

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

ANALYSE ACTUARIELLE ET MICROÉCONOMIQUE DES MESURES DE
PROTECTION CONTRE LES INONDATIONS RIVERAINES

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN MATHÉMATIQUES

PAR

ADÈLE DANIELLE N'CHO

OCTOBRE 2023

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.04-2020). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal 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 Montréal 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 l'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.»

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je voudrais remercier très sincèrement mon directeur de recherche, Mathieu Boudreault, pour sa bienveillance, son soutien constant, ses précieux conseils et ses remarques judicieuses. Il a su me guider et m'accompagner tout au long de mon apprentissage et m'a donné confiance en mes aptitudes de recherche.

J'aimerais également remercier Ursule Boyer-Villemare et Annabelle Lamy du consortium de recherche Ouranos pour le partage de leur expérience. Les conseils et les encouragements que j'ai reçus lors des stages effectués sous leur supervision ont été d'une grande richesse dans mon apprentissage.

Ensuite, je tiens à remercier mon conjoint, Jean Martial, pour son support et son aide précieuse, ainsi que ma mère, Suzanne, qui a su m'encourager à atteindre mes objectifs, malgré les obstacles rencontrés, et ce, peu importe la distance qui a pu nous séparer.

Finalement, je tiens aussi à remercier tous les professeurs du Département de mathématiques de l'Université du Québec à Montréal (UQAM) pour l'excellent enseignement reçu tout au long de mon parcours universitaire.

Ce projet de recherche a reçu le soutien financier de Mitacs et du consortium Ouranos dans le cadre du programme Mitacs Accélération.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES TABLEAUX	vii
LISTE DES FIGURES	viii
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I ANALYSE DU RISQUE D'INONDATION DANS LE BAS- SIN VERSANT DE LA RIVIÈRE CHAUDIÈRE	5
1.1 Contexte	5
1.2 Le risque d'inondation	6
1.2.1 La notion de risque	6
1.2.2 Les types d'inondations	7
1.2.3 Modélisation des dommages liés au risque d'inondation	9
1.2.4 Stratégies de gestion du risque d'inondation	12
1.3 Analyse de risque	13
1.3.1 Description de la zone d'étude	13
1.3.2 Données	13
1.3.3 Analyse de la vulnérabilité	16
1.4 Analyse coûts-avantages des mesures de protection	17
1.4.1 Cadre d'analyse	17
1.4.2 Résultats	19
1.4.3	22
1.5 Approche actuarielle fréquence-sévérité	22
1.5.1 Méthodologie	22
1.5.2 Valeur ajoutée de l'approche actuarielle fréquence- sévérité	24
1.5.3 Impacts des changements climatiques	24
1.6 Discussion	26

CHAPITRE II ANALYSE MICROÉCONOMIQUE DES MESURES DE MITIGATION DU RISQUE D'INONDATION	28
2.1 Contexte	28
2.2 Modèle simplifié d'estimation des dommages liés au risque d'inondation	30
2.2.1 Niveaux de vulnérabilité	31
2.3 Théorie microéconomique des choix en situation d'incertitude	33
2.3.1 L'aversion pour le risque et le concept d'utilité	33
2.3.2 La théorie de l'utilité espérée	34
2.3.3 Le modèle d'espérance de l'utilité escomptée	36
2.4 Statu quo	36
2.5 Relocalisation des résidences en zone inondable	37
2.5.1 Effet de la valeur et du niveau de risque de la propriété	39
2.5.2 Effet du degré d'aversion pour le risque du propriétaire	41
2.5.3 Acceptabilité du programme d'indemnisation du Québec	42
2.6 Élévation du premier plancher	44
2.6.1 Effet de la valeur de la propriété et de l'efficacité de la mesure	46
2.6.2 Effet du degré d'aversion au risque sur l'investissement maximal	48
2.6.3 Acceptabilité du programme d'indemnisation du Québec	49
2.7 Influence des biais cognitifs sur la décision optimale	50
2.7.1 Effet de la valeur additionnelle accordée au bien-être	51
2.7.2 Effet de la perception du risque	53
2.7.3 Effet de l'horizon de planification	56
2.8 Discussion	58
CHAPITRE III ANALYSE MATHÉMATIQUE DU MOMENT OPTIMAL DE MISE EN PLACE DES MESURES DE MITIGATION	61
3.1 Contexte	61
3.2 Éléments de la théorie des martingales et du temps d'arrêt optimal	63
3.2.1 Martingale, surmartingale et sousmartingale	63

3.2.2	Théorie du temps d'arrêt optimal	64
3.3	Analyse de la pertinence de la limite	65
3.3.1	Décision optimale, cas de l'allocation de départ fixe	66
3.3.2	Décision optimale, cas de l'allocation de départ réduite	67
3.4	Discussion	68
	CHAPITRE IV ASSURANCES D'ÉCHÉANCE UN AN	70
4.1	Contexte	70
4.2	Assurance complète	71
4.2.1	Effet de l'épargne sur le chargement de sécurité	74
4.2.2	Effet du degré d'aversion au risque et de la vulnérabilité sur le chargement de sécurité	75
4.3	Contrat d'assurance avec un déductible	77
4.3.1	Prime et chargement de sécurité maximal	77
4.3.2	Déductible optimal	79
4.4	Contrat d'assurance avec une limite d'indemnisation	81
4.4.1	Prime et chargement de sécurité maximal	81
4.4.2	Limite optimale	83
4.5	Discussion	85
	CHAPITRE V ASSURANCE MULTIANNÉES	87
5.1	Contexte	87
5.2	Assurance multiannées	88
5.3	Renouvellement d'un contrat d'assurance un an	89
5.4	Analyse des résultats	90
5.4.1	Effet du risque au renouvellement sur le chargement de sécurité	90
5.4.2	Effet de la durée du contrat sur le chargement de sécurité maximal	93
5.4.3	Effet de l'aversion pour le risque sur le chargement de sécurité	94
5.5	Discussion	95

CONCLUSION	98
----------------------	----

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page
1.1 Dénombrement et valeur foncière agrégée des bâtiments résidentiels en zone inondable	16
1.2 Dommages annuels agrégés selon la récurrence, le sous-horizon et le scénario d'émission de GES en dollar de 2019, Modèle médian .	17
1.3 Analyse coûts-avantages du rachat et de la démolition des résidences	21
1.4 Analyse coûts-avantages de l'élévation du premier plancher	22
2.1 Pourcentage minimal de la valeur de la propriété acceptable comme allocation de départ pour divers niveaux d'aversion pour le risque	41
2.2 Acceptabilité de l'allocation de départ offerte par le gouvernement du Québec	45
2.3 Investissement maximal en % de la valeur de la propriété selon le niveau de risque pour divers niveaux d'aversion pour le risque . .	48
4.1 Prime pure pour une propriété de 400 000\$	73
4.2 Prime pure pour un contrat d'assurance avec déductible	78
4.3 Prime pure pour un contrat d'assurance avec une limite de L \$. .	82
5.1 Chargement de sécurité additionnel (en %) pour un contrat d'assurance 5 ans lorsque la prime augmente de g après la première réclamation et que la propriété devient non assurable après un sinistre dont la réclamation excède un seuil s 50% de la valeur de la propriété, pour un propriétaire avec une aversion relative γ de 0,5.	92
5.2 Chargement de sécurité additionnel (en %) pour un contrat d'assurance 5 ans lorsque la prime augmente de g après la première réclamation et que la propriété devient non assurable après un sinistre dont la réclamation excède un seuil s 50% de la valeur de la propriété, pour un propriétaire avec une aversion relative γ de 1.5.	95

LISTE DES FIGURES

Figure	Page
1.1 Les composantes du risque	8
1.2 Méthode d'estimation des dommages causés par une inondation .	10
1.3 Zone d'étude SOURCE : COBARIC, 2014.	14
1.4 Courbes de submersion-dommages élaborées par Bonnifait (2005)	15
1.5 Illustration d'une courbe de probabilité-dommages	19
1.6 Distribution de la valeur actualisée des dommages, RCP 4.5 . . .	25
1.7 Distribution des dommages totaux cumulés sur 50 ans	25
1.8 Distribution du TRI de la mesure de rachat et démolition	27
2.1 Distributions conditionnelles des dommages matériels	32
2.2 Allocation de départ minimale selon la valeur de la propriété . . .	40
2.3 Allocation de départ minimale selon l'aversion	43
2.4 Investissement maximal selon la valeur de la propriété	47
2.5 Effet d'un bien-être additionnel sur l'adhésion à la relocalisation .	52
2.6 Effet du bien-être additionnel sur l'adoption d'une mesure d'immu- nisation	53
2.7 Allocation minimale selon la probabilité perçue	55
2.8 Investissement maximal selon la probabilité perçue	56
2.9 Effet de l'horizon temporel sur l'adhésion à la relocalisation	57
2.10 Effet de l'horizon temporel sur l'adoption de mesures de protection	59
4.1 Chargement de sécurité maximal selon l'épargne du propriétaire .	75

4.2	Chargement de sécurité maximal selon l'aversion	76
4.3	Deductible optimal selon le chargement de sécurité	80
4.4	Limite optimale selon le chargement de sécurité	84
5.1	Chargement de sécurité maximal selon la durée du contrat pour une augmentation de prime g de 25% à la première inondation et un seuil de non-assurabilité après un sinistre dont les dommages excèdent 50% de la valeur de la propriété pour une aversion relative γ de 0.5.	94

RÉSUMÉ

Les inondations sont le désastre naturel le plus important au Québec et au Canada. Les changements climatiques, l'urbanisation rapide, le vieillissement des infrastructures et l'inflation ont contribué à augmenter les coûts des inondations au pays. Cette situation pousse les gouvernements à revoir le mode de gestion des risques financiers qui y sont associés, et dans certains cas, à se désengager de l'indemnisation des sinistrés. Par conséquent, les sinistrés font désormais face à des choix complexes ayant des impacts financiers importants : Faut-il relocaliser, immuniser la propriété, souscrire à une police d'assurance ou assumer le risque financier futur ? Dans ce mémoire, nous analyserons d'un point de vue mathématique le choix individuel de rester, relocaliser, immuniser ou assurer la propriété, sous une perspective microéconomique. En d'autres termes, nous utiliserons la théorie microéconomique des choix en situation d'incertitude et la théorie des martingales et du temps d'arrêt optimal afin de déterminer la rationalité des options offertes ainsi que le moment d'adoption optimal. L'objectif de la recherche est d'explorer des pistes de solutions pour améliorer les programmes publics et privés afin de réduire les impacts financiers des inondations.

INTRODUCTION

Au Québec, les inondations constituent le risque naturel le plus fréquent et qui provoque le plus de dégâts matériels. Selon le Bureau d'assurance du Canada (BAC), 340 000 propriétés sont exposées au risque d'inondation au Québec. Environ 221 500 propriétés soit un peu plus de 8% des propriétés québécoises sont à risque élevé d'inondation (The geneva association, 2020). Les répercussions économiques des inondations sont immenses. À elles seules, les crues de 2017 et de 2019 ont engendré des coûts de près d'un milliard de dollars pour les municipalités touchées et le gouvernement (MAMH, 2020) et 322 millions de dollars de pertes assurées (BAC, 2023). Au-delà des conséquences matérielles et financières qu'elles entraînent, les inondations ont également des impacts socio-sanitaires importants qui sont plus difficiles à saisir et comptabiliser (Ouranos, 2023). Ces inondations exceptionnelles survenues aux printemps 2017 et 2019 ont eu des impacts majeurs sur la vie des communautés et la santé globale des individus (Buffin-Bélanger et *al.*, 2022). Elles ont mis en lumière la vulnérabilité du cadre bâti et la nécessité de repenser le modèle de gestion du risque d'inondation au Québec. En effet, il est devenu primordial d'une part de mettre en place des mesures efficaces de réduction des coûts à long terme surtout dans le contexte où les changements climatiques pourraient potentiellement exacerber le risque d'inondation dans le futur. D'autre part, il est apparu nécessaire de définir clairement les responsabilités des différents acteurs impliqués que sont les gouvernements, les municipalités, les assureurs et les propriétaires dans une optique de gestion intégrée du risque d'inondation.

Le Canada a longtemps été l'un des seuls pays du G7 à ne pas offrir de couverture d'assurance privée contre les inondations causées par des débordements de cours d'eau à cause de l'absence ou de la désuétude des cartes des zones inondables, du problème d'antisélection et de la faible viabilité économique de l'assurance inondation. Cependant, en réponse aux pressions sociales exercées par les assurés et les gouvernements, pour éviter le risque de mauvaise réputation et la perte potentielle de part de marché, les assureurs canadiens ont décidé à la suite des inondations majeures survenues en 2013 en Alberta, d'introduire une assurance inondation (Thistlethwaite, 2017). Depuis 2013, le marché de l'assurance inondation a pris de l'expansion au Canada et la plupart des assureurs de dommages offre une couverture d'assurance sous forme d'un avenant. En mettant un prix sur le risque d'inondation, la prime d'assurance sensibilise les assurés et les responsabilise davantage en leur procurant une motivation économique à mieux protéger leurs propriétés ou du moins à réduire l'exposition de celles-ci au risque d'inondation. De plus, lorsqu'accompagnée de mesures incitatives à la réduction du risque, l'assurance peut être un instrument important pour accroître la résilience des populations riveraines (Surminski et *al.*, 2016).

Au Québec la responsabilité d'indemniser les sinistrés revient en grande partie, au gouvernement provincial à travers le Programme général d'indemnisation et d'aide financière lors de sinistres réels ou imminents. À la suite des inondations majeures de 2017 et 2019, ce programme a connu plusieurs réformes afin de limiter l'indemnisation des propriétés sujettes aux inondations successives. En fait, dans la version du programme modifiée le 29 mars 2023, un propriétaire ayant reçu depuis avril 2019, un montant cumulatif d'aides financières atteignant 50% de la valeur de sa propriété jusqu'au maximum de 162 500 \$ se voit offrir trois options : relocaliser, immuniser sa propriété ou rester et assumer les dommages futurs liés aux inondations. L'instauration d'une limite est une forme de désenga-

gement du gouvernement ou responsabilisation des citoyens mais elle peut avoir des impacts financiers importants pour les propriétés à risque élevé (Boudreault et Bourdeau-Brien, 2020). Il est certes important de responsabiliser les citoyens afin de les inciter à prendre les mesures de réduction du risque appropriées, mais le choix auquel fait face l'individu est assez complexe. Sur quelles bases le citoyen doit-il faire le choix de se relocaliser, immuniser sa propriété, prendre la décision d'assumer les dommages futurs ou assurer sa résidence ? Est-il optimal d'attendre l'atteinte de la limite pour adopter une mesure de réduction du risque durable ? Quel pourrait être le coût d'une couverture d'assurance ?

Ce mémoire vise à explorer les pistes de solutions qui sont les plus efficaces économiquement et les incitatifs à mettre en œuvre pour qu'elles soient adoptées dans le but d'améliorer les programmes publics et privés visant à réduire les impacts financiers des inondations sur le territoire québécois. Nous analyserons donc le choix de rester, relocaliser, immuniser ou assurer la propriété, sous la perspective de la théorie microéconomique des choix en situation d'incertitude, afin de déterminer la rationalité des options offertes, selon le niveau de risque.

Le mémoire sera articulé autour de trois grandes parties. Dans la première partie, nous présenterons une analyse coûts-avantages de la mise en place de deux options d'adaptation dans le bassin versant de la rivière Chaudière (chapitre 1). Le but étant de mettre en évidence la valeur ajoutée d'une méthode actuarielle basée sur une analyse fréquence-sévérité et de montrer la pertinence d'adopter une approche qui prend en compte l'incertitude liée à la variabilité des dommages due à la fréquence des inondations.

