si autres, lesquels ?

.....

Existe-il des facteurs socio-économiques et/ou politiques qui ont contribué à aggraver le risque lié aux inondations dans votre municipalité ?

Oui

Non

Si oui, lesquels et à quel moment ?

.....

.....

.....

.....

Existe-t-il un système d'alerte aux inondations dans la municipalité ?

Oui Non

Si oui, quelle est l'institution responsable et à quelle date le système d'alerte a-t-il été mis en place ?.....

Si oui, quel est le délai d'avertissement donné à la population avant la survenue de l'inondation (veuillez cocher les cases correspondantes en fonction des périodes) ?

Période	Moins d'une heure	Entre 1 et 2 heures	Entre 2h et 24 h	Entre 24 h et 48 h	Plus de 48 heures
Avant 2000					
Entre 2000 et 2010					
Après 2010					

Si oui, quelles actions les populations sont-elles censées exécuter en cas d'alerte (veuillez renseigner les cases correspondantes en fonction des périodes) ?

Période	Actions censés exécutées par les populations en cas d'alerte aux inondations
Avant 2000	
Entre 2000 et 2010	
Après 2010	

Quelle(s) coupure(s) de service(s) la municipalité a-t-elle subi à cause des inondations pendant les périodes suivantes ?

Période	Electricité	Eau potable	Eaux usées	Téléphone	Gaz	Transport	Commerce d'alimentation	Autre service (à préciser)
Avant 2000								
Entre 2000 et 2010								
Après 2010								

Pensez-vous qu'il existe une bonne cohérence entre les différentes stratégies de gestion des risques liés aux inondations inter-gouvernementale et/ou inter-institution pour la municipalité ?

Oui

Non

Si non quelle(s) insuffisance(s) relevez-vous ?

.....

D'après vous, dans quelle proportion en % les mesures prises par la Municipalité permettent de réduire de risque lié aux inondations ?.....

D'après vous, quelles sont les forces et les faiblesses de votre plan de gestion lors des inondations du 2 décembre 2020 ?

.....
.....

Sur une échelle de 1 à 10, quel est le niveau de réceptivité des populations face aux instructions de gestion et d'alerte données par votre municipalité lors des inondations du 2 décembre 2020 ? (1 étant le plus faible niveau de réceptivité et 10 le niveau de réceptivité le plus élevé) ?

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10

D'après vous, dans quelle proportion en % est-il possible de réduire de risque lié aux inondations d'ici 2030 en augmentant les mesures prises par la Municipalité pour réduire le risque ?.....

Les sections C et D complètent tous les questionnaires Q1, Q2 et Q3

Section C : Pondération des indicateurs de la sensibilité

Le laboratoire de géomorphologie et dynamique fluviale de l'UQAR espère comprendre les avis des experts et des gestionnaires des risques liés aux inondations ainsi que les opinions des résidents affectés par les risques liés aux inondations pour quantifier leur niveau de sensibilité dans l'analyse de la vulnérabilité aux inondations. Des indicateurs de sensibilité sociale et territoriale qui concourent à la construction de l'indice de la vulnérabilité aux inondations ont été élaborés. Pour cela, il vous est demandé de procéder à la pondération de ces indicateurs au meilleur de votre connaissance et de votre expérience. Cette pondération sera élaborée sur une échelle de 1 à 4 (1= importance faible, 2= importance moyenne, 3= importance élevée, 4 = importance très élevée) suivant les indications suivantes :

- Les indicateurs sociaux (liés aux personnes) seront pondérés par rapport à l'importance ou l'influence que la vulnérabilité (tous types) aux inondations a sur chacun des enjeux.
 - Les indicateurs territoriaux (liés aux bâtiments résidentiels) seront pondérés par rapport à l'ampleur du dommage (ou plutôt "conséquences" tous types) que subirait chacun de ces bâtis en cas d'inondation.
 - Les indicateurs territoriaux (liés aux infrastructures d'intérêts, critiques et linéaires) seront pondérés par rapport à l'importance de l'enjeu sur le bon fonctionnement de la communauté en cas d'inondation (pendant/urgences et après/rétablissement)
- Chaque notation attribuée sera suivie d'une justification.
-
-

Indicateurs pour l'analyse de la vulnérabilité aux inondations dans la MRC de Bonaventure			
Groupe d'indicateurs	Indicateurs	Justification de la pondération	Pondération sur une échelle de 1 à 4 (1= peu important et 4= très important)
	Indicateurs de sensibilité sociale		
<p>Consigne de pondération : Les indicateurs sociaux (liés aux personnes) seront pondérés par rapport à l'importance ou l'influence que la vulnérabilité (tous types) aux inondations a sur chacun des enjeux.</p>			
Groupes sociaux (à l'intérieur de la zone inondable)	Pourcentage de la population moins de 15 ans		
	Pourcentage de la population de plus de 65 ans		
	Pourcentage de familles vivant avec 1 enfant		

	Pourcentage de familles vivant avec 2 enfants et plus		
	Pourcentage de familles monoparentales		
	Pourcentage des ménages locataires		
Groupes économiques (à l'intérieur de la zone inondation)	Pourcentage des ménages propriétaires et locataires consacrant 30% ou plus de leur revenu au coût d'habitation ou du loyer brut		
	Revenu moyen des familles économiques		
	Taux de chômage		
	Proportion de la population de 25 ans et plus ne possédant aucun diplôme		
	Indicateurs de sensibilité territoriale		
<p>Consigne de pondération : Les indicateurs territoriaux (liés aux bâtiments résidentiels) seront pondérés par rapport à l'ampleur du dommage (ou plutôt "conséquences" tous types) que subirait chacun de ces bâtis en cas d'inondation</p>			