La deuxième partie, constituée des chapitres 2 et 3, sera consacrée à l'analyse de la relocalisation et d'une mesure visant à réduire le risque. Nous nous intéresserons à l'effet du degré d'aversion au risque de l'individu, de la valeur de la propriété, du

bien-être associé au cadre de vie et de sa perception du risque sur la décision de relocaliser ou d'adopter une mesure de réduction du risque. Nous déterminerons également le moment optimal de mise en place de ces mesure en utilisant des éléments de la théorie des martingales et du temps d'arrêt optimal à temps discret.

Finalement la troisième partie, composée des chapitres 4 et 5, traitera de l'assurance. Nous nous baserons sur un modèle simplifié d'estimation des dommages afin d'estimer le niveau de prime et l'effet du degré d'aversion pour le risque sur le chargement de sécurité que l'assureur peut appliquer, pour plusieurs types de contrats. Nous terminerons en explorant la possibilité pour les assureurs d'offrir des contrats d'assurance inondation avec des échéances de plus qu'un an.

CHAPITRE I

ANALYSE DU RISQUE D'INONDATION DANS LE BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE CHAUDIÈRE

1.1 Contexte

L'objectif de ce chapitre est d'analyser la pertinence économique de la mise en place de mesures visant à réduire le risque, dans le bassin versant de la rivière Chaudière, selon deux approches : l'approche d'analyse coûts-avantages (ACA) et l'approche actuarielle fréquence-sévérité. Nous nous intéresserons exclusivement aux dommages physiques subis par les bâtiments résidentiels. Nous excluons donc les conséquences indirectes positives ou négatives pour les secteurs public, commercial et agricole ainsi que d'autres enjeux d'importance comme les impacts psychosociaux. Les principaux résultats présentés découlent des données et connaissances acquises durant les deux stages d'été effectués avec le Consortium de recherche Ouranos, dans le cadre du projet intitulé « Analyse coûts-avantages des options d'adaptation aux inondations dans un contexte de changements climatiques » piloté par Ouranos et Ressources naturelles Canada. Les résultats de ce projet, incluant toutes les différentes options d'adaptation étudiées, sont présentés dans le rapport de Boyer-Villemare et *al.* (2021b). Les résultats présentés dans ce mémoire ne proviennent pas du rapport, ils sont indépendants. Toutefois, ils représentent une analyse complémentaire qui vise à mettre en évidence la valeur

ajoutée de la méthode actuarielle et à montrer la nécessité d'adopter des critères de décision qui prennent en compte l'incertitude liée à la variabilité des dommages due à la fréquence des inondations.

Dans la première section de ce chapitre, nous présenterons une définition du risque d'inondation et de la chaîne de modélisation permettant d'aboutir à l'estimation des dommages nécessaire à l'évaluation des différentes stratégies de gestion de risque. Ensuite nous analyserons la pertinence économique des mesures de protection réalisables à l'échelle individuelle selon l'approche ACA basée sur le critère de la valeur actuelle nette (VAN). Enfin nous présenterons la méthode actuarielle basée sur une analyse fréquence-sévérité qui peut être utilisée dans le but d'améliorer la prise de décision.

1.2 Le risque d'inondation

1.2.1 La notion de risque

Le terme "risque" est employé dans de nombreux contextes et disciplines. Toutefois, la façon de le définir et de le présenter varie souvent d'une discipline à l'autre. Ainsi, cette notion pourra prendre des significations différentes selon le contexte et le secteur d'activités dans lequel il est employé. Dans ce mémoire, nous retiendrons le risque comme étant la combinaison de la possibilité que se produise à un endroit donné un aléa potentiel et des conséquences pouvant en résulter sur les éléments vulnérables d'un milieu qui y est exposé. Cette définition du concept de risque implique que l'on soit en présence de trois éléments fondamentaux comme illustré par la figure 1.1. :

1. L'aléa, qui représente le phénomène d'origine naturelle ou anthropique susceptible de causer des dommages corporels et/ou matériels, d'entraîner des

conséquences socioéconomiques ou de dégrader l'environnement. On peut citer comme exemple d'aléa une inondation, un ouragan, une explosion d'une centrale nucléaire. L'importance d'un aléa est déterminée principalement par son intensité, sa probabilité d'occurrence, sa localisation spatiale et l'étendue possible de ses effets ;

2. La vulnérabilité qui représente une condition résultant de facteurs physiques, sociaux, économiques ou environnementaux, qui prédispose les éléments (populations, bâtiments ou activités) exposés à la manifestation d'un aléa à subir des préjudices ou des dommages (Morin, 2008) ;
3. L'exposition qui représente la situation par laquelle sont mis en interaction dans un milieu donné, un aléa potentiel et les éléments qui y sont potentiellement vulnérables. Ainsi, c'est l'exposition d'éléments vulnérables du milieu aux effets d'un aléa qui conduit à établir la présence d'un risque.

1.2.2 Les types d'inondations

Une inondation consiste en un recouvrement temporaire par l'eau de terres normalement sèches dû à un débordement de canaux d'écoulement naturels, de rivages naturels ou des ouvrages de protections contre les crues (RNCAN, 2019). Les inondations peuvent se produire n'importe où au Canada et à n'importe quel moment de l'année. Elles peuvent être dues à diverses causes, entre autres les pluies torrentielles, la fonte rapide des neiges, des embâcles ou les défaillances des ouvrages de génie civil tels que les digues ou les barrages. En général, les inondations sont classées selon leurs emplacements et leurs causes. Cependant, cette catégorisation est imparfaite puisque les causes sont nombreuses et peuvent provoquer plus d'un type d'inondations. Par exemple, une tempête peut engendrer une crue éclair et

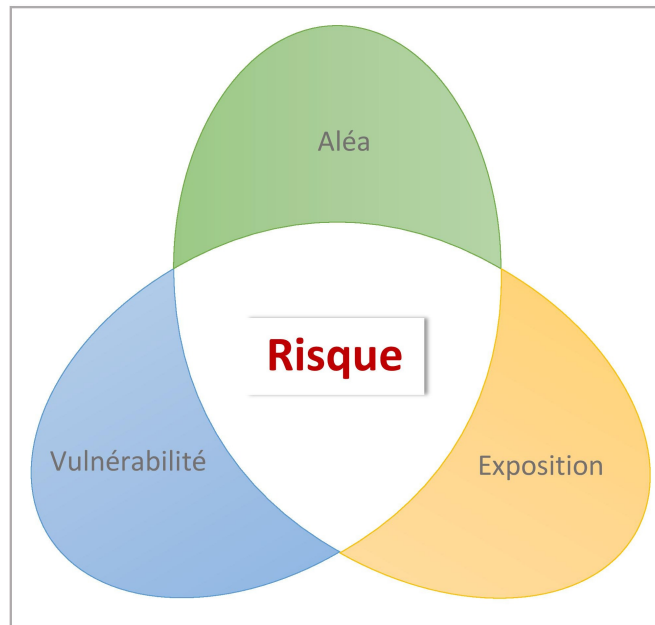


FIGURE 1.1 Les composantes du risque

induire le débordement d'un cours d'eau à la suite du ruissellement des eaux de pluie.

Dans ce mémoire nous nous intéresserons uniquement aux inondations riveraines ou fluviales qui surviennent lorsque le volume d'eau dans le chenal d'un cours d'eau dépasse sa capacité de drainage naturelle. Afin de définir formellement une inondation riveraine, il est nécessaire de définir certaines caractéristiques d'un cours d'eau tels que le débit, la période de retour, etc. Le débit, habituellement exprimé en m^3/s , est un volume d'eau traversant une section transversale d'un cours d'eau par unité de temps. Ainsi donc, on définit une inondation riveraine comme étant un événement hydrologique $\{Q > Q_T\}$ au cours duquel le débit d'un cours d'eau $Q \in \mathbb{R}_+$ dépasse un certain seuil critique Q_T le long d'un ou de plusieurs tronçons. Les inondations sont habituellement caractérisées par une période de retour ou une probabilité de dépassement annuelle. La période de retour notée

T , désigne la durée moyenne séparant deux événements hydrologiques critiques au cours desquels la capacité de drainage du cours d'eau est dépassée causant ainsi des inondations (Bennis, 2007). La probabilité de dépassement annuelle p d'une valeur critique de débit Q_T et de période de retour T représente la probabilité que surviennent durant une année donnée, une inondation de récurrence T années. Elle est égale à l'inverse de la période de retour T ,

$$p = \mathbb{P}(Q > Q_T) = \frac{1}{T}.$$

À titre d'exemple, chaque année la probabilité de dépassement du débit d'inondation de récurrence 100 ans est :

$$p = \mathbb{P}(Q > Q_{100}) = \frac{1}{100} = 0.01.$$

Une inondation centenaire peut donc survenir avec une probabilité de 1% chaque année et non une fois aux 100 ans, selon la compréhension populaire, qui crée régulièrement de la confusion auprès des citoyens et des décideurs publics.

1.2.3 Modélisation des dommages liés au risque d'inondation

La modélisation des dommages résultants des inondations riveraines se fait habituellement par une approche méthodologique en quatre étapes présentées dans la figure 1.2. Cette approche est utilisée dans plusieurs projets visant à évaluer la pertinence économique de diverses mesures de mitigation du risque d'inondation. Elle est composée d'une étude hydrologique, une modélisation hydraulique, de calculs niveau-dommages et d'estimation des dommages totaux.

1. L'analyse hydrologique est la première étape de l'analyse d'ingénierie nécessaire à la détermination des niveaux d'eaux et de l'étendue des inondations. Elle consiste à estimer le débit à un emplacement spécifique du

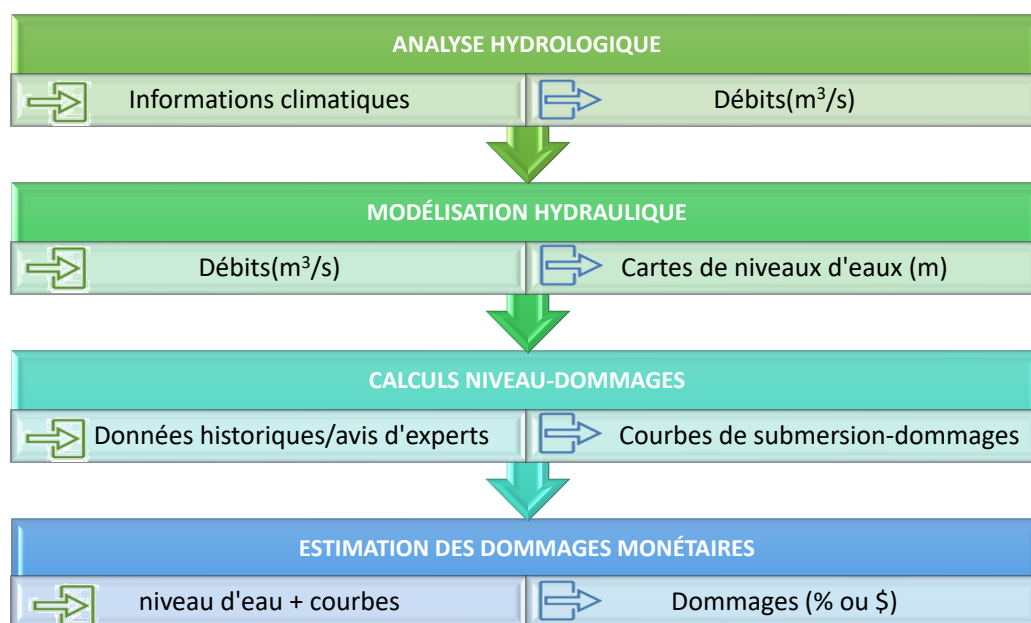


FIGURE 1.2 Méthode d'estimation des dommages causés par une inondation

bassin versant (station hydrométrique) en utilisant l'information climatique c'est-à-dire les données de précipitations (pluie et fonte des neiges) ainsi que d'autres variables telles que la température, l'humidité, l'utilisation du sol, l'évaporation, les données d'élévation numérique, selon la complexité du modèle utilisé. Le but de cette étude est d'établir une relation de type débit-probabilité qui permet de lier chaque débit mesuré à une probabilité de dépassement ou de manière équivalente à une période de retour.

2. La modélisation hydraulique permet de convertir les débits estimés en niveaux d'eau le long de la rivière. Elle requiert des informations sur les débits

estimés, les infrastructures, les relevés topographiques et bathymétriques afin de connaître la topographie du canal et des berges et des données géospatiales. La modélisation hydraulique permet d'effectuer des simulations de l'étendue des plaines inondables, de la profondeur de submersion et de la vitesse et de la direction d'écoulement dans certains modèles. On obtient ainsi, pour une période de retour spécifique, une carte de profondeurs de submersion qui présente les variations de hauteurs d'eau par rapport au sol. Ces cartes permettent de définir les limites des zones inondables et donc, d'identifier les infrastructures et les bâtiments qui seront potentiellement affectés par une inondation. Cette information est primordiale pour le calcul des dommages en particulier, mais aussi pour la mise en place de stratégies de gestion de risque adéquates.

3. Les calculs niveau-dommages : Cette étape vise à élaborer des courbes de dommages aussi appelées courbes de submersion-dommages permettant de décrire une relation mathématique unidimensionnelle entre une profondeur de submersion et les dommages qui en résultent. Les dommages peuvent être exprimés en valeur monétaire ou en taux d'endommagement c'est-à-dire le montant des dégâts par rapport à la valeur du bâtiment. Ces courbes peuvent être conçues à partir de statistiques relatives aux inondations antérieures et/ou d'études d'ingénieurs et d'avis d'experts. Les courbes de dommages varient selon plusieurs facteurs dont le type et la vocation du bâtiment, le nombre d'étages, la présence et l'état du sous-sol.
4. L'estimation des dommages totaux résultant d'une inondation commence par un inventaire des bâtiments présents dans la zone à risque à l'aide de bases de données géospatiales ou d'études de terrain. L'information sur les

caractéristiques de chaque bâtiment est nécessaire afin d'utiliser la courbe de dommages appropriée. Les dommages totaux tiennent compte des dommages directs à la structure du bâtiment ainsi qu'à son contenu. Les dommages indirects, auxquels il est possible d'attribuer une valeur monétaire, peuvent également être pris en compte. Les dommages structurels désignent les dommages causés à un bâtiment et à ses composantes qui ne peuvent pas être emportées par le propriétaire.

1.2.4 Stratégies de gestion du risque d'inondation

L'étape qui suit l'estimation des dommages est celle d'évaluer l'efficacité ainsi que la rentabilité économique des stratégies ou mesures pouvant être mises en œuvre afin de réduire les dommages. Notons qu'il existe deux types de mesures pouvant être mises en place : les mesures visant à contrôler l'aléa (restauration et création de milieux humides par exemple) et les mesures visant à réduire l'exposition et/ou de la vulnérabilité (digues, barrages, immunisation des propriétés, relocalisation ...). L'adoption de mesures modifiera certains paramètres dans la chaîne de modélisation et par conséquent changera la dynamique des pertes. Pour estimer l'efficacité des mesures, il faut d'abord ajuster les paramètres appropriés dans la chaîne de modélisation et estimer les dommages en présence de mesures. Une revue de littérature et/ou des entretiens avec des experts du milieu sont nécessaires afin d'évaluer les modifications à apporter aux paramètres. Ensuite il faut déterminer les coûts de mise en place des mesures et les comparer aux dommages évités afin d'évaluer la pertinence économique de l'adoption de ces mesures.