	Pourcentage de résidences dont le 1er plancher est atteint par les eaux lors des inondations		
<u>Bâtiments à usage de logement:</u> Pourcentage calculé par rapport aux bâtiments résidentiels de la zone d'inondation	Pourcentage de bâtiments isolés par l'inondation		
	Pourcentage de bâtiments à usage de logements		
	Pourcentage de logements mobiles		
	Pourcentage de logements avec sous-sol		
	Pourcentage de logements ayant leurs ouvertures face aux courants d'eau dominants		
	Pourcentage des bâtiments annexes		
Consigne de pondération : Les indicateurs territoriaux (liés aux infrastructures d'intérêts, critiques et linéaires) seront pondérés par rapport à l'importance de l'enjeu sur le bon fonctionnement de la communauté en cas d'inondation (pendant/urgences et après/rétablissement).			
<u>Infrastructures critiques:</u>	Pourcentage des services de santé - hôpitaux		

Pourcentage calculé par rapport aux infrastructures critiques de la zone d'inondation	Pourcentage des services de santé - cliniques privées		
	Pourcentage des stations de traitement des eaux usées		
	Pourcentage de puits d'eau potable		
	Pourcentage de postes de transformation d'énergie et de production d'énergie		
	Pourcentage de tours de télécommunication		
	Pourcentage de stations de police		
	Pourcentage de casernes de pompier		
	Pourcentage de centres de détention		
<u>Infrastructures d'intérêts:</u> Pourcentage calculé par rapport aux infrastructures d'intérêts de la	Pourcentage de garderie et CPE		
	Pourcentage des écoles primaires		
	Pourcentage des écoles secondaires		
	Pourcentage des hôtels et motels		
	Pourcentage des industries		

zone d'inondation	Pourcentage des commerces et services		
	Pourcentage des épiceries		
	Pourcentage des pharmacies		
	Pourcentage de stations de service		
	Pourcentage des dépotoirs		
	Pourcentage des entreprises déterminantes		
	Pourcentage des industries manipulant ou entreposant ou fabriquant des matières dangereuses		
	Pourcentage des sites d'intérêts et sites patrimoniaux		
<u>Infrastructures linéaires:</u> Pourcentage calculé par rapport aux infrastructures linéaires dans	Pourcentage de linéaire de ligne électrique inondée		
	Pourcentage de linéaire de gazoduc et d'oléoduc inondé		
	Pourcentage de linéaire d'aqueduc inondé		
	Pourcentage linéaire d'égout inondé		

la zone d'inondation	Pourcentage de km de route asphaltée (supérieur) inondée		
	Pourcentage de km de route asphaltée (local) inondée		
	Pourcentage de km de route non asphaltée inondée		
	Pourcentage de km de chemin de fer inondé		
<u>Infrastructures des ouvrages de franchissement:</u>	Pourcentage des ponts inondés (zone tampon de 200 m)		
Pourcentage calculé par rapport aux stocks de ponts dans la zone d'inondation	Pourcentage de ponceaux inondés (Zone tampon de 200 m)		

**Section D : CONSENTEMENT SPECIFIQUE POUR L'UTILISATION DES
DONNEES COLLECTEES DANS D'AUTRES PROJETS DU LABORATOIRE DE
GEOMORPHOLOGIE ET DYNAMIQUE FLUVIALE DE L'UQAR**

Je déclare avoir pris connaissance de l'utilisation de mes données dans les recherches futures mentionnée au point 3 du feuillet d'information, avoir obtenu les réponses à mes questions sur l'utilisation des données collectées sur d'autres projets menés par le directeur du laboratoire et comprendre le but, la nature, les avantages, les risques et les inconvénients de ces recherches.

Après réflexion et un délai raisonnable, je consens librement à ce que les données collectées soient utilisées pour d'autres recherches du laboratoire de géomorphologie et dynamique fluviale de l'UQAR. Je sais que je peux me retirer en tout temps sans préjudice et sans devoir justifier ma décision.

Signature*:

Date :

Nom :

Prénom :

*Pour la partie réservée à la signature, écrivez votre nom et prénom.

Pour toute question relative aux autres projets, ou pour vous retirer de ces autres projets du laboratoire de géomorphologie et dynamique fluviale de l'UQAR, vous pouvez communiquer avec le directeur du laboratoire Thomas Buffin-Belanger (Professeur de géographie à l'UQAR), au numéro de téléphone suivant : (418) 732 2901 ou à l'adresse de courriel suivante : Thomas_Buffin-Belanger@uqar.ca

Nous vous remercions pour votre participation.

ANNEXE IV – Sommaire de l'article sur la représentation sociale du risque et ses implications dans l'orientation de l'adaptation

1. Introduction

(Risque suivant l'approche constructiviste, objectifs)

2. Méthode

2.1 Enquête

(Vulnérabilité perçue, capacité perçue, niveau de confiance, caractéristique socioéconomique, durée de résidence, mesure de protection face à l'inondation du 2 décembre 2020)

2.2 Construction de l'indice de la capacité à composer avec le risque lié aux inondations (ICCRI)

2.2.1 Sélection des motivations à rester et des motivations à déménager

2.2.2 Échelle de pointage et Expression de l'indice

2.2.3 Détermination des seuils et classification

2.2.4 Validation de l'indice (auto-validation)

3. Résultats

3.1 Indice de la capacité à composer avec le risque lié aux inondations

3.2 Interaction entre l'ICCRI et la durée de résidence, le niveau de revenu, la taille de la famille, le niveau de scolarité, la vulnérabilité perçue, la capacité perçue et le niveau de confiance