Dans ce chapitre, nous nous intéresserons uniquement aux mesures structurelles réalisables à l'échelle individuelle afin de réduire la vulnérabilité des bâtiments résidentiels. Les mesures analysées seront la relocalisation et l'immunisation des

bâtiments. La relocalisation consiste au rachat et à la démolition des propriétés en zone inondable, par les gouvernements. Les propriétaires pourront utiliser le montant du rachat pour s'établir dans une zone exempte de risque d'inondation. L'immunisation consiste à mettre en place une mesure visant à rendre le bâtiment moins vulnérable aux effets d'une inondation. Nous nous intéresserons en particulier à la mesure consistant à élever le premier plancher au-dessus du niveau d'eau correspondant à une inondation de récurrence 100 ans, à déplacer tout équipement fonctionnel du sous-sol aux étages supérieurs et à reconstruire les murs du sous-sol en béton tout en éliminant toutes les fenêtres ou ouvertures situées sous la côte de récurrence 100 ans. L'élévation du premier plancher diminuera la hauteur de submersion du bâtiment en cas d'inondation et donc permettra de réduire les dommages.

1.3 Analyse de risque

1.3.1 Description de la zone d'étude

La zone d'étude, présentée à la figure 1.3, s'étend sur tout le territoire du bassin versant de la rivière Chaudière (environ 6713 km²). L'analyse repose sur cinq sous-bassins ayant des dynamiques fluviales distinctes. Le territoire recoupe 78 municipalités, regroupées en 7 MRC et comprenant 179 000 habitants selon le recensement de 2016 (Boyer-Villemaire et *al.*, 2021b).

1.3.2 Données

Les données utilisées dans l'étude de cas du bassin versant de la rivière Chaudière ont été fournies par Ouranos. Leurs travaux basés sur la méthode géostatistique d'estimation des niveaux d'eau ont menés à la production de cartes d'étendues et de profondeurs de submersion pour sept périodes de retour, soit 2, 5, 10, 20, 50,

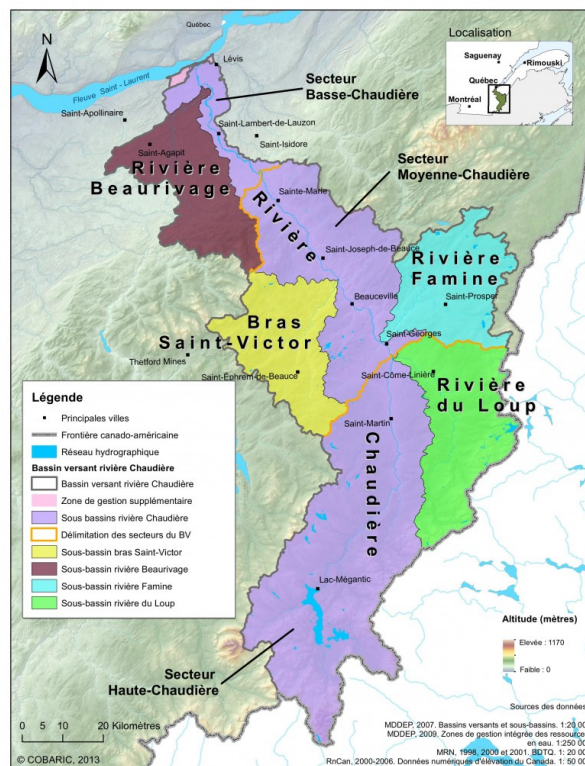


FIGURE 1.3 Zone d'étude SOURCE : COBARIC, 2014.

100 et 350 ans pour chacun des deux scénarios de concentration de gaz à effet de serre communément appelés RCP (*Representative concentration pathways*) : RCP 4.5 et RCP 8.5. La modélisation a été réalisée pour l'horizon de 50 ans allant de 2020 à 2070, subdivisé en deux sous-horizons temporels : H1 (les premiers 30 ans de 2020 à 2050) et H2 (les derniers 20 ans de 2050-2070). Ces cartes ont été obtenues pour plusieurs sorties de modèles climatiques, toutefois nous présenterons uniquement les résultats pour le modèle médian puisque les résultats sont robustes à l'incertitude hydro climatique. Le lecteur est référé à la section 4.2.1 du guide méthodologique de Boyer-Villemaire et *al.* (2021), pour les détails concernant la modélisation hydrologique et l'analyse hydraulique.

Les courbes de dommages utilisées sont celles développées dans les travaux de

Bonnifait (2005). Ces courbes sont généralement considérées comme la référence pour l'habitat résidentiel québécois. Elles fournissent le taux d'endommagement selon le nombre d'étages ainsi que la présence d'un sous-sol et son état (fini ou non fini) comme le montre le graphique 1.4.

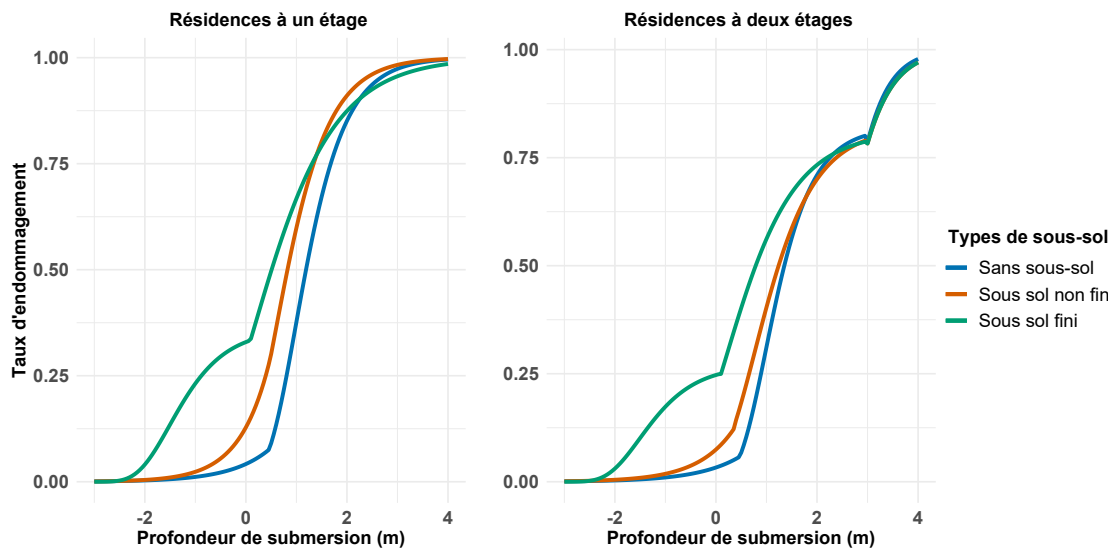


FIGURE 1.4 Courbes de submersion-dommages élaborées par Bonnifait (2005)

Les données sur les bâtiments ont été recueillies à partir du rôle d'évaluation foncière de 2019. Ces données contiennent les informations concernant l'emplacement géographique, la valeur foncière, le nombre d'étages et le type d'occupation pour chaque bâtiment. La présence d'un sous-sol ou non est nécessaire à l'utilisation des courbes de Bonnifait, cependant cette information n'étant pas fournie, nous avons attribué aléatoirement un type de sous-sol aux bâtiments étudiés. Toutefois, les maisons mobiles ont été considérées sans sous-sol.

1.3.3 Analyse de la vulnérabilité

Le croisement des cartes d'étendue de submersion avec les données de géolocalisation du rôle d'évaluation foncière, a permis d'identifier les bâtiments potentiellement vulnérables à une crue. Les résultats du dénombrement des bâtiments résidentiels ainsi que la valeur foncière agrégée selon le sous-horizon et le scénario de concentration de gaz à effet de serre sont donnés dans le tableau 1.1.

Scénario GES		RCP 4.5		RCP 8.5	
Sous-horizons		H1 (2020-2050)	H2 (2050-2070)	H1 (2020-2050)	H2 (2050-2070)
Récurrences	2 ans	0	0	4	3
	5 ans	16	13	16	17
	10 ans	23	26	37	27
	20 ans	39	50	47	40
	50 ans	103	154	138	118
	100 ans	82	110	87	85
	350 ans	191	185	177	186
Nombre de résidences		454	538	506	476
Valeur foncière (\$ 2019)		56 467 600	66 230 900	63 012 600	59 917 200

TABLEAU 1.1 Dénombrement et valeur foncière agrégée des bâtiments résidentiels en zone inondable

L'étape qui suit le dénombrement des actifs est l'extraction des profondeurs de submersion, à l'emplacement de chaque bâtiment, en utilisant les cartes de profondeurs de submersion. Ces niveaux d'eau sont ensuite convertis en pourcentages de dommages à l'aide des courbes de dommages développées dans les travaux de

Bonnifait (2005). Les pourcentages de dommages ainsi obtenus sont multipliés par la valeur foncière des bâtiments et agrégés de sorte à obtenir une estimation des dommages annuels selon la récurrence de l'inondation, comme présenté dans le tableau 1.2.

Scénario GES	RCP 4.5		RCP 8.5	
Sous-horizons	H1	H2	H1	H2
	(2020-2050)	(2050-2070)	(2020-2050)	(2050-2070)
Pas d'inondation	0	0	0	0
2 ans	0	0	45 220	37 653
5 ans	512 005	391 803	730 219	694 539
10 ans	1 204 656	1 222 832	1 579 363	1 385 342
20 ans	2 061 901	2 380 635	2 929 199	2 354 633
50 ans	4 862 887	6 929 435	6 852 113	5 699 789
100 ans	8 047 728	11 544 836	10 821 518	9 123 593
350 ans	16 174 016	23 558 515	20 698 033	17 875 997

TABLEAU 1.2 Dommages annuels agrégés selon la récurrence, le sous-horizon et le scénario d'émission de GES en dollar de 2019, Modèle médian

1.4 Analyse coûts-avantages des mesures de protection

1.4.1 Cadre d'analyse

L'approche généralement adoptée pour évaluer les projets visant à réduire les dommages liés aux inondations est l'analyse coûts-avantages. Elle consiste à comparer, d'un point de vue monétaire, l'ensemble des pertes futures évitées et les coûts actuels de différentes mesures de réduction du risque avec le statu quo c'est-à-dire

le scénario dans lequel aucune mesure d'adaptation n'est prise. Cette démarche a pour but d'évaluer la pertinence économique de la mise en place d'options d'adaptation. Elle permettra ainsi de dégager le scénario optimal d'un point de vue économique pour la collectivité. L'analyse coûts-avantages se base sur plusieurs indicateurs économiques tels que la valeur actuelle nette (VAN) et le ratio coût-avantage. Le calcul de ces indicateurs suppose la prise en compte d'hypothèses sur l'horizon temporel et le taux d'actualisation. L'horizon temporel correspond à la durée sur laquelle sont considérés les coûts et les bénéfices associés au projet. Dans notre étude, nous considérons l'horizon de 50 ans allant de 2020 à 2070, subdivisé en deux sous-horizons temporels : H1 (les premiers 30 ans de 2020 à 2050) et H2 (les derniers 20 ans de 2050-2070), par soucis de cohérence avec les scénarios climatiques utilisés dans la modélisation hydrologique. Dans la littérature économique, plusieurs auteurs suggèrent un taux d'actualisation décroissant pour des horizons temporels lointains afin de préserver l'équité intergénérationnelle (Montmarquette et Scott, 2007 ; Arrow et *al.*, 2014). Ainsi, nous utiliserons un taux d'actualisation réel de 4% pour le sous-horizon H1 puis de 2% pour le sous-horizon H2. Nous retiendrons la VAN comme indicateur économique, et en raison de la disponibilité des valeurs foncières pour l'année 2019, tous les flux monétaires sont en dollars constants de 2019 c'est-à-dire qu'ils n'incorporent pas les effets et les risques d'inflation futurs. Deux options d'adaptation seront analysées, la première consistera au rachat et à la démolition de toutes des résidences situées dans la zone 0-20 ans à l'horizon 1 qui s'étend de 2020 à 2050 et la seconde consistera à l'élévation du premier plancher de toutes résidences dans la zone 0-50 ans pour le même horizon.

Une étape importante de l'analyse coûts-avantages est le calcul des dommages annuels moyens (DAM). Le DAM est considéré comme un flux financier déterministe sur l'horizon d'analyse et correspond au coût annuel utilisé dans le calcul

des indicateurs économiques. La valeur du DAM est représentée par l'aire sous la courbe probabilité-dommages comme l'illustre le graphique 1.5. Les coûts et les bénéfices sont ensuite actualisés pour calculer la VAN de la mesure de protection. La VAN est définie comme le bilan entre les coûts de mise en place des mesures et les avantages qui en découlent, c'est-à-dire les dommages évités sur tout l'horizon temporel de 50 ans. Pour un scénario donné, en tenant compte des paramètres de notre cadre d'analyse, la VAN s'exprime comme,

$$VAN = -C_0 + \sum_{t=1}^{30} \frac{DAM_H1}{(1 + 4\%)^t} + \sum_{t=1}^{20} \frac{DAM_H2}{(1 + 4\%)^{30} (1 + 2\%)^t},$$

où C_0 représente les coûts de mise en place de la mesure.

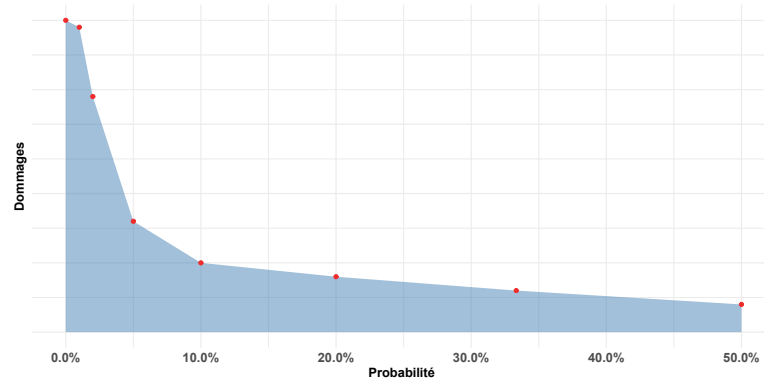


FIGURE 1.5 Illustration d'une courbe de probabilité-dommages

1.4.2 Résultats

Statu quo

En l'absence de mesure de mitigation, les dommages annuels moyens sont estimés à 545 439\$ pour le sous-horizon H1 et à 654 290\$ pour le sous-horizon H2. Ainsi, on estime donc à environ 12.73 M\$, en moyenne, la valeur actualisée des dommages

aux bâtiments résidentiels dus aux inondations riveraines dans le bassin de la rivière Chaudière, d'ici 2070.

Rachat et démolition des résidences

L'analyse de la vulnérabilité a permis d'identifier 78 propriétés situées dans la zone de récurrence 0-20 ans qui seront visées par le rachat et la démolition. À la suite de la mise en place de la mesure, on observe une réduction importante du DAM qui s'élèvent à 136 502\$ et 235 307\$ pour les sous-horizons H1 et H2 respectivement. La valeur actualisée des dommages résiduels subis par les propriétés non démolies, dans la zone de récurrence 50 ans et plus est estimée à 3.55 M \$. Ainsi, le rachat et la démolition des propriétés dans la zone de récurrence 0-20 ans permettra d'éviter des dommages s'élevant à 9.19 M\$. Si le montant du rachat correspond à la valeur foncière de chaque bâtiment, alors les coûts de la mesure sont estimés à 10.30 M\$ composés de 8.9 M\$ payés en allocation de départ plus 1.36 M\$ déboursés en frais de démolition des bâtiments. La VAN de la mesure de rachat est estimée à -1.11 M\$ dans le scénario RCP 4.5.