4. Discussion

4.1 l'ICCRI et l'acceptation du risque

4.2 Importance de l'ICCRI dans l'orientation de l'adaptation

4.3 Triangle des acteurs

5. Conclusion

6. Remerciement

7. Références

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abson, D.J., Dougill, A.J., Stringer, L.C. (2012). Utilisation de l'analyse en composantes principales pour la cartographie de la vulnérabilité socio-écologique riche en informations en Afrique australe *Appl. Géogr.* , 35, p. 515 – 524.
- ACDI. (2004). CIDA Evaluation Guide. (Guide d'évaluation de l'ACDI) Consulté le 28.04.2021 sur : [http://www.acdi-cida.gc.ca/INET/IMAGES.NSF/vLUIImages/Performancereview5/\\$file/english-e-guide.pdf](http://www.acdi-cida.gc.ca/INET/IMAGES.NSF/vLUIImages/Performancereview5/$file/english-e-guide.pdf)
- Adger, V. (2006). Vulnerability. *Global Environmental Change* 16. 268–281.
- Adger, W. N. (1998). Indicators of social and economic vulnerability to climate change in Vietnam. 42.
- Alvarez, S., Paas, W., Descheemaeker, K., Tiftonell, P., Groot, J.C.J. (2014). Constructing typologies, a way to deal with farm diversity: general guidelines for the Humidtropics. Report for the CGIAR Research Program on Integrated Systems for the Humid Tropics. Plant Sciences Group, Wageningen University, the Netherlands.
- Armstrong, S. B. & Lazarus, E. D. (2019). Reconstructing patterns of coastal risk in space and time along the US Atlantic coast, 1970–2016, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 19, 2497–2511, <https://doi.org/10.5194/nhess-19-2497-2019>, 2019.
- Balica, S.F., Douben, N., Wright, N.G. (2009). Flood vulnerability indices at varying spatial scales. *Water Sci Technol J* 60(10):2571–2580, ISSN 0273-1223.
- Balica, S.F. & Wright, N.G. (2010). Reducing the complexity of the flood vulnerability index, *Environmental Hazards*, 9:4, 321-339. <http://dx.doi.org/10.3763/ehaz.2010.0043>.
- Balica, S.F. & Wright, N. G. (2017). Reducing the complexity of the flood vulnerability index Reducing the complexity of the flood vulnerability index. 7891(June).
- Balica, S.F. & Wright, N.G. (2012). Applying the flood vulnerability index as a knowledge base for flood risk assessment, Doctorate thesis. Delft University. 170 p.

- Bankoff, G. (2007). Comparing Vulnerabilities: Toward Charting an Historical Trajectory of Disaster. *Historical Social Research*, Vol. 32, N° 3, 103-114.
- Bankoff, G., Hihorst, D. & Frerks, G. (2004). *Mapping Vulnerability: Disasters, Development and People*, Routledge, 256 p.
- Barette, N., Vandersmissen M.-H. & Roy F. (2018). Atlas de la vulnérabilité de la population québécoise aux aléas climatiques. <https://atlas-vulnerabilite.ulaval.ca/>
- Barroca, B., Bernardara, P., Mouchel J. M. & Hubert G. (2006). Indicators for identification of urban flooding vulnerability. 553–561.
- Barroca, B., Pottier, N., Lefort E. (2005). Analyse et évaluation de la vulnérabilité aux inondations du bassin de l’Orge aval. *Septième Rencontres de Théo Quant* 12
- Baud, D. & Bonnemains, A. (2018). Trajectoires de vulnérabilité des territoires de montagne face aux changements globaux, *Journal of Alpine Research | Revue de géographie alpine* [En ligne], 106-3.
- Beck, U. (2006). « Risque et société » dans Sylvie MESURE et Patrick SAVIDAN, *Le dictionnaire des sciences humaines*, Paris, Quadrige, PUF, dicos poche, p. 1022.
- Bernard, H. R. (2013). *Social research methods: qualitative and quantitative approaches*. Los Angeles, SAGE, 789 p.
- Billet, P. (2000). La zone inondable : essai de typologie de la délimitation juridique des zones soumises au risque inondation. The spatial control of flood risks: a legal viewpoint. In: *Géocarrefour*, vol. 75, n°3, 2000. Sur la séquence orageuse de novembre 1999. pp. 245-254; <https://doi.org/10.3406/geoca.2000.2471>.
- Birkmann, J. (2006). *Measuring vulnerability to natural hazard*, New-Delhi, Unu- Teri Press, 527 p.
- Birkmann, J. (ed.) (2006). *Measuring Vulnerability to Natural Hazards: Towards Disaster Resilient Societies*. United Nations University Press, New York.
- Bogardi, J.J. (2004). Hazards, risks and vulnerabilities in a changing environment: the unexpected onslaught on human security? *Global Environmental Change*, 14, pp. 361–365.
- Bohle, H-G. (2002). Land degradation and human security, In : Plate, E. (Ed.), *Environment and Human Security, Contributions to a workshop in Bonn*. Bonn.

- Bouchard, L. (2009). Modèle d'application des prescriptions de la politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables par les municipalités du Québec. (Essai de maîtrise, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, QC, Canada). https://savoirs.usherbrooke.ca/bitstream/handle/11143/7064/cufe_Bouchard_essai64.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Bouillon, M.-C., Brissette, F.P. & Marche, C. (1999). Le risque d'inondation et son évolution sur la rivière chateauguay. *Can.J. Civ Ing.*26 : 186-196.
- Bryant, S. P., Davies, E.G. R., Sol, D., & Davis, S. (2022). The progression of flood risk in southern Alberta since the 2013 flood. *Journal of Flood Risk Management*, 1–18. <https://doi.org/10.1111/jfr3.1281116BRYANTETAL>.
- Breyse, D. (2009). UNIT : Projet cyber ingénierie des risques en génie civil.
- Brown, J.P., Contini, B., & McGuire, C.B. (1973). An economic model of flood plain land use and land use policy. *Water Resources Research*, 8(1): 18-32.
- Bruley, E., Locatelli, B., Vendel, F., Bergeret, A., Elleaume, N., Grosinger, J., & Lavorel, S. (2021). Historical reconfiguration of a social-ecological system adapting to economic, policy and climate changes in the French Alps, *Regional Environmental Change*.21:34.
- Buckle, P., Marsh G. & Smale S. (2001). Assessment of personal and community resilience and vulnerability - Principles, Strategies and Actions, Department of Human Services, Victoria, Australia.
- Buffin-Bélangier, T, Beaudoin, J.F., Maltais, M., Tomety, Y.D., & Laroche, S. (2022). Cartographie des zones inondables dans la MRC de Bonaventure - Rivières Cascapédia, Petite-Cascapédia, Bonaventure, Paspébiac et Kilmore. Remis au MAMH, juin 2022. 55 p.
- Calvez, M. (2007). Le seuil façonnable d'acceptabilité culturelle du risque. Journées annuelles du comité consultatif national d'éthique pour les sciences de la vie et de la santé. pp.350-362. halshs-00484114
- Canon, T. (2000). Vulnerability Analysis and Disasters In Parker D.J (Ed.), *Flood*, Routledge, New York. 45-55.
- Cardona, O. D. (2003). A need for rethinking the concept of vulnerability and risk from a holistic perspective: A necessary review and criticism for effective risk management. In G. Bankoff, G. Frerks, & D. Hilhorst, *Mapping Vulnerability: Disasters, Development and People* (p. Chapter 3). London: Earthscan Publishers.

- Cauvin, C., Reymond, H. & Serradj, A. (1987). *Discrétisation et représentation cartographique*. Montpellier: GIP Reclus, 116 p.
- Chambers, R. (1989). Vulnerability, coping and policy, *IDS Bulletin*, 20-2, Sussex, pp. 1-7.
- Chambers R. (1995) *Poverty and Livelihoods: Whose Reality Counts?*, *Environment and Urbanization*, 7, 173-204
- Choé, G., Benacchio, V., Olcese G., Buffin-Bélangier, T. & Biron, P. (2019). *Évaluation préliminaire du risque d'inondation : développement et application d'une méthodologie*. Rapport d'étude.
- Colburn, L. & Seara T. (2011). Resilience, vulnerability, adaptive capacity, and social capital. 1–14.
- Communiqué de presse du Gouvernement du Québec, *Inondation 2017*. (2017). Québec attend jusqu'à 245 millions d'Ottawa <https://www.lapresse.ca/actualites/national/201807/12/01-5189360-inondations-2017-quebec-attend-jusqua-245-millions-dottawa.php> consulté le 14/01/2019 à 15 h 54.
- Creach, A., Pardo, S. & Mercier, D. (2017). Diagnostic préventif de la vulnérabilité des constructions résidentielles pour leurs occupants face au risque de submersion marine appliqué à l'île de Noirmoutier (Vendée, France). *VertigO*, 17(1).
- Cutter, S.L., Boruff, B.J. & Shirley, W.L. (2003). Social vulnerability to environmental hazards. *Social Science Quarterly*, 84(2): 242-261.
- D'Ercole, R., Thouret, J.-C. & Dollfus O. et al. (1994). "Les vulnérabilités des sociétés et des espaces urbanisés : concepts, typologie, modes d'analyse", *Revue de géographie Alpine*, vol. 82, no. 4, pp. 87–96.
- Dal Cin, R., Simeoni, U. (1989). Coastal zoning and vulnerability: application to the Middle Adriatic (Italy). *Coastal Zone '89* 3:98–110.
- Dantzig, D.V. (1956). Economic decision problems for flood prevention. *Econometrica*, 24(3) : 276-287.
- Dauphiné A. (2003). *Risques et catastrophes*, Paris, Armand Colin, 288 p.
- Dauphiné, A. & Provitolo D. (2013). *Risques et catastrophes-Observer, spatialiser, comprendre, gérer*, Paris, Armand Colin, 416 p.

- De Leon, V. (2006). Vulnerability, a conceptual and methodological review, UNU-EHS, SOURCE no4/2006. Measuring Vulnerability to Natural Hazards: Towards Disaster Resilient Societies, Chapter 3, J. Birkmann (ed.). United Nations University Press, New York.
- Defossez, S., Vinet F. & Leone F. (2018). Diagnostiquer la vulnérabilité face aux inondations : progrès et limites. Inondations 1 : La connaissance du risque, hal-03171204.
- Dempster, A.P. & Rubin, D.B. (1983). Introduction pp.3-10, in Incomplete Data in Sample Surveys (vol. 2): Theory and Bibliography (W.G. Madow, I. Olkin and D.B. Rubin eds.) New York: Academic Press.
- Deudon, L. (2016). « Construction et évolution de vulnérabilité dans la vallée de l'Escaut (France) et la vallée du Saint-Laurent (Québec), XVIIe – XIXe siècles », VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement [En ligne], Volume 16 numéro 3.
- Dialga I. & Le T. (2014). Développement d'indices composites et politiques publiques : interactions, portée et limites méthodologiques, Lemna, 38 p.
- Diamond, J. M. (1998). Guns, germs and steel. A Short History of Everybody for the Last 13,000 Years, London.
- Dottori, F., Martina M. L. V. & Figueiredo R. (2018). A methodology for flood susceptibility and vulnerability analysis in complex flood scenarios. Journal of Flood Risk Management, 11, S632–S645.
- Drejza, S., Marie, G., C. Pelletier-Boily, Fraser, C. & Bernatchez P. (2021). Indice de vulnérabilité de la zone côtière à l'érosion - Rapport méthodologique. Chaire de recherche en géoscience côtière, Laboratoire de dynamique et de gestion intégrée des zones côtières, Université du Québec à Rimouski. Rapport remis au ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, septembre 2021, 209 p.
- Duvat, V., Volto, N., Stahl, L., Moatty, A., Defossez, S., Desarthe, J., Grancher, D., Pillet, V., (2021). Understanding interlinkages between long-term trajectory of exposure and vulnerability, path dependency and cascading impacts of disasters in Saint-Martin (Caribbean), *Global Environmental Change*, n°67.
- Duvat, V.K.E, Magnan, A. K., Wise, R. M., Hay, J. E., Fazey, I., Hinkel, J., Stojanovic, T., Yamano, H. & Ballu, V. (2017). Trajectories of exposure and vulnerability of small islands to climate change. WIREs Clim Change 2017, e478. doi: 10.1002/wcc.478.