L'analyse a également été effectuée dans le scénario de concentration de gaz à effet de serre RCP 8.5. Les résultats présentés dans le tableau 1.3 montrent que le rachat des propriétés à vulnérabilité élevée est une mesure qui n'est pas rentable pour la collectivité, peu importe le scénario RCP choisi, si l'on tient compte uniquement des dommages physiques et que la décision est basée sur la VAN. Toutefois, une analyse plus approfondie effectuée grâce à l'approche actuarielle permettra de déterminer les seuils de rentabilité de la mesure.

Scénario GES	RCP 4.5	RCP 8.5
Nombre de propriétés	538	506
Dommages annuels moyen H1	545 439	751 303
Dommages annuels moyen H2	654 290	649 756
Valeur actuelle des dommages sans mesure	12 730 332	16 267 274
Nombre de propriétés à démolir	78	104
Allocation de départ	8 933 600	12 095 900
Coûts de démolition	1 365 000	1 820 000
Coûts de mise en place	(10 298 600)	(13 915 900)
Nombre de propriétés non démolies	460	402
Dommages annuels moyen résiduels H1	136 502	170 343
Dommages annuels moyen résiduels H2	235 307	131 065
Valeur actuelle des dommages résiduels	3 546 678	3 606 328
Valeur actuelle des dommages évités	9 183 654	12 660 946
VAN	(1 114 946)	(1 254 954)

TABLEAU 1.3 Analyse coûts-avantages du rachat et de la démolition des résidences

Élévation du premier plancher

La mesure consiste à élever le premier plancher au-dessus du niveau d'eau correspondant à une inondation de récurrence 100 ans, à reconstruire les murs du sous-sol tout en éliminant toutes les fenêtres ou ouvertures situées sous la cote de récurrence 100 ans et à déplacer tout équipement du sous-sol aux étages supérieurs. Cette mesure sera appliquée à toutes les 181 propriétés dans la zone 0-50 ans. À la suite de l'adoption de cette mesure, nous estimons les dommages résiduels à 1,95 M\$ et les dommages évités à 10,78 M\$. En se basant sur des données du MSP, on estime en moyenne à 100 000 \$ le coût de la mesure pour chaque propriété à des

fins de simplification. Ce montant inclut les frais d'études, les coûts d'ingénierie et d'arpentage, ainsi que les coûts de levage et de reconstruction. Ainsi cette mesure coûterait au total 18,1 M\$. La VAN de la mesure serait donc négative, il n'est donc pas rentable d'opter pour ce scénario d'immunisation comme le montrent les résultats présentés dans le tableau 1.4. En effet, pour environ 9.2 M\$ de coûts évités, cette option apparaît encore plus déficitaire que la précédente en raison de son coût d'implantation qui est très élevé soit de 18.1 M\$.

Scénario GES	RCP 4.5	RCP 8.5
Nombre de propriétés immunisées	181	242
Coûts de mise en place	(18 100 000)	(24 200 000)
Dommages annuels moyen résiduels H1	71 315	81 142
Dommages annuels moyen résiduels H2	142 575	62 887
Valeur actuelle des dommages résiduels	1 951 976	1 720 147
Valeur actuelle des dommages évités	10 778 356	14 547 127
VAN	(7 321 644)	(9 652 873)

TABLEAU 1.4 Analyse coûts-avantages de l'élévation du premier plancher

1.4.3

1.5 Approche actuarielle fréquence-sévérité

1.5.1 Méthodologie

L'approche actuarielle fréquence-sévérité est basée sur la simulation de trajectoires d'occurrence d'inondation sur l'horizon temporel choisi. Elle permet d'obtenir une distribution complète et donc d'avoir un portrait plus détaillé des dommages potentiels. La distribution ainsi obtenue pourrait servir à faire non seulement des

analyses coûts-avantages mais aussi des évaluations plus approfondies telles que des analyses de scénarios, la conception et l'évaluation de la rentabilité de programmes de gestion du risque d'inondation. L'approche fréquence-sévérité pourrait permettre de prendre des décisions de gestion du risque basées sur des mesures de risque telles que la VaR (*Value at Risk*) pour une gestion optimale des scénarios catastrophiques.

La procédure de simulation peut être décrite par les étapes ci-dessous :

1. Échantillonner la courbe de relation débit-probabilité provenant de l'analyse hydrologique afin de simuler un événement de crue. Cela revient à tirer aléatoirement une probabilité de dépassement annuelle et à la faire correspondre à une valeur de débit grâce à la relation débit-probabilité.
2. Déterminer le niveau d'eau qui correspond au débit simulé à partir des cartes de profondeurs de submersion appropriées. Celles-ci sont issues de l'analyse hydraulique.
3. Évaluer les dommages correspondants à ce niveau d'eau à partir de la courbe de dommages correspondante selon le type de bâtiment.
4. Répéter les trois étapes précédentes un nombre de fois suffisamment grand (100 000 dans notre cas) pour que la distribution des dommages soit stable.

1.5.2 Valeur ajoutée de l'approche actuarielle fréquence- sévérité

L'application de la méthode fréquence-sévérité à l'étude de cas du bassin de la rivière Chaudière donne une valeur actualisée moyenne s'élevant à 12,73 M \$ dans le scénario du statu quo ce qui correspond bien au résultat obtenu par la méthode classique. Il est à noter que les valeurs actualisées moyennes calculées avec l'adoption de mesures de protection par la méthode actuarielle sont les mêmes que ceux obtenus par la méthode classique. Ainsi tous les résultats de l'analyse coûts-avantages réalisée avec la méthode classique demeurent valides. La valeur ajoutée de la méthode actuarielle réside dans le fait qu'elle offre la possibilité de faire des analyses plus approfondies. En effet, les simulations réalisées ont permis d'obtenir la distribution de la valeur actualisée des dommages à la figure 1.6. Ce graphique montre que l'aile droite de la distribution est lourde, ce qui signifie que la probabilité que la valeur des dommages atteignent des valeurs extrêmes est non négligeable. En effet, on note qu'il y a une probabilité d'environ 42% que la valeur actuelle des dommages dépasse la valeur moyenne estimée 12.73M\$. Ainsi, les décisions basées sur les moyennes pourraient être inadéquates dans l'éventualité où des scénarios extrêmes pouvant générer des dommages catastrophiques se produiraient.

1.5.3 Impacts des changements climatiques

Afin d'analyser l'impact des changements climatiques, nous avons comparé la distribution des dommages totaux cumulés dans les deux scénarios de concentration de gaz à effet de serre RCP 4.5 et RCP 8.5. Le graphique 1.7 permet de constater que sur l'horizon temporel de 50 ans, la différence entre les dommages totaux cumulés des deux scénarios est de l'ordre de 10%. Cette différence est assez faible comparativement à la variabilité des dommages cumulés dans chaque scénario.

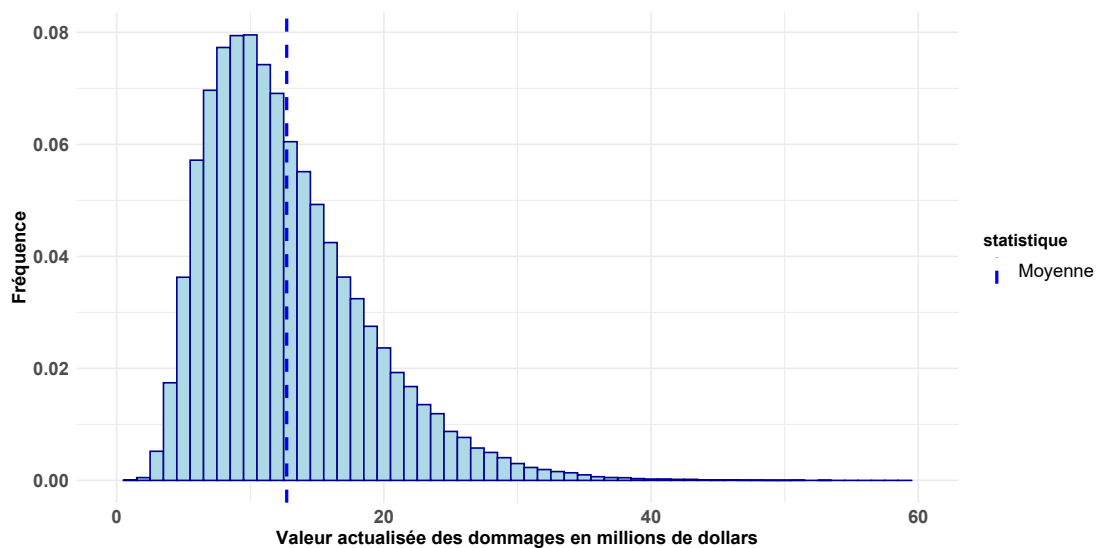


FIGURE 1.6 Distribution de la valeur actualisée des dommages, RCP 4.5

Autrement dit, la variabilité des dommages totaux cumulés est très grande et ne permet pas de tant distinguer les effets des scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5

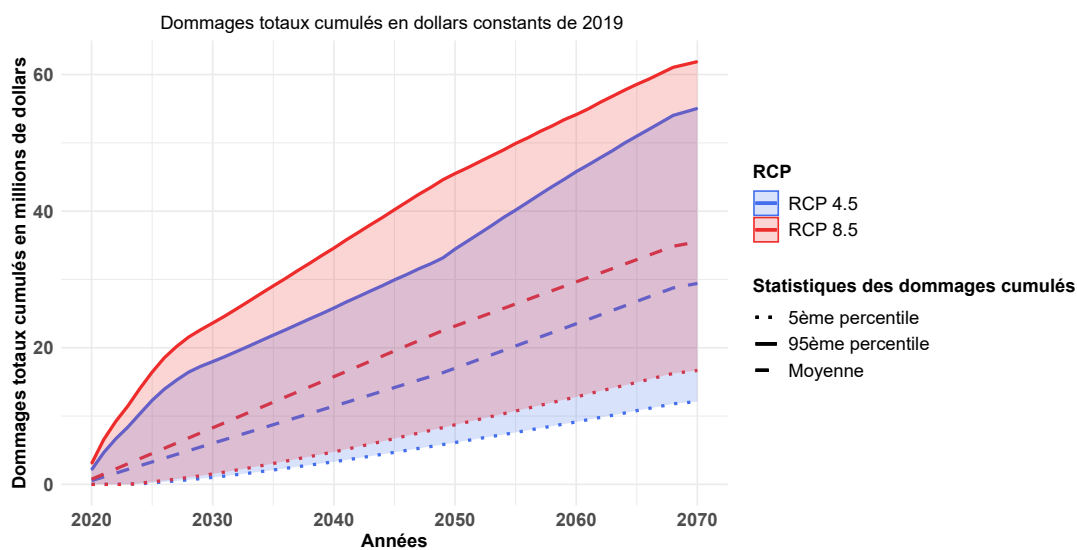


FIGURE 1.7 Distribution des dommages totaux cumulés sur 50 ans

1.6 Discussion

L'analyse coûts-avantages constitue une approche permettant d'éclairer les décisions d'investissement, très ancrée dans la théorie microéconomique. Cependant, les sources d'incertitude pouvant faire varier les résultats et les décisions qui y sont associées sont nombreuses. En effet, toute analyse de choix d'investissements basée sur le critère de la VAN et impliquant des flux monétaires futurs importants répartis sur un long horizon temporel implique une forte sensibilité au taux d'actualisation. De plus, les différentes étapes du processus d'estimation des dommages futurs liés aux inondations sont sujets à de l'incertitude. Ainsi donc les résultats ne peuvent être considérées comme des valeurs certaines. D'où la pertinence de l'approche actuarielle fréquence-sévérité qui permet de quantifier la variabilité des dommages futurs et de renforcer la robustesse de la prise de décision grâce à l'analyse de la distribution des principaux indicateurs de performance tels que la VAN. Cette approche permet en effet d'analyser l'incertitude liée à la mise en place de mesures de mitigation dont les flux financiers peuvent varier considérablement sur le long terme, selon la fréquence et la sévérité des inondations.

L'approche actuarielle présente aussi la capacité d'analyser la prise de décision future conditionnelle aux informations disponibles aux propriétaires. Cette flexibilité permet, par exemple, de modéliser une relocalisation, l'adoption de la mesure d'élévation du premier plancher ou une modification de la tarification d'un contrat d'assurance conditionnellement aux dommages subis à chaque noeud de l'horizon temporel modélisé.

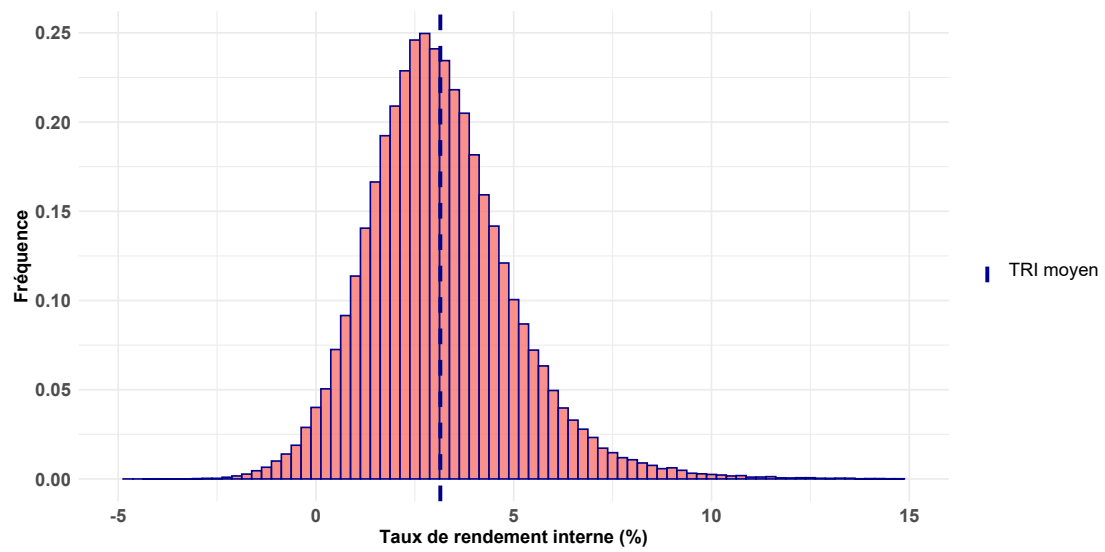


FIGURE 1.8 Distribution du TRI de la mesure de rachat et démolition

CHAPITRE II

ANALYSE MICROÉCONOMIQUE DES MESURES DE MITIGATION DU RISQUE D'INONDATION

2.1 Contexte

Dans le chapitre précédent, nous avons analysé la rentabilité des mesures de réduction des impacts financiers des inondations d'un point de vue collectif. Toutefois, bien qu'une mesure soit économiquement rentable pour la collectivité, les questions d'acceptabilité et d'adoption de ces mesures demeurent la décision du propriétaire qui peut être influencé par divers facteurs tels que son expérience du risque, sa faible perception de celui-ci due au manque d'informations (Francès, 2019), son attitude face au risque ou encore l'attachement à sa propriété et à son cadre de vie.