- Eckstein, O. (1958). *Water resources development; the economics of project evaluation*. Harvard University Press, Cambridge, Mass.
- Eleuterio, J., Payraudeau, S. & Rozan, A. (2008). Sensibilité de l'évaluation des dommages associés aux inondations en fonction de la caractérisation de la vulnérabilité des bâtiments. *Ingénieries eau-agriculture-territoires*, Lavoisier, IRSTEA; CEMAGREF; p.29-44. Hal-00473922.
- Ewald, F. (2000). La société du risque. Risque et politique. In : Conférence N° 294 du 20 octobre 2020.
- Fatemi, F., Ardalan, A., Aguirre, B., Mansouri, N. & Mohammadfam, I. (2016). Social vulnerability indicators in disasters: Findings from a systematic review. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Elsevier Ltd, 22, 219–227.
- Fedeski, M. & Gwilliam, J. (2007). Urban sustainability in the presence of flood and geological hazards: The development of a GIS-based vulnerability and risk assessment methodology. *Landscape and Urban Planning*, 83 (1), 50-61. Doi://dx.doi.org/10.101016/j.landurbplan.2007.05.012.
- Fekete, A. (2009). Validation of a social vulnerability index in context to river-floods in Germany. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, 393–403, 2009.
- Fekete, A., Damm, M. & Birkmann, J. (2010). Scales as a challenge for vulnerability assessment. *Natural Hazards*, 55(3): 729-747.
- Fernandez, P., Mourato, S., Moreira, M. & Pereira, L. (2016). A new approach for computing a flood vulnerability index using cluster analysis. *Physics and Chemistry of the Earth*, Elsevier Ltd, 94, 47–55.
- Folke, C., Carpenter, S.R., Elmqvist, T., Gunderson, L., Holling, C.S. & Walker B. (2002). Resilience and sustainable development: building adaptive capacity in a world of transformation, *Ambio*, 31, 5, 437-440.
- Frigerio, I., Carnelli, F., Cabinio, M. & De Amicis M. (2018). Spatiotemporal Pattern of Social Vulnerability in Italy. *International Journal of Disaster Risk Science*, Beijing Normal University Press, 9(2), 249–262.
- Frini, A., Besnard, C.A., Benabbou, L., Adda, M. & Buffin-Bélanger, T. (2019). Outil de priorisation des bassins versants pour la gestion des risques des inondations dans le cadre de la mise en oeuvre de l'initiative Info-Crue au Québec. Rapport présenté Ouranos. Montréal. Université du Québec à Rimouski. 135 p. + annexe.

- Fritzsche, K., Schneiderbauer, S., Bubeck, P., Kienberger, S., Buth, M., Zebisch, M. & Kahlenborn, W. (2015). Guide de référence sur la vulnérabilité : Concept et lignes directrices pour la conduite d'analyses de vulnérabilité standardisées, GIZ, 178 p.
- Garry, G. (1994). Évolution et rôle de la cartographie dans la gestion des zones inondables en France. *Mappe Monde*, 4.
- Giacona, F., Martin, B., Eckert, N., Desarthe, J. (2019). Une méthodologie de la modélisation en géohistoire : de la chronologie (spatialisée) des événements au fonctionnement du système par la mise en correspondance spatiale et temporelle, *Physio-Géo*, vol. 14, pp. 171-199.
- Gilbert, C. (2006). « La vulnérabilité, une notion à explorer », *Dossier Pour la Science*, n° 51, p. 116-120.
- Giupponi, C., Giove, S. & Giannini, V. (2013). A dynamic assessment tool for exploring and communicating vulnerability to floods and climate change. *Environmental Modelling & Software* 44, 136 -147.
- Givone, P. (1998). Risques naturels et transcriptions cartographiques. Ingénieur EAT Risques naturels. <http://www.set-revue.fr/sites/default/files/articles-eat/pdf/DG1998-PUB00005260.pdf> consulté le 03 mai 2022.
- GIZ. (2017). Guide de référence sur la vulnérabilité. Concept et lignes directrices pour la conduite d'analyses de vulnérabilité standardisées, 180 p.
- GIZ/WRI (World Resource Institute). (2011). Making Adaptation Count. Concepts and Options for Monitoring and Evaluation of Climate Change Adaptation (Pour que l'adaptation compte. Concepts et solutions pour suivre et évaluer l'adaptation au changement climatique). Eschborn : GIZ. Consulté le 28.04.2021 sur : http://www.wri.org/sites/default/files/pdf/making_adaptation_count.pdf.
- Glas, H., De Maeyer, P., Merisier, S. & Deruyter, G., 2020. Development of a low-cost methodology for data acquisition and flood risk assessment in the floodplain of the river Moustiques in Haiti. *J Flood risk management*.
- Grigg, N.S., & Helweg, O.J. (1975). State of the art of estimating flood damage in urban areas. *Water Research Bulletin (AWRA)*, 11(2): 379-390.
- Guillard-Gonçalves, C., Cutter, S. L., Emrich, C. T. & Zêzere J.L. (2014). Application of Social Vulnerability Index (SoVI) and delineation of natural risk zones in Greater Lisbon, Portugal, *Journal of Risk Research*, DOI: 10.1080/13669877.2014.910689.

- Guillemot, J., Mayrand, E., Gillet, J. & Aubé, M. (2014). La perception du risque et l'engagement dans des stratégies d'adaptation aux changements climatiques dans deux communautés côtières de la péninsule acadienne. [VertigO] La revue électronique en sciences de l'environnement, 14 (2).
- Hellequin, A.-P., Flanquart H., Meur-Ferec C. & Rulleau B. (2013). Perceptions du risque de submersion marine par la population du littoral languedocien : contribution à l'analyse de la vulnérabilité côtière. *Natures Sciences Sociétés*, 21, 385-399. EDP Sciences 2014. DOI: 10.1051/nss/2014002.
- Hinkel, J. (2011). Indicators of vulnerability and adaptive capacity: Towards a clarification of the science-policy interface. *Global Environmental Change*, 21(1), pp.198-208.
- Hostache, R., Puech, C. & Raclot, D. (2005). Caractérisation spatiale de l'aléa inondation à partir d'images satellites RADAR. *Cybergeog: European Journal of Geography*, Sélection des meilleurs articles de SAGEO 2005 (article 381).
- HR Wallingford. (2006). FD2321/TR1. Flood Risks to People Phase 2. Technical Report 1: The Risks to People Methodology.
- Institut National de la Santé Publique du Québec/INSPQ, (2007). Indicateurs de vulnérabilité associé à la sécurité d'un territoire. *Vivre en sécurité > se donner les moyens.* Rapport, 72p.
www.inspq.qc.ca/pdf/publications/721_indicateurs_final_crpspc.pdf
- James, L.D. (1972). Role of economics in planning flood plain land use. *ASCE Journal Hydrology Division*, 98(HY6): 981-992.
- Janin, P. (2006). La vulnérabilité alimentaire des sahéliens : concepts, échelles et enseignements d'une recherche de terrain, *L'espace géographique*, 35-4, pp. 355-366.
- Jean-Baptiste, N., Kuhlicke, C., Kunath, A. & Kabisch S. (2011). Review and evaluation of existing vulnerability indicators in order to obtain an appropriate set of indicators for assessing climate related vulnerability. *CLimate change and Urban Vulnerability in Africa*, Helmholtz Centre for Environmental Research-UFZ, 1-180.
- Jebens, M., Sorensen, C. & Piontkowitz, T. (2016). Danish risk management plans of the EU Floods Directive, FLOODrisk 2016 - 3rd European Conference on Flood Risk Management, E3S Web of Conferences 7 23005. DOI: 10.1051/e3sconf/20160723005.

- Jongman, B., Kreibich, H., Apel, H., Barredo, J.I., Bates, P. D., Feyen, L., Gericke A., Neal J., Aerts, J.C.J.H. & Ward P.J. (2012). Comparative flood damage model assessment: towards a European approach. *Natural Hazards and Earth System Sciences (NHESS)*, 12, 12, 3733-3752. Doi:105194/nhess-12-3733-2012.
- Jongman, B., Winsemius, C. H., Aerts, J. C. J. H., Coughlan de Perez Evan Aalst, M. K., Krone, W. & Ward, P. J. (2015). Declining vulnerability to river floods and the global benefits of adaptation. Potsdam Institute for Climate Impact Research, Environmental science.
- Jonkman, S.N., Kok, M., Van Ledden, M. & Vrijling, J.K. (2009). Risk-based design of flood defense systems: a preliminary analysis of the optimal protection level for the New Orleans metropolitan area. *J. Flood Risk Management*. 2, 170–181.
- Karmaoui, A., Balica, S. F. & Messouli, M. (2016). Analysis of applicability of flood vulnerability index in Pre-Saharan region, a pilot study to assess flood in Southern Morocco. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 2(April), 1–24.
- Kienberger, S. (2007). Assessing the vulnerability to natural hazards on the provincial/community level in Mozambique: The contribution of GIScience and Remote Sensing, Joint CIG/ISPRS Conference on Geomatics for Disaster and Risk Management., Toronto, Canada.
- Kind, J. (2010). Efficient Flood Protection Standards based on cost benefit analysis. *Floods and Economics: appraising, prioritising and financing flood risk management measures and instruments*, Working Group F on Floods, Thematic Workshop 25-26/10/ 2010, Ghent, Belgium.
- Kissi, A. E., Abbey, G. A., Agboka, K. & Egbendewe A. (2015). Quantitative Assessment of Vulnerability to Flood Hazards in Downstream Area of Mono Basin, South-Eastern Togo: Yoto District. *Journal of Geographic Information System*, (December), 607–619.
- Leclerc, M., Secretan, Y., Heniche, M., Taha, B.M.J., Marion, O. & Marion, J. (2003). Une méthode prédictive non biaisée et géoréférencée d'estimation des dommages résidentiels d'inondation. *Can.J. Civ Ing.*30 : 914-922.
- Leone, F. & Vinet, F. (2006). La vulnérabilité, un concept fondamental au cœur des méthodes d'évaluation des risques naturels. In Frédéric Leone; Freddy Vinet. *La vulnérabilité des sociétés et des territoires face aux menaces naturelles : analyses géographiques*, Service des publications de Montpellier 3, pp.9-25, 2006. (hal-03055838).