Dans ce chapitre, nous présenterons un cadre d'analyse théorique basé sur le modèle d'espérance d'utilité inter-temporelle, qui permet de représenter les décisions des agents en situation d'incertitude. Par conséquent, les mesures seront définies comme des variables aléatoires caractérisées par des distributions de probabilité objectives c'est-à-dire qu'aux issues possibles sont associées des probabilités sur lesquelles s'accordent tous les agents. Ces distributions de probabilité, qui dépendent de la récurrence des inondations ainsi que du niveau de vulnérabilité des propriétés seront définies grâce à la loi bêta. Aussi, il sera admis que toutes les

informations nécessaires à la prise de décision sont parfaitement définies et disponibles et que les propriétaires sont rationnels au sens où ils choisissent toujours l'action qui maximise leur utilité, selon leurs degrés d'aversion pour le risque.

Nous supposons que le propriétaire fait face à trois choix possibles :

- assumer les pertes futures,
- se relocaliser c'est-à-dire céder sa propriété en échange d'une allocation de départ,
- investir un montant afin de mettre en place une mesure d'immunisation permettant de réduire les dommages liés aux inondations futures.

L'objectif du chapitre est de montrer comment la valeur de la propriété, le degré d'aversion pour le risque, l'attachement au mode de vie riverain, la vulnérabilité de la propriété et la perception du risque influencent l'allocation de départ minimale acceptable ainsi que le montant maximal que le propriétaire serait prêt à investir dans la mise en place d'une mesure d'immunisation.

Le programme général d'indemnisation et d'aide financière lors de sinistres réels ou imminents offert par le gouvernement du Québec sera également analysé dans ce chapitre. En effet, par le biais de ce programme, le gouvernement offre sous certaines conditions¹, une allocation de départ correspondant au coût à neuf d'une propriété en zone inondable jusqu'à un maximum de 325 000 \$. Ce montant peut être bonifié d'une aide financière additionnelle égale à la valeur de l'évaluation municipale du terrain si le propriétaire de la résidence cède celui-ci à la municipalité pour la somme nominale de 1 \$, sans dépasser 385 000 \$, incluant le montant

1. Pour de plus amples informations sur les conditions d'admissibilité, veuillez vous référer à la page web du gouvernement du Québec concernant l'aide financière et indemnisation lors d'une inondation ou d'un sinistre

offert pour la résidence. Ce programme offre également une aide financière correspondant à 90% des coûts d'une mesure visant à immuniser une résidence, sans dépasser le coût à neuf de la résidence ou 325 000 \$. On peut remarquer que l'allocation de départ et l'aide financière offerte à un propriétaire qui opterait pour une mesure d'immunisation ainsi que les conditions d'admissibilité au programme sont exogènes, et ne prennent pas en compte les caractéristiques propres à chaque individu. Le propriétaire a seulement le choix d'accepter ou de refuser ce qui lui est offert, puisqu'il ne peut pas changer les modalités qui lui sont proposées. Nous déterminerons donc les conditions pour lesquelles un propriétaire accepterait de céder sa propriété ou mettre en place une mesure d'immunisation, dans le cadre du programme d'aide financière offert par le gouvernement du Québec. Le but étant d'amener les décideurs à repenser les modalités du programme afin de favoriser l'adhésion des populations vivant dans les zones à risque d'inondation.

2.2 Modèle simplifié d'estimation des dommages liés au risque d'inondation

Le modèle d'estimation que nous proposons dans cette section, permet à partir de statistiques observées, d'extrapoler la distribution complète du taux d'endommagement étant donné la survenance d'une inondation. C'est une représentation simplifiée pour une analyse de risque préliminaire et non un substitut aux cartes d'inondation qui demeurent un outil essentiel dans la gestion du risque d'inondation. Le modèle est calibré à partir d'une estimation des dommages annuels moyens qui peut être obtenue grâce à des données historiques, des avis d'experts ou par comparaison avec des propriétés similaires. Afin de définir le modèle de manière plus formelle, désignons par,

X_n : le pourcentage aléatoire de dommages subis par la propriété à l'année n ;

I_n : la variable indicatrice de l'occurrence d'une inondation à l'année $n \sim \text{Bernouilli}(p)$

où p représente la probabilité qu'une inondation survienne ;

$X_n|I_n = 1$: le pourcentage de dommages en cas d'occurrence d'une inondation.

Dans le modèle proposé, le pourcentage de dommages conditionnels à l'occurrence d'une inondation, $X_n|I_n = 1$, est distribué selon une loi bêta (α, β) . En effet, cette loi permet de modéliser des phénomènes dont les réalisations possibles sont comprises dans un certain intervalle borné, comme c'est le cas pour les pourcentages de dommages qui doivent être compris entre 0 et 1. Ainsi donc, le pourcentage moyen des dommages annuels à la suite d'une inondation correspond à,

$$\mathbb{E}[X_n|I_n = 1] = \frac{\alpha}{\alpha + \beta}.$$

On obtient donc, après quelques manipulations algébriques, que le paramètre β de la distribution du taux d'endommagement peut être obtenu par l'équation (2.1),

$$\beta = \alpha \frac{1 - \mathbb{E}[X_n|I = 1]}{\mathbb{E}[X_n|I = 1]}. \quad (2.1)$$

Si nous disposons d'une estimation des dommages moyens subis par une propriété lors d'une crue c'est-à-dire $\mathbb{E}[X_n|I = 1]$, et pour une valeur de α donnée, l'équation (2.1) permet d'obtenir le paramètre β et donc la distribution complète des dommages conditionnels, nécessaire à l'analyse de risque par l'approche actuarielle fréquence-sévérité.

Dans la suite, nous allons utiliser ce modèle afin de définir trois niveaux de vulnérabilité qui seront désignés par faible, moyenne et élevée, et serviront de base aux analyses subséquentes.

2.2.1 Niveaux de vulnérabilité

Les niveaux de vulnérabilité sont définis par rapport à l'ampleur des dommages moyens estimés selon des avis d'experts. On définit comme étant à faible vulné-

rabilité, une propriété ayant un sous-sol non fini comportant peu ou pas d'objets de grande valeur. À la suite d'une inondation cette propriété nécessiterait un nettoyage du sous-sol qui coûte en moyenne 25 000\$ pour une propriété d'une valeur de 400 000 \$. Le pourcentage de dommages moyens, pour une propriété à faible vulnérabilité équivaut donc à 6.25% de la valeur de la propriété. L'équation (2.1) nous donne alors β égal à 15α . Lorsque le paramètre α est fixé à 1, la distribution du pourcentage de dommages conditionnels correspond à la courbe représentée en turquoise dans le graphique 2.1.

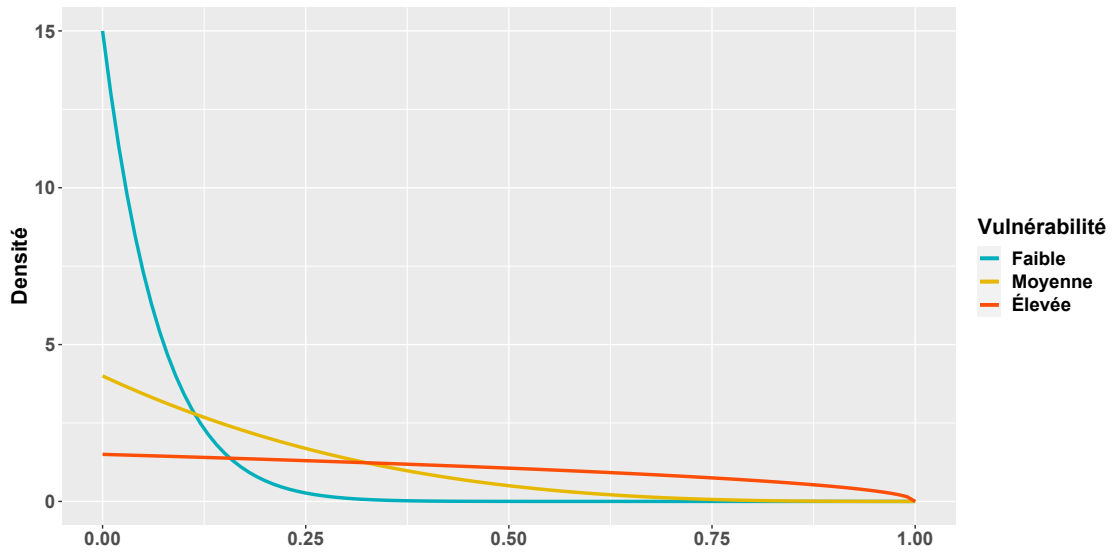


FIGURE 2.1 Distributions conditionnelles des dommages matériels

Une propriété à vulnérabilité moyenne fera référence à une propriété dont le sous-sol entièrement fini, devra être complètement rénové à la suite d'une crue. Le coût d'une rénovation complète du sous-sol est estimé à 80 000\$ en moyenne pour une propriété de 400 000 \$. Pour une propriété à vulnérabilité moyenne, le pourcentage de dommages moyens équivaut donc à 20% de la valeur de la propriété. Avec l'équation (2.1) nous obtenons $\beta = 4\alpha$. Lorsque $\alpha = 1$, la distribution correspond à la courbe représentée en orange dans le graphique 2.1.

De la même manière, nous désignerons comme étant à vulnérabilité élevée une propriété dont le niveau d'eau en cas d'inondation, pourrait atteindre le premier plancher avec une probabilité élevée. En cas d'inondation, cette propriété nécessitera donc des travaux majeurs qui seraient évalués en moyenne à 160 000\$, pour une propriété d'une valeur de 400 000\$. Pour une propriété à vulnérabilité élevée, le pourcentage de dommages moyen équivaut donc à 40% de la valeur de la propriété, ce qui équivaut à $\beta = 1.5\alpha$, avec l'équation (2.1). Lorsque $\alpha = 1$, la distribution correspond à la courbe représentée en rouge dans le graphique 2.1.

2.3 Théorie microéconomique des choix en situation d'incertitude

Dans la suite du mémoire, nous analyserons la décision d'adoption des mesures individuelles de réduction des impacts des inondations, en utilisant des outils de la théorie microéconomique des choix en situation d'incertitude. Le but étant de déterminer la rationalité et l'optimalité des options offertes, selon le niveau de risque. Nous utiliserons plus précisément les concepts d'attitude face au risque, d'utilité espérée et d'utilité inter-temporelle qu'il apparaît nécessaire de définir.

2.3.1 L'aversion pour le risque et le concept d'utilité

L'aversion au risque réfère aux préférences des agents qui préfèrent des situations certaines à des situations risquées qui leur offriraient "en moyenne" les mêmes bénéfices. Pour pouvoir quantifier l'aversion au risque, on représente mathématiquement ces préférences à travers la fonction d'utilité. Une fonction d'utilité représente la préférence subjective d'un individu face à différents niveaux de richesse ainsi que le niveau de risque qu'il est prêt à prendre dans le but d'augmenter son niveau de richesse. C'est la courbure de celle-ci qui nous permettra de déterminer le niveau d'aversion au risque d'un agent. Plus la fonction d'utilité est concave,

plus l'agent est risquophobe c'est à dire qu'il a une aversion plus grande pour le risque. Si la fonction d'utilité est linéaire, l'agent est neutre face au risque. Si la fonction d'utilité est convexe, alors l'agent est riscophile c'est-à-dire qu'il a le goût du risque.

Dans la suite, on choisira, par souci de simplicité mathématique, de représenter les préférences des agents par la fonction d'utilité puissance. L'utilité puissance fait partie de la famille des fonctions d'utilité à aversion relative constante (CRRA, *Constant relative risk aversion*) pour lesquelles le niveau d'aversion relative au risque ne dépend pas du niveau de richesse auquel elle est évaluée. Pour un niveau de richesse w donné, l'utilité est définie par :

$$u(w) = \begin{cases} \frac{w^{1-\gamma}}{1-\gamma} & w > 0, \gamma \neq 1, \\ \ln w, & w > 0, \gamma = 1, \end{cases}$$

où γ représente le coefficient d'aversion relative au risque.

Plus la valeur de γ est grande, plus l'individu a un degré d'aversion pour le risque élevé. En général, si

- $\gamma = 0$, l'individu est neutre face au risque
- $\gamma > 0$, il a de l'aversion pour le risque
- $\gamma < 0$, il a le goût du risque.

2.3.2 La théorie de l'utilité espérée

La théorie de l'utilité espérée découle de la solution proposée par le mathématicien Daniel Bernoulli en 1738 au célèbre paradoxe connu sous le nom de "paradoxe de Saint-Pétersbourg". Il peut être décrit par la situation suivante : Un joueur lance une pièce de monnaie équilibrée jusqu'à ce qu'il obtienne "face". Il gagne 1\$ s'il

obtient "face" au premier lancer puis son gain double après chaque lancer. Ainsi donc, le joueur gagnera un montant égal à 2^{n-1} si "face" apparaît après n lancers avec une probabilité p_n égale à $\frac{1}{2^n}$, pour $n = 0, 1, \dots$

Pour que ce jeu soit équitable, il faudrait que la mise initiale du joueur soit égale à l'espérance mathématique de son gain que nous noterons G . Or nous avons,

$$\mathbb{E}[G] = \sum_{n=0}^{\infty} 2^{n-1} \cdot \frac{1}{2^n} = \infty.$$

Si on se base sur le critère de maximisation de l'espérance, il serait tout à fait rationnel qu'un joueur accepte de miser toute sa fortune afin de participer à ce jeu. Cependant, Daniel Bernoulli ne trouva personne qui voulut jouer à ce jeu en misant toute sa fortune. Ce paradoxe montre que la notion d'espérance n'est pas toujours adéquate pour justifier les décisions prises en situation d'incertitude. Daniel Bernoulli avance alors l'idée qu'il est nécessaire de privilégier un critère de décision autre que l'espérance de gain. En effet, selon lui, les décideurs sont intéressés par la satisfaction que procure la richesse ou le gain plutôt qu'à la richesse elle-même. Cette relation entre le degré de satisfaction et la richesse est formalisée par le concept d'utilité u et le montant consenti pour prendre part au jeu serait lié à l'utilité espérée des gains donnée par,

$$UE = \mathbb{E}[u(x)].$$

Les fonctions d'utilité espérée sont également appelées fonctions d'utilité de Von Neumann et Morgenstern, en honneur des deux chercheurs qui ont donné des fondements axiomatiques au concept d'utilité espérée. La théorie de l'utilité espérée a connu des critiques et faiblesses révélées au travers du paradoxe d'Allais et du paradoxe d'Ellsberg. Elle demeure pourtant le modèle dominant dans l'analyse de la décision en situation de risque et d'incertitude du fait de sa simplicité.

2.3.3 Le modèle d'espérance de l'utilité escomptée

Le modèle de l'utilité escomptée fut introduit en 1937 par Paul Samuelson. Il intervient dans les situations où les décisions de l'individu concernent plus d'une période. L'hypothèse centrale de cette théorie est que l'agent économique rationnel maximise une séquence d'utilité intervenant à différents moments sur son horizon de planification.

La fonction d'utilité intertemporelle espérée, en temps discret, peut s'écrire,

$$U(\Omega_0, \dots, \Omega_T, T) = E \left[\sum_{t=0}^T \frac{u(\Omega_t)}{(1 + \rho)^t} \right], \quad (2.2)$$

où ρ représente le taux d'escompte constant qui détermine le taux de préférence pour le présent, T , la limite de l'horizon temporel et Ω_t , la richesse de l'individu au temps t .

Dans la suite du mémoire, les analyses seront réalisées dans le cadre du modèle de l'utilité escomptée, puisque nous nous intéressons à la mise en place de mesures de réduction du risque dont les impacts s'étendent sur plusieurs années et qui impliquent des flux financiers à plusieurs moments sur l'horizon temporel. Nous supposons donc que le propriétaire est rationnel au sens où il choisira toujours une mesure dans le but de maximiser l'utilité espérée intertemporelle de sa richesse.

2.4 Statu quo

Dans cette section, nous analyserons le statu quo qui désigne la situation dans laquelle le propriétaire décide de ne pas adopter de mesure et d'assumer les pertes futures liées aux inondations. Supposons que le patrimoine du propriétaire est

composé de son épargne ω et de sa résidence d'une valeur ℓ , exposée au risque d'inondation. À chaque année, la propriété est susceptible de subir une inondation qui causerait un taux d'endommagement aléatoire noté X_n .

La richesse aléatoire au temps t du propriétaire qui n'adopte aucune mesure de protection, notée Ω_t , correspond à la différence entre la valeur de ses actifs constitués de sa propriété et de son épargne que nous supposons égale à la valeur de sa propriété, et les dommages anticipés à l'année t , c'est-à-dire,

$$\Omega_0 = 2\ell \quad \text{et} \quad \Omega_t = \ell - \ell X_t, \quad \text{pour } 1 \leq t \leq T.$$

Ainsi donc, l'utilité intertemporelle espérée est définie par,

$$U(\Omega_0, \dots, \Omega_T, T) = u(2\ell) + \mathbb{E} \left[\sum_{t=1}^T \frac{u(\ell - \ell X_t)}{(1 + \rho)^t} \right], \quad (2.3)$$

où ρ désigne le taux d'escompte de l'individu.

2.5 Relocalisation des résidences en zone inondable

Dans cette section nous analyserons la mesure de relocalisation, du point de vue du propriétaire en tenant compte de son degré d'aversion pour le risque. Si le propriétaire adopte cette mesure, il cédera sa propriété en contrepartie d'une allocation de départ P et évitera ainsi toutes les pertes liées au risque d'inondation. Le propriétaire transforme ainsi sa richesse aléatoire Ω_t , en une richesse certaine W_t donnée par,

$$W_0 = P + \ell \quad \text{et} \quad W_t = \ell \quad \text{pour } 1 \leq t \leq T.$$

Ainsi donc, l'utilité intertemporelle espérée est définie par,

$$U(W_0, \dots, W_T, T) = u(P + \ell) + \sum_{t=1}^T \frac{u(\ell)}{(1 + \rho)^t}, \quad (2.4)$$

Nous ferons l'hypothèse que le propriétaire est uniquement intéressé par l'impact de la mesure sur sa richesse finale et son objectif est de maximiser l'utilité de celle-ci. Il accepterait donc le rachat seulement si,

$$U(W_0, \dots, W_T, T) \geq U(\Omega_0, \dots, \Omega_T, T).$$

L'allocation de départ minimale acceptable, notée $P^{\min}$, qui favoriserait l'adhésion du propriétaire au programme de rachat, serait telle que,

$$U(W_0, \dots, W_T, T) = U(\Omega_0, \dots, \Omega_T, T),$$

ce qui est équivalent à,

$$P^{\min} = \begin{cases} \left((1 - \gamma) \left(U(\Omega_0, \dots, \Omega_T, T) - \sum_{t=1}^T \frac{u(\ell)}{(1 + \rho)^t} \right) \right)^{1/(1-\gamma)} - \ell & \gamma \neq 1, \\ \exp \left(U(\Omega_0, \dots, \Omega_T, T) - \sum_{t=1}^T \frac{u(\ell)}{(1 + \rho)^t} \right) - \ell & \gamma = 1. \end{cases} \quad (2.5)$$

L'allocation de départ minimale acceptable $P^{\min}$ dépend du degré d'aversion pour le risque du propriétaire, de la valeur de sa résidence, de l'horizon temporel ainsi que des dommages anticipés et donc de la vulnérabilité de sa propriété. Il convient donc de s'intéresser à la façon dont ces paramètres influencent l'allocation de départ minimale acceptable. Ainsi nous déterminerons d'abord l'impact de la valeur de la propriété et de son niveau de risque sur l'allocation de départ minimale acceptable, en considérant un horizon temporel de 25 ans. Nous évaluerons ensuite l'effet du degré d'aversion pour le risque du propriétaire sur la décision optimale. Enfin nous analyserons l'acceptabilité de l'allocation de départ offerte dans le cadre du Programme général d'indemnisation et d'aide financière du gouvernement québécois.

2.5.1 Effet de la valeur et du niveau de risque de la propriété

Dans cette section nous déterminerons l'effet de la valeur de la propriété sur l'allocation de départ minimale qu'un propriétaire accepterait pour se relocaliser. Afin d'isoler l'effet de la valeur de la propriété, nous avons calculé l'allocation de départ minimale que le propriétaire serait prêt à recevoir comme compensation pour la cession de sa propriété, en fixant tous les autres paramètres du modèle.

Le graphique 2.2 présente le montant d'allocation de départ minimale acceptable en fonction de la valeur de la propriété pour un propriétaire ayant une aversion relative γ de 0,5. Comme le montre le graphique, cette allocation croît proportionnellement à la valeur de la propriété, pour une aversion au risque et un niveau de vulnérabilité donné. Autrement dit, cette allocation représente un certain pourcentage constant de la valeur de la propriété, pour un degré d'aversion au risque fixé. Ainsi, plus la valeur de la propriété est grande, plus le propriétaire demandera une allocation de départ élevée, indépendamment de son degré d'aversion au risque. Il est donc nécessaire, afin de d'augmenter l'adhésion à la relocalisation, d'offrir au propriétaire un montant d'allocation de départ qui tient compte de la valeur de la propriété.

Le graphique 2.2 montre aussi que l'allocation de départ minimale décroît avec le niveau de vulnérabilité et la fréquence des inondations. Ainsi, à valeur de propriété et aversion relative égales, le propriétaire d'une résidence située dans une zone de récurrence 2 ans accepterait une allocation de départ beaucoup plus faible qu'un propriétaire dont la résidence est située dans une zone de récurrence 20 ans ou 100 ans. Par exemple, pour un propriétaire ayant une aversion relative γ de 0.5 dont la résidence à vulnérabilité faible est située dans une zone de récurrence 2 ans, l'allocation minimale acceptable correspond à 15,24% de la valeur de la propriété tandis qu'elle augmenterait à 90,47% et 98,08% si la propriété à

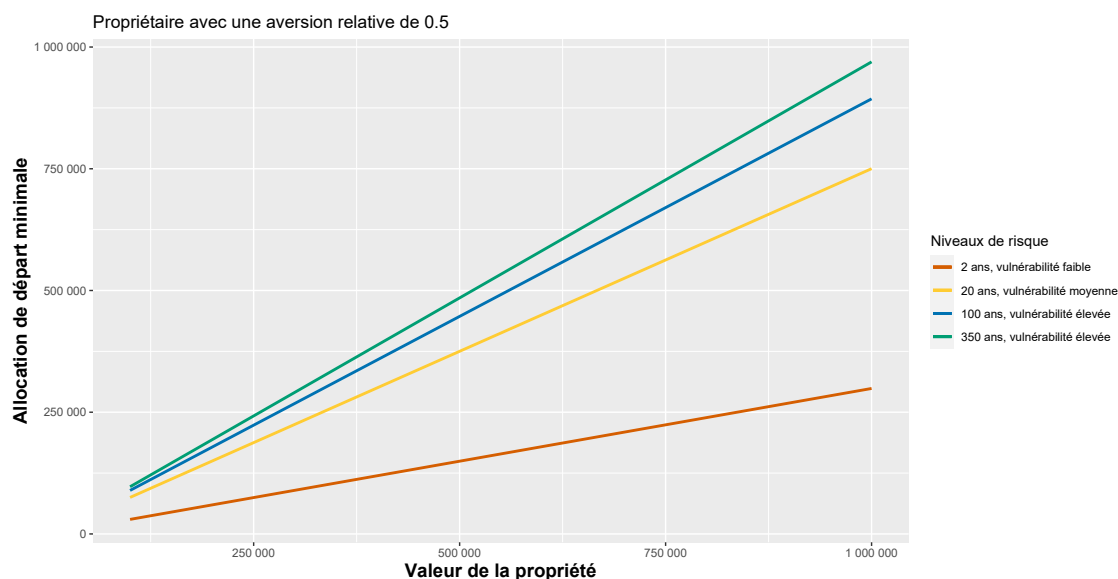


FIGURE 2.2 Allocation de départ minimale selon la valeur de la propriété

vulnérabilité faible se trouvait dans les zones de récurrence 20 ans et 100 ans respectivement. Selon les résultats obtenus dans le tableau 2.3, les agents dont les propriétés à vulnérabilité moyenne ou élevée sont situées dans la zone de récurrence 2 ans ainsi que ceux avec une grande aversion pour le risque devraient accepter la relocalisation peu importe le montant offert, puisque les pertes espérées sur l'horizon de 25 ans sont supérieures à la valeur de la propriété du fait de l'impact de la fréquence des inondations combiné à celui de la sévérité.

Les résultats que nous avons obtenus montrent que le montant de l'allocation de départ offerte devrait être ajustée selon le niveau de risque de la propriété. En effet, la relocalisation permet d'éviter des dommages qui augmentent avec le niveau de risque de la propriété. Ainsi donc, plus le niveau de risque est élevé, plus la portion de sa richesse que l'individu serait disposé à céder pour éviter ce risque est grande, donc il devrait accepter une allocation de départ plus faible.

Récurrence	Vulnérabilité	Dommages espérés sur 25 ans (%)	Pourcentage minimal acceptable (%)				
			$\gamma = 0$	$\gamma = 0,5$	$\gamma = 0,99$	$\gamma = 1,5$	$\gamma = 2$
2 ans	Faible	66,10	33,90	15,24	< 0	< 0	< 0
	Moyenne	220,31	< 0	< 0	< 0	< 0	< 0
	Élevée	440,55	< 0	< 0	< 0	< 0	< 0
20 ans	Faible	6,61	93,39	90,47	86,51	80,93	73,87
	Moyenne	22,05	77,95	66,86	52,17	33,78	15,26
	Élevée	44,12	55,88	29,63	< 0	< 0	< 0
100 ans	Faible	1,32	98,68	98,08	97,24	95,97	94,18
	Moyenne	4,39	95,61	93,16	89,41	83,35	74,37
	Élevée	8,76	91,24	84,80	73,09	49,55	3,74
350 ans	Faible	0,40	99,60	99,42	99,16	98,77	98,21
	Moyenne	1,26	98,74	98,02	96,89	94,97	91,85
	Élevée	2,52	97,48	95,56	91,85	83,04	57,14

TABLEAU 2.1 Pourcentage minimal de la valeur de la propriété acceptable comme allocation de départ pour divers niveaux d'aversion pour le risque

2.5.2 Effet du degré d'aversion pour le risque du propriétaire

Le but de cette section est d'analyser la variation de l'allocation de départ minimale que le propriétaire serait prêt à accepter, selon son degré d'aversion pour le risque, en fixant tous les autres paramètres du modèle.

Les résultats que nous avons obtenus montrent que l'allocation de départ minimale acceptable par un propriétaire neutre au risque correspond à la différence entre la valeur de sa propriété et la valeur actualisée des dommages totaux anticipés sur son horizon de planification. Ce résultat découle de l'équation 2.5 en posant γ égal à 0.

Le graphique 2.3 permet de constater que le pourcentage minimal de la valeur de la propriété acceptable comme allocation de départ décroît avec le degré d'aversion pour le risque, c'est-à-dire que plus le propriétaire a un degré d'aversion pour le risque élevé, plus il sera prêt à accepter un faible pourcentage de la valeur de sa propriété comme allocation de départ minimale. Rappelons qu'un propriétaire ayant de l'aversion pour le risque est prêt à payer une prime de risque afin d'éviter des dommages futurs incertains. Il sera donc prêt à renoncer à une part plus importante de la valeur de sa propriété et ainsi à accepter une allocation de départ moins élevée.

Prenons par exemple le cas d'une propriété à vulnérabilité moyenne située dans la zone de récurrence 20 ans. Si le propriétaire de cette résidence est neutre au risque, il accepterait une allocation de départ correspondant minimalement à 77,95% de la valeur de sa propriété, tandis qu'il accepterait moins de 50% de la valeur de sa propriété s'il a une aversion pour le risque élevée c'est-à-dire pour des valeurs de γ supérieures à 1. Pour les propriétés à haut risque, lorsque le degré d'aversion pour le risque est très élevé, c'est-à-dire pour des valeurs de γ supérieures à 1, le propriétaire rationnel devrait accepter n'importe quel montant comme allocation puisque les pertes espérées sur l'horizon temporel dépassent la valeur de la propriété.

2.5.3 Acceptabilité du programme d'indemnisation du Québec

Cette section sera consacrée à l'analyse des conditions dans lesquelles un propriétaire accepterait de se relocaliser dans le cadre du programme d'aide financière du gouvernement québécois. Considérons à des fins d'illustration que toutes les propriétés sont admissibles au plein montant de l'allocation offerte par le gouvernement qui correspond au minimum entre le coût à neuf de la résidence et

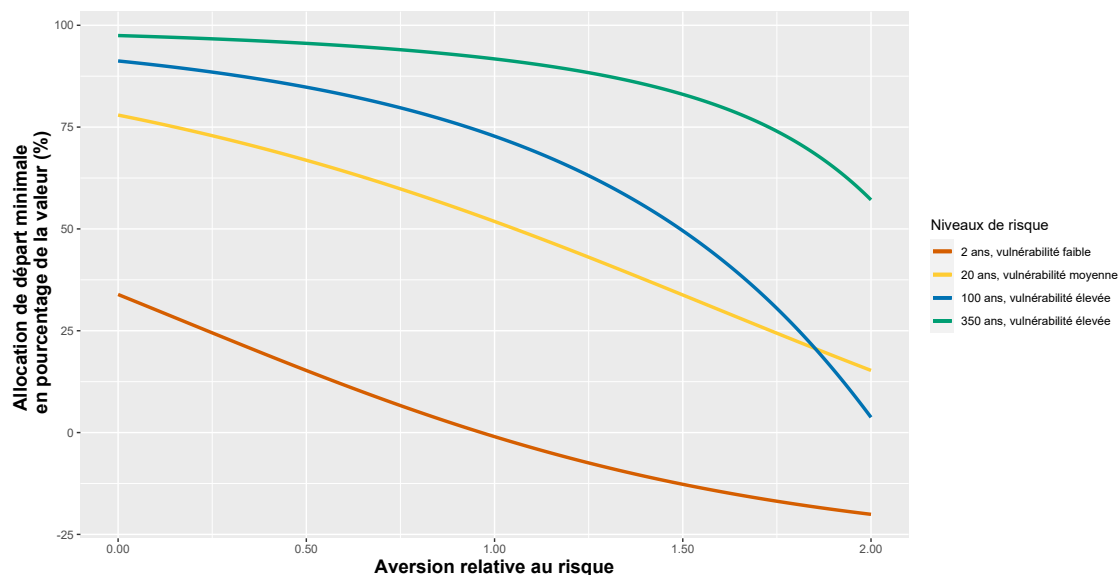


FIGURE 2.3 Allocation de départ minimale selon l'aversion

325 000 \$, auxquels s'ajoute un montant maximal de 60 000\$ si le propriétaire cède son terrain à la municipalité. Nous supposons pour simplifier notre analyse que tous les propriétaires cèdent leurs terrains et sont admissibles à un montant d'allocation maximal de 385 000\$. À la lumière des résultats présentés jusqu'à maintenant, tous les individus dont la propriété vaut moins de 385 000\$ devraient accepter la relocalisation proposée par le gouvernement, quel que soit leur degré d'aversion pour le risque. Ceci découle du fait que l'allocation de départ minimale qu'un individu neutre au risque accepterait correspond à la différence entre la valeur de la propriété et la valeur actualisée des dommages anticipés sur l'horizon temporel et que les individus ayant de l'aversion pour le risque accepterait un montant moindre.