- Léone, F. (2007). Caractérisation des vulnérabilités aux catastrophes « naturelles » : contribution à une évaluation géographique multirisques (mouvements de terrain, séismes, tsunamis, éruptions volcaniques, cyclones), Mémoire d'H.D.R, vol. 2, Université Paul Valéry Montpellier 3, 245p. + annexes.
- Léone, F., N. Meschniet de Richemond & Vinet F. (2010). Aléas naturels et gestion des risques, Paris, Presses Universitaires Françaises, 288 p.
- L'Homme, J. (2006). Modélisation des inondations en milieu urbain : approches unidimensionnelle, bidimensionnelle et macroscopique, Université de Montpellier II Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, 298 p.
- Liu, J. & Shi, Z.-w. (2017). Quantifying land-use change impacts on the dynamic evolution of flood vulnerability. *Land Use Policy* 65, 198–210.
- Luers A., L., Lobell, D., Sklar, L., S., Addams, C., L., Matson, P., M. (2003). A method for quantifying vulnerability, applied to the agricultural system of the Yaqui Valley, Mexico, *Global Environmental Change* 13, 255-267.
- Magnan, A. K. & Duvat, V. K.E. (2016). Trajectoires de vulnérabilité et adaptation au changement climatique à la Réunion. POLICY BRIEF - IDDRI N°08/16 NOVEMBRE 2016 | CLIMAT.
- Magnan, A. K., Duvat, V. K.E. & Garnier, E. (2012). Reconstituer les « trajectoires de vulnérabilité » pour penser différemment l'adaptation au changement climatique. *Natures Sciences Sociétés* 20, 82-91. NSS-Dialogues, EDP Sciences 2012. DOI: 10.1051/nss/2012008
- Mayer-Jouanjan, I. & Bleau, N. (2018). Projet 551013 : Historique des sinistres d'inondations et d'étiages et des conditions météorologiques associées. Rapport présenté à Environnement et Changement climatique Canada, au Gouvernement du Québec et à Ouranos. Montréal: Ouranos. 42p. + annexes
- McLaughlin, S., Cooper, J.A.G. (2010). A multi-scale coastal vulnerability index: a tool for coastal managers? *Environ Hazards J* 9:1–16. Earthscan ISSN: 1878-0059.
- Mechler, R. & Bouwer, L.M. (2015). Understanding trends and projections of disaster losses and climate change: is vulnerability the missing link? *Climatic Change* 133, 23–35 <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1141-0>.
- Messner, F., Penning-Rowsell, E., Green, C., Meyer, V., Tunstall, S. & Van Der Veen, A. (2007). Evaluating flood damages: guidance and recommendations on principles and methods, FLOODsite Consortium, Wallingford, UK.

- Meyer, W. (2011). Measuring: indicators – scales – indices – interpretations. (Mesurer : indicateurs – échelles – indices – interprétations). In : Stockmann, R. (ed.): A Practitioner Handbook on Evaluation. (Guide pratique de l'évaluation). Cheltenham : Edward Elgar.
- Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC). (2015). Guide d'interprétation version révisée 2015 : politique protection des rives, du littoral et des plaines inondables. <https://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/rives/guide-interpretationPPRLPI.PDF>
- Ministère de la sécurité civile du Québec. (2008). Concepts de base en sécurité civile. Rapport. 60 p.
- Ministère de la sécurité publique du Canada. (2013). Base de données canadienne sur les catastrophes. Récupérer sur le site <https://www.securitepublique.gc.ca/cnt/rsrsc/cndn-dsstr-dtbs/index-fr.aspx> le 15/01/2020 à 15h 22min
- Ministère de la Sécurité Publique Québec. (2018). Rapport annuel de gestion 2017-2018.
- Munda G. (1995). Multicriteria evaluation in a fuzzy environment, Physica-Verlag, Contributions to Economics Series, Heidelberg.
- Nardo, M., M. Saisana, A. Saltelli & Tarantola S. (2005). Tools for Composite Indicators Building. Rapport de la Commission européenne, URL : <http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC31473/EUR%2021682%20EN.pdf>, consulté le 05 mai 2021.
- Nasiri, H., Yusof, M. J. M., Ali, T. A. M. & Hussein, M. K. B. (2019). District flood vulnerability index: urban decision-making tool. International Journal of Environmental Science and Technology, Springer Berlin Heidelberg, 16(5), 2249–2258.
- OCDE. (2008). Handbook on constructing composite indicators: methodology and user guide, 158 p.
- O'Keefe, P., Westgate, K. & Wisner, B. (1976). «Taking the Naturalness out of Disasters». Nature, vol. 260 no 5552. 566-567.
- Oubennaceur, K. (2017). Analyse de l'incertitude dans la modélisation du risque d'inondation: étude de cas rivière Richelieu. Thèse de doctorat. Institut National de la Recherche Scientifique Centre Eau-Terre-Environnement.

- Oubennaceur, K., Chokmani, K., Gauthier, Y., Ratte-Fortin, C., Homayouni, S. & Toussaint, J.-P. (2021). Flood Risk Assessment under Climate Change: The Petite Nation River Watershed. *Climate* 9, 125. <https://doi.org/10.3390/cli9080125>.
- Poulin, J., Chokmani, K., Tanguy, M. & Bernier, M. (2012). Cartographie dynamique du risque d'inondations en milieu urbain. Rapport de recherche R1428. P.71
- Preston, B.L., Smith, T.F., Brooke, C., et al. (2008). Mapping climate change vulnerability in the Sydney Coastal Council Group. Report prepared for the Sydney Coastal Councils Group.
- Pricope, N. G., Halls, J. N., Rosul, L. M. & Hidalgo C. (2019). Residential flood vulnerability along the developed North Carolina, USA coast: High resolution social and physical data for decision support. *Data in Brief, The Author(s)*, 24, 103975.
- Provitolo, D. (2007). Vulnérabilité aux inondations méditerranéennes en milieu urbain : une nouvelle démarche géographique. *Annales de géographie*, (1) n° 653, pp. 23-40.
- Rakotoarisoa, M. M., Fleurant, C., Taibi, A. N., Rouan, M., Caillault, S., Razakamanana, T. & Ballouche, A. (2018). « Un modèle multi-agents pour évaluer la vulnérabilité aux inondations : le cas des villages aux alentours du Fleuve Fiherenana (Madagascar) », *Cybergeo : European Journal of Geography* [En ligne], GeOpenMod - Modèles et logiciels, document 857, consulté le 01 mai 2020. URL : <http://journals.openedition.org/cybergeo/29144>.
- Ramieri, E., Hartley, A., Barbanti, A., et al. (2011). Méthodes d'évaluation de la vulnérabilité côtière au changement climatique. ETC/CCA Technical Paper., I-40127 Bologne, Italie, Le Centre thématique européen sur les impacts, la vulnérabilité et l'adaptation au changement climatique (ETC/CCA) est un consortium d'instituts européens sous contrat avec l'Agence européenne pour l'environnement.
- Rebaï, N. & Alvarado Vélez, J. A. (2018). « Trajectoires de vulnérabilité des territoires ruraux dans les Andes d'Équateur : une analyse comparative », *Journal of Alpine Research | Revue de géographie alpine* [En ligne], 106-3 | Consulté le 15 avril 2021 à URL : <http://journals.openedition.org/rga/4918>.
- Rehan, M.B. (2018). Accounting public and individual flood protection measures in damage assessment: A novel approach for quantitative assessment of vulnerability and flood risk associated with local engineering adaptation options. *Journal of hydrology*, 563, 863-873.