Le tableau 2.3 présente les valeurs maximales des résidences dont le propriétaire accepterait l'allocation de départ maximale de 385 000\$ offerte par le gouvernement, selon la récurrence des inondations, la vulnérabilité des propriétés et

l'aversion pour le risque des propriétaires. Il a pour but de montrer l'effet du degré d'aversion et du niveau de risque sur l'adhésion à la relocalisation dans le programme offert par le gouvernement du Québec. Les résultats qui y sont présentés montrent qu'un propriétaire possédant une propriété d'une valeur supérieure à 500 000\$, sera moins susceptible d'accepter l'offre du gouvernement à moins d'être dans une zone à haut risque c'est-à-dire dans une zone de récurrence 2 ans ou à vulnérabilité élevée dans une zone de récurrence 20 ans. En effet, quelque soit leur aversion au risque, les propriétaires dont les résidences sont situées dans la zone de récurrence 2 ans ainsi que celles à vulnérabilité élevée dans la zone 20 ans accepteraient le montant de 385 000 \$ offert par le gouvernement, puisque la valeur limite est élevée même pour un individu neutre au risque. Dans la zone de récurrence 100 ans et pour les propriétés à vulnérabilité faible et moyenne dans la zone de récurrence 20 ans, seuls les propriétaires ayant des propriétés de valeurs relativement faibles accepterait une allocation de départ de 385 000\$. L'allocation offerte dans le cadre du Programme général et d'aide financière du gouvernement favorise donc l'adhésion à la relocalisation pour les propriétés de faible valeur et/ou situées dans les zones à haut risque ainsi que pour les propriétaires avec une aversion relative γ supérieure à 1.

2.6 Élévation du premier plancher

Nous analysons dans cette section la mesure d'immunisation qui consiste à élever le plancher principal de la propriété au dessus du niveau d'eau correspondant à une inondation centenaire. Le propriétaire qui choisit cette mesure devra investir un montant C dans le but de réduire les dommages liés aux inondations futures. Cette décision fera baisser le pourcentage de dommages de X_t à X'_t pour $t = 0, \dots, T$. Le propriétaire transforme ainsi sa richesse aléatoire Ω_t , en une richesse également

Récurrence	Vulnérabilité	Valeur de propriété maximale dont le propriétaire accepterait une allocation de départ de 385 000 \$				
		$\gamma = 0$	$\gamma = 0,5$	$\gamma = 0,99$	$\gamma = 1,5$	$\gamma = 2$
2 ans	Faible	1 135 583	2 526 041	-	-	-
	Moyenne	-	-	-	-	-
	Élevée	-	-	-	-	-
20 ans	Faible	412 264	425 533	445 046	475 729	521 194
	Moyenne	493 900	575 839	737 985	1 139 592	2 523 033
	Élevée	689 000	1 299 188	-	-	-
100 ans	Faible	390 138	392 520	395 940	401 185	408 784
	Moyenne	402 660	413 250	430 595	461 924	517 694
	Élevée	421 967	454 013	526 766	776 976	10 285 351
350 ans	Faible	386 527	387 233	388 243	389 790	392 030
	Moyenne	389 925	392 781	397 355	405 379	419 152
	Élevée	394 969	402 887	419 170	463 630	673 819

TABLEAU 2.2 Acceptabilité de l'allocation de départ offerte par le gouvernement du Québec

Ω'_t aléatoire définie par,

$$\Omega'_0 = 2\ell - C \quad \text{et} \quad \Omega'_t = \ell - \ell X'_t \quad \text{pour } 1 \leq t \leq T.$$

Ainsi donc, l'utilité espérée inter-temporelle est définie par,

$$U(\Omega'_0, \dots, \Omega'_T, T) = u(2\ell - C) + E \left[\sum_{t=1}^T \frac{u(\ell - \ell X'_t)}{(1 + \rho)^t} \right]. \quad (2.6)$$

Le but du propriétaire étant de maximiser son utilité, il prendra la décision d'élever son premier plancher seulement si la mesure lui apporte plus d'utilité que le statu quo, c'est-à-dire $U(\Omega'_0, \dots, \Omega'_T, T) \geq U(\Omega_0, \dots, \Omega_T, T)$.

Nous nous intéresserons à déterminer le montant maximal $C^{\max}$ que le propriétaire serait prêt à investir afin d'élever son premier plancher. Ce montant est tel que le propriétaire serait indifférent entre le statu quo et la mise en place de la mesure c'est-à-dire, $U(\Omega'_0, \dots, \Omega'_T, T) = U(\Omega_0, \dots, \Omega_T, T)$.

L'utilité de la richesse après l'adoption de mesure d'élévation du premier plancher, donnée par l'équation (2.6), dépend de la valeur de la propriété, du niveau d'aversion pour le risque, du montant investi et des dommages résiduels anticipés. Ainsi donc, le choix d'élever le premier plancher sera influencé par le coût de mise en place de la mesure ainsi que par la capacité de celle-ci à réduire les dommages mais aussi par la valeur de la propriété et le niveau d'aversion pour le risque du propriétaire. Nous déterminerons donc dans un premier temps, l'impact de ces paramètres sur le montant d'investissement maximal. Nous analyserons ensuite l'adhésion des propriétaires à cette mesure, dans le cadre du programme offert par le gouvernement du Québec.

2.6.1 Effet de la valeur de la propriété et de l'efficacité de la mesure

Supposons que la mise en place de la mesure permette de réduire la vulnérabilité des propriétés de sorte que peu importe la zone de récurrence dans laquelle se trouve la propriété initialement, elle deviendra une propriété à vulnérabilité faible dans la zone de récurrence 100 ans. Ainsi donc, plus le niveau de risque initial est élevé, plus la capacité de la mesure à réduire les dommages est élevée et par conséquent elle démontre une grande efficacité. Dans cette section, nous analyserons l'impact de la valeur de la propriété et de l'efficacité de la mesure sur le montant maximal que le propriétaire consentirait à investir pour élever son premier plancher.

Le graphique 2.4 présente le montant maximal qu'un propriétaire ayant une

aversion relative γ de 0,5 serait prêt à investir en fonction de la valeur de sa propriété pour quatre niveaux de risque. Ce graphique montre que le montant d'investissement maximal acceptable pour la mise en place de la mesure croît proportionnellement avec la valeur de sa propriété, c'est-à-dire que ce montant peut être exprimé en un pourcentage fixe de la valeur de la propriété pour un degré d'aversion au risque donné. De plus, comme le montre le graphique, plus la mesure démontre de l'efficacité à réduire les dommages, plus le montant maximal que le propriétaire serait prêt à investir est élevé. L'investissement maximal serait par exemple de 83,30% pour une propriété à vulnérabilité faible dans la zone de récurrence 2 ans comparativement à 31,38% et 13,35% dans le cas de propriétés à vulnérabilité moyenne dans la zone de récurrence 20 ans et élevée dans la zone de récurrence 100 ans respectivement. Le graphique montre également que si la mise en place de la mesure coûte 100 000\$ comme nous l'avons supposé au chapitre 1, alors l'immunisation serait optimale uniquement pour les propriétés à haut risque et/ou ayant une grande valeur.

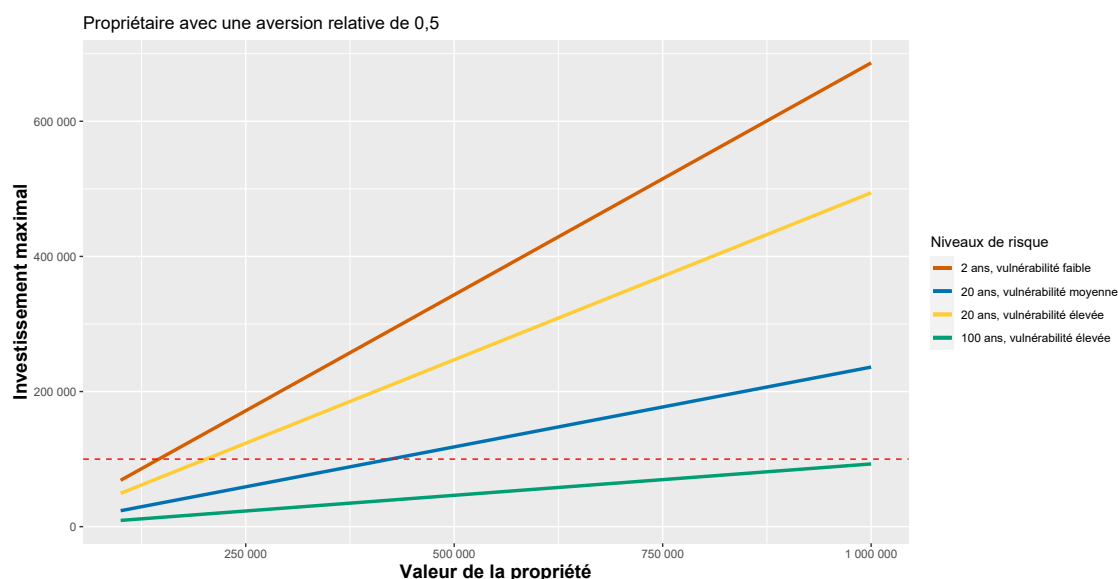


FIGURE 2.4 Investissement maximal selon la valeur de la propriété

2.6.2 Effet du degré d'aversion au risque sur l'investissement maximal

Récurrence	Vulnérabilité	Pertes évitées en moyenne sur 25 ans (%)	Pourcentage minimal acceptable (%)				
			$\gamma = 0$	$\gamma = 0,5$	$\gamma = 0,99$	$\gamma = 1,5$	$\gamma = 2$
2 ans	Faible	64,78	64,78	83,30	99,31	11,51	119,10
	Moyenne	218,99	218,99	196,12	187,24	180,66	175,95
	Élevée	439,23	439,23	222,38	199,89	197,40	195,62
20 ans	Faible	5,29	5,29	7,64	10,87	15,49	21,48
	Moyenne	20,73	20,73	31,38	45,69	63,95	82,72
	Élevée	42,80	42,80	68,81	102,01	136,19	163,73
100 ans	Moyenne	3,07	3,07	4,94	7,93	13	20,95
	Élevée	7,44	7,44	13,35	24,48	47,76	94,62

TABLEAU 2.3 Investissement maximal en % de la valeur de la propriété selon le niveau de risque pour divers niveaux d'aversion pour le risque

Le montant d'investissement maximal représente un pourcentage de la valeur de la propriété, qui augmente avec le degré d'aversion pour le risque du propriétaire et le niveau de risque de la propriété. Le tableau 2.2 illustre l'évolution du pourcentage maximal de la valeur de sa propriété qu'un propriétaire serait disposé à investir pour élever son premier plancher selon son degré d'aversion pour le risque et le niveau de risque de sa propriété. Les résultats qui y sont présentés montrent qu'un propriétaire neutre au risque serait prêt à investir au maximum l'équivalent des dommages évités sur l'horizon de planification. Ce pourcentage augmente avec le degré d'aversion pour le risque. Par exemple le propriétaire d'une résidence à vulnérabilité élevée située dans une zone de récurrence 20 ans qui passe à une vulnérabilité faible dans la zone de récurrence 100 ans serait disposé à investir 68,81% de la valeur de sa propriété s'il a un niveau d'aversion relative γ de 0,5. Ce pourcentage dépasserait la valeur de la propriété pour des niveaux d'aversion

plus élevés. On remarque donc que l'aversion pour le risque influence grandement la décision d'adopter une mesure qui permet de réduire les dommages, surtout lorsque celle-ci démontre une grande efficacité c'est-à-dire lorsque le niveau de risque initial de la propriété est élevé.

2.6.3 Acceptabilité du programme d'indemnisation du Québec

Le gouvernement du Québec dans le cadre du programme général d'indemnisation et d'aide financière, offre une aide équivalente à 90% des frais déboursés pour mettre en place une mesure d'immunisation telle que l'élévation du premier plancher. Ce montant, additionné à l'aide accordée pour réparer les dommages à la résidence ne peut excéder le minimum entre le coût neuf et 325 000 \$. Dans cette section, nous nous intéresserons uniquement aux frais engagés pour l'élévation du premier plancher d'une résidence qui s'élèverait à 100 000\$ en moyenne selon les données du MSP. Ainsi donc le propriétaire qui prendrait la décision d'élever son premier plancher, paierait 10% du coût de la mesure soit 10 000\$.

En nous référant au graphique 2.4 ainsi qu'au tableau 2.2, nous pouvons remarquer que le montant maximal qu'un propriétaire serait prêt à investir dans la mesure d'immunisation excède très largement le montant de 10 000\$ à la charge du propriétaire sauf dans le cas où la valeur de la propriété est très faible. Les propriétaires devraient donc être plus favorables à adopter une mesure individuelle visant à réduire les dommages lorsque les coûts de mise en place sont supportés en grande partie par le gouvernement. Il existe toutefois des contraintes liées au cadre réglementaire, à la faisabilité technique, ainsi qu'à la disponibilité de professionnels spécialisés dans la réalisation de travaux d'immunisation. Ces enjeux sont primordiaux et méritent une analyse plus approfondie mais hors de contexte de ce mémoire.

2.7 Influence des biais cognitifs sur la décision optimale

Dans les sections précédentes, nous avons supposé que les propriétaires étaient rationnels et basaient leurs décisions sur des informations objectives telles que l'estimation des probabilités d'occurrence d'inondations et de la sévérité ainsi que de l'étendue des dommages liés à une inondation. Ceci sous-entend que ces informations sont parfaitement disponibles et accessibles à tous les agents. Nous avons montré, dans ce contexte, que le niveau de risque, la valeur de la propriété et le degré d'aversion pour le risque du propriétaire influencent la décision d'adopter une mesure de protection. Nous avons également déterminé les conditions dans lesquelles les propriétaires supposés rationnels, seraient favorables à l'adoption des mesures, dans le cadre du programme d'aide financière offert par le gouvernement du Québec.

Cependant, selon le constat général, certains propriétaires qui seraient en théorie favorables, demeurent réticents à adopter les mesures, qui seraient objectivement rationnelles (Aerts et *al.*, 2018). Ceci nous amène à nous interroger sur les déterminants réels de la décision d'adopter des mesures de protection dans le contexte où l'accès à l'information est limitée et soumis à de l'incertitude. En effet, plusieurs études dans le domaine de l'économie comportementale ont montré que les individus faisant face à la prise de décision en situation d'incertitude sont soumis à des biais cognitifs et ne réagissent pas toujours de manière rationnelle. Nous nous intéressons donc dans cette section à évaluer l'effet de l'attachement à la propriété et au cadre de vie, de la perception du risque et la myopie qui sont trois biais cognitifs identifiés dans la littérature comme des freins à l'adoption de mesures d'adaptation.