- Rufat, S. (2017). Comment analyser la vulnérabilité aux inondations ? Approches quantitatives, qualitatives, francophones et anglophones. *Annales de géographie*, n° 715, pp. 287-312.
- Rufat, S., Tate, E., Burton, C. G. & Maroof, A. S. (2015). Social vulnerability to floods: Review of case studies and implications for measurement. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Elsevier Ltd, 14, 470–486.
- Rygel, L., O’sullivan, D. & Yarnal, B. (2006). A Method for Constructing a Social Vulnerability Index: An Application to Hurricane Storm Surges in a Developed Country. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 11(3): 741-764.
- Saisana, M., Tarantola, S., Saltelli, A. (2005). Uncertainty and sensitivity techniques as tools for the analysis and validation of composite indicators, *Journal of the Royal Statistical Society A*, 168(2), 1-17.
- Schauser, I., Otto, S., Schneiderbauer, S., et al. (2010). Urban Regions: vulnerabilities, Vulnerability Assessments by Indicators and Adaptation Options for Climate Change Impacts- Scoping Study ETC/ACC Technical Paper 2010/12. 3720 AH Biltoven, The Netherlands, The European Topic Centre on Air and Climate Change (ETC/ACC) is a consortium of European institutes under contract of the European Environment Agency.
- Sherrieb, K., Norris, F. H. & Galea, S. (2010). Measuring Capacities for Community Resilience. *Social indicators Research*, 99 (2), 227-247. Doi:10.1007/s11205-010-9576-9.
- Smit, B., Wandel, J. (2006). « Adaptation, adaptive capacity and vulnerability », in *Global Environmental Change*, n°16, pp. 282–292.
- Stevens, J.J. & Aleamoni, L.M. (1986). «The role of weighting in the use of aggregate scores », *Educational and psychological measurement*, vol. 46, p. 523-531.
- Tainter, J. A. (1988). *The Collapse of Complex Societies*, Cambridge et al.
- Tanoue, M., Hirabayashi, Y., Ikeuchi, H. (2016). Global-scale river flood vulnerability in the last 50 years. *Scientific Reports* | 6:36021 | DOI: 10.1038/srep36021.
- Tennessee Valley Authority. (1969). *TVA Research on flood loss rates*. Tennessee Valley Authority.
- Thomas, I., Hume, J., Auble, C., Gagnon, A., Larouche-Couture, J., Bünzli, N., Auboeuf, C. & Frances, N. (2017). Rapport 3. Le développement d’un outil de caractérisation et d’évaluation de la vulnérabilité face aux risques naturels : le cas de la municipalité de Saint-Raymond. Ministère de la sécurité publique du Québec.

- Thomas-Maret, I., Bleau, N., Soto Abasolo, P., Desjardins-Dutil, G., Fuamba, M. & Kadi, S. (2012). *Vulnérabilité sociale et territoire aux inondations des communautés de la rivière des prairies, Montréal dans le contexte des changements climatiques : Enjeux et méthode d'analyse*. Montréal.
- Thouret, J.-C. & D'Ercole, R. (1996). "Vulnérabilité aux risques naturels en milieu urbain: effets, facteurs et réponses sociales", *Cahiers des sciences humaines*, vol. 32, no. 2, pp. 407–422.
- Tomety, Y.D., Ozer P. & Dewald, D. (2017). Exposition et vulnérabilité face aux risques d'inondation au Burkina Faso. Mémoire de master de spécialisation. ULiège.
- Torterotot, J.-P. (1993). Le coût des dommages dus aux inondations : estimation et analyse des incertitudes, Cereve, École nationale des Ponts et Chaussées, Paris.
- Tung, Y.K. (2005). Flood defense systems design by risk-based approaches. *Water International*, vol. 30(1).
- Vanneuville, W., De Maeyer, P., Maeghe, K., & Mostaert, F. (2003). Model the effects of a flood in the Dender catchment based on a risk methodology. *Bulletin of the Society of Cartography*, 37(2), 59–64.
- Ville de New Richmond, (2020). <https://villenewrichmond.com/> Consulté le 2 avril 2020.
- Villordon, M. B. B. (2015). Community-based flood vulnerability index for urban flooding : understanding social vulnerabilities and risks Docteur en Sciences. Université Nice Sophia Antipolis, 552.
- Vrisou van Eck, N., Kok, M., & Vrouwenvelder, A. (1999). Standaardmethode Schade en Slachtoffers als gevolg van overstromingen, deel 2: Achtergronden, HKV Lijn in water, TNO, Dienst Weg en Waterbouw.
- Walker B.H., Carpenter S.R., Anderies J.M., Abel N., Cumming G.S., Janssen M.A., Lebel L., Norberg J., Peterson G.D., Pritchard R. (2002). Resilience management in social-ecological systems: a working hypothesis for a participatory approach, *Conservation Ecology*, 6, 1,14 (<http://www.consecol.org/vol6/iss1/art14>).
- Wilhelmi, O.V. & Morss, R.E. (2012). Integrated analysis of societal vulnerability in an extreme precipitation event: A Fort Collins case study. *Environmental Science & Policy*(0).
- Zischg, A.P., Hofer, P., Mosimann, M., Röthlisberger, V., Ramirez, J.A., Keiler, M. & Weingartner, R. (2018). Flood risk (d)evolution: Disentangling key drivers of flood risk change with a retro-model experiment. / *Science of the Total Environment* 639,195–207.