2.7.1 Effet de la valeur additionnelle accordée au bien-être

Selon Burningham et *al.* (2008), certains individus ont tendance à nier ou à sous-estimer le risque d'inondation en raison de leur attachement à leurs propriétés. De plus, plusieurs auteurs (Kick et *al.*, 2011 ; Willis et *al.*, 2011) ont montré que l'attachement à la propriété et le bien-être associé au mode de vie qui y est rattaché, sont des facteurs importants pouvant influencer la décision du propriétaire de céder sa propriété pour se relocaliser. Il est alors naturel de se demander la façon dont ce bien-être additionnel affecte l'allocation de départ minimale qui serait acceptable. Supposons donc que l'on puisse attribuer une valeur monétaire au bien-être que le propriétaire retire de son mode de vie riverain, et notons ce montant B . Ce montant B vient augmenter artificiellement la richesse initiale Ω_0 du propriétaire qui devient donc

$$\Omega_0^B = B + \Omega_0 = B + 2\ell.$$

Le graphique 2.5 compare le pourcentage minimal de la valeur de la propriété acceptable comme allocation de départ en fonction de la valeur accordée au bien-être additionnel, pour une propriété à vulnérabilité moyenne dans la zone de récurrence 20 ans, selon le degré d'aversion au risque du propriétaire. Ce graphique 2.5 montre que plus le propriétaire accorde une valeur importante à son cadre de vie riverain et est attaché à sa propriété, plus il exigera une allocation de départ élevé. De plus, les résultats montrent qu'un propriétaire qui accorde une grande valeur à son mode de vie et est très attaché à sa propriété, refusera la relocalisation même si l'allocation de départ était égale à la valeur de sa propriété. Ceci est le cas par exemple des propriétaires qui accordent un bien-être additionnel de correspondant à plus de 30% de la valeur de leur propriété à vulnérabilité moyenne dans la zone de récurrence 20 ans. Le bien-être retiré du mode de vie riverain est un facteur déterminant dans la décision de relocalisation qui mérite d'être pris en

compte dans la conception d'un programme de relocalisation si les gouvernements veulent accroître l'adhésion des propriétaires.

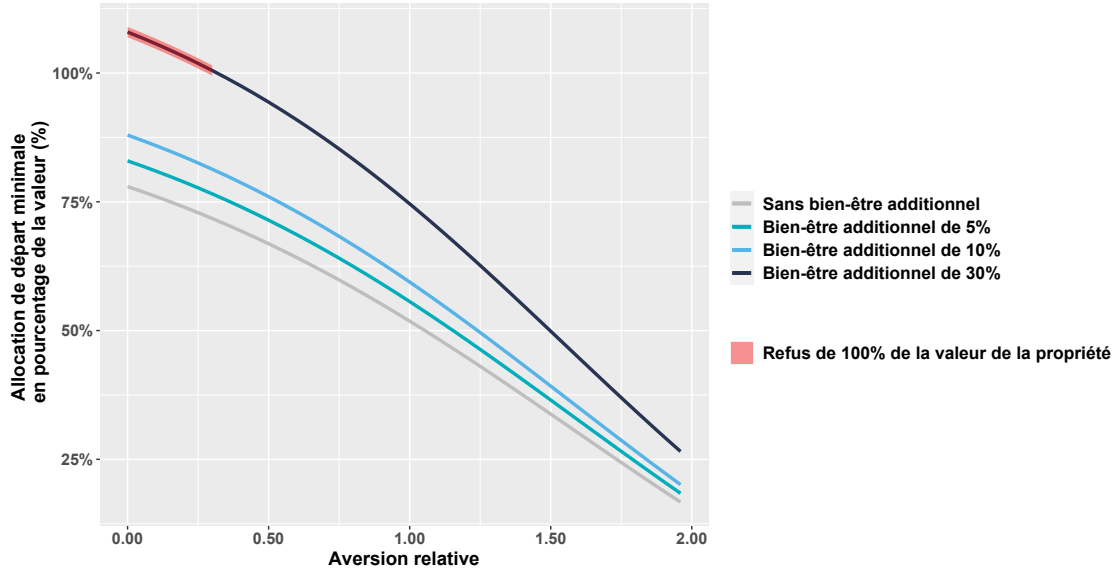


FIGURE 2.5 Effet d'un bien-être additionnel sur l'adhésion à la relocalisation

Intéressons-nous à présent à l'effet du bien-être relié au cadre de vie riverain sur la décision d'adopter une mesure d'immunisation. Supposons que l'adoption de la mesure d'immunisation augmente la satisfaction qu'éprouve le propriétaire à vivre dans sa propriété puisqu'elle pourrait contribuer à accroître le sentiment de sécurité et réduire le niveau d'anxiété lié à l'occurrence d'inondations. Si l'on désigne par B , le montant additionnel lié à l'augmentation du bien-être résultant de l'adoption de la mesure d'immunisation, la richesse du propriétaire devient alors,

$$\Omega_0^B = B + \Omega'_0 = B + 2\ell - C.$$

Le graphique 2.6 compare le pourcentage d'investissement maximal lorsqu'on ne tient pas compte du bien-être additionnel avec celui d'un propriétaire qui retire un

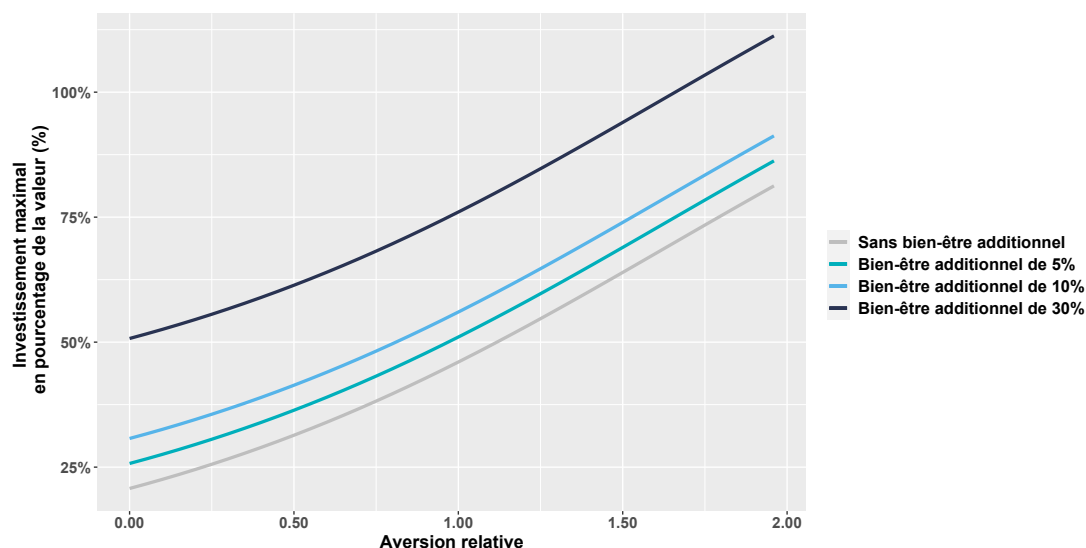


FIGURE 2.6 Effet du bien-être additionnel sur l'adoption d'une mesure d'immunisation

bien-être équivalent à 5%, 10% ou 30% de la valeur de sa propriété à vulnérabilité moyenne dans la zone de récurrence 20 ans. Le pourcentage maximal de la valeur de sa résidence que le propriétaire serait disposé à payer pour élever son premier plancher croît avec le bien-être additionnel que celui-ci retire de son cadre de vie. Ainsi donc, plus ce bien-être est élevé, plus le pourcentage d'investissement maximal augmente. On constate donc que le bien-être additionnel lié à la mise en place de la mesure d'immunisation influence positivement l'adhésion des propriétaires.

2.7.2 Effet de la perception du risque

Selon Botzen et *al.* (2009), les individus ne réagissent pas toujours de manière rationnelle lors de la prise de décision en situation d'incertitude. En effet, les individus évaluent le risque sur la base de leur intuition ou croyance lorsque l'information est limitée, sans avoir à mettre en place un processus complexe comme le font les experts. Autrement dit, les individus basent leur décision sur leurs per-

ceptions du risque qui se définit comme une interprétation subjective et imparfaite du risque réel. Ainsi donc, la perception du risque constitue un élément clé de la prise de décision, puisque celle-ci déterminera l'adoption de comportements visant à mitiger le risque (Villa et Bélanger, 2013). De plus, plusieurs études (Burningham et *al.*, 2008 ; Botzen et *al.*, 2009 ; Thistlethwaite, 2018) ont montré que les résidents de zones inondables ont tendance à avoir une faible perception du risque et donc à sous-estimer la probabilité d'occurrence d'inondations, qui est un paramètre clé de l'analyse de la pertinence économique des mesures de protection. Il est donc essentiel de tenir compte de la perception du risque dans les analyses afin d'anticiper de manière plus précise l'adhésion des individus aux mesures de protection. Nous analyserons donc dans cette section, l'influence du décalage entre la probabilité réelle d'occurrence d'inondations et la probabilité perçue sur l'adhésion aux mesures de protection.

Le graphique 2.7 présente le pourcentage minimal de la valeur de la propriété qu'un individu neutre au risque accepterait comme allocation de départ en fonction de la probabilité d'occurrence d'inondation perçue. Comme le montre le graphique, lorsque le propriétaire sous-estime le risque représenté par la probabilité d'occurrence d'une inondation, il demandera une allocation de départ beaucoup plus élevée que celle calculée sous l'hypothèse de rationalité avec la probabilité réelle. Par exemple un propriétaire neutre au risque dont la propriété à vulnérabilité moyenne se trouve dans une zone de récurrence 10 ans donc avec une probabilité de survenance annuelle de 10%, accepterait au minimum 55,90% de la valeur de sa propriété comme allocation s'il perçoit le risque réel. Ce pourcentage augmente à 77,95% et à 95,61% s'il croit que la probabilité annuelle d'occurrence d'une inondation est de 5% et 1% respectivement, ce qui est assez significatif.

Intéressons nous à présent à l'impact qu'a le décalage entre le risque réel et le risque perçu sur le montant maximal qu'un propriétaire serait prêt à investir pour

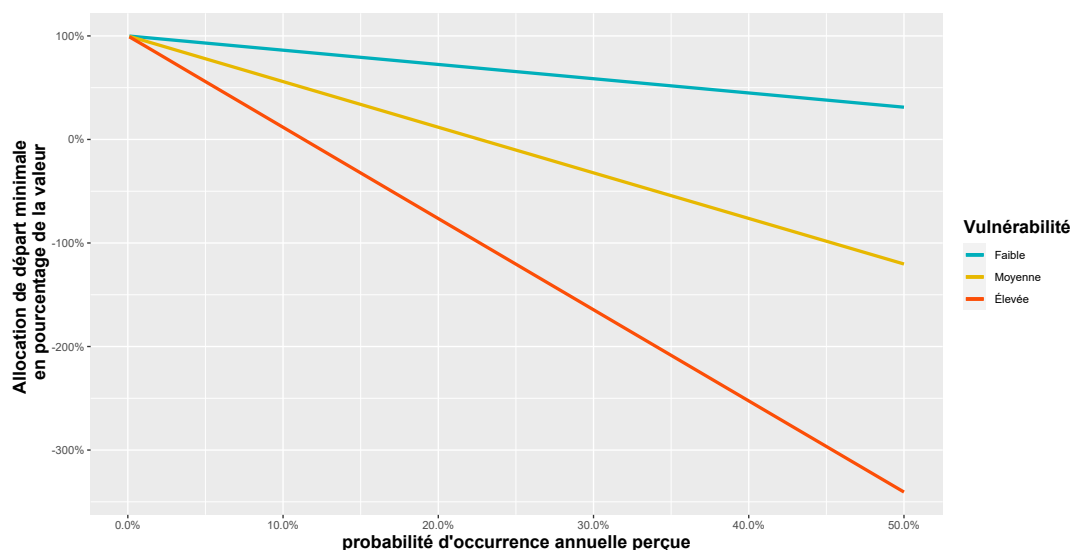


FIGURE 2.7 Allocation minimale selon la probabilité perçue

l'élévation du premier plancher. Le graphique 2.8 présente le pourcentage maximal de la valeur de la propriété que le propriétaire est prêt à investir pour élever son premier plancher selon la probabilité d'occurrence d'inondation perçue. Il montre sans surprise que plus le propriétaire perçoit le risque comme important, plus il sera prêt à investir un montant élevée pour protéger sa propriété. Par exemple un propriétaire neutre au risque dont la propriété à vulnérabilité moyenne se trouve dans une zone de récurrence 10 ans donc avec une probabilité de survenance annuelle de 10%, serait disposé à investir jusqu'à 42,78% de la valeur de sa propriété dans une mesure de mitigation s'il perçoit le risque réel. Ce pourcentage baisse à 20,73% et à 3,07% s'il perçoit une probabilité annuelle d'occurrence d'une inondation est de 5% et 1% respectivement, ce qui est assez significatif

La perception du risque joue donc un rôle majeur dans la décision d'adopter des mesures de protection et par conséquent sur l'adhésion aux programmes offerts par le gouvernement. Il serait donc pertinent, dans un contexte où les changements climatiques pourraient potentiellement accroître la fréquence des événements mé-

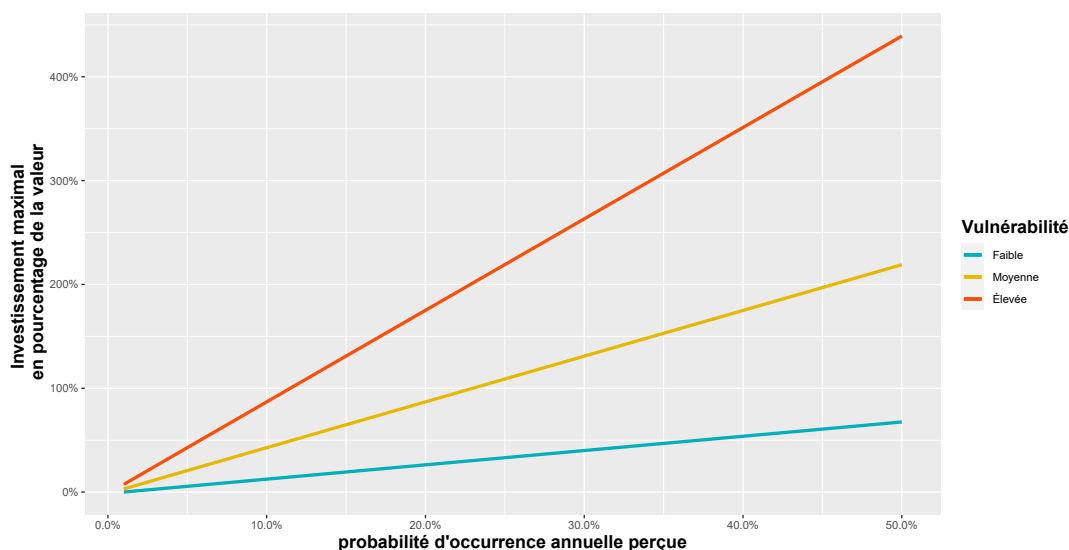


FIGURE 2.8 Investissement maximal selon la probabilité perçue

téorologiques extrêmes, que des stratégies soient mise en place afin d'éveiller la conscience les populations riveraines sur le risque réel dans le but de les encourager à adopter des mesures de protection.

2.7.3 Effet de l'horizon de planification

Jusqu'à présent, nous avons analysé la façon dont varie l'allocation de départ minimale acceptable sous l'hypothèse que le propriétaire considère les dommages anticipés sur un horizon temporel de 25 ans. Cependant, plusieurs études dans le domaine de l'économie comportementale notamment Meyer et Kunreuther (2017), révèlent que les individus sont myopes de sorte que ces individus ne se projettent pas assez loin dans le futur pour évaluer correctement le risque sur un horizon temporel de long terme. Nous analyserons donc la manière dont l'horizon temporel sur lequel les dommages sont anticipés, influence l'allocation de départ minimale qu'un propriétaire serait prêt à accepter.

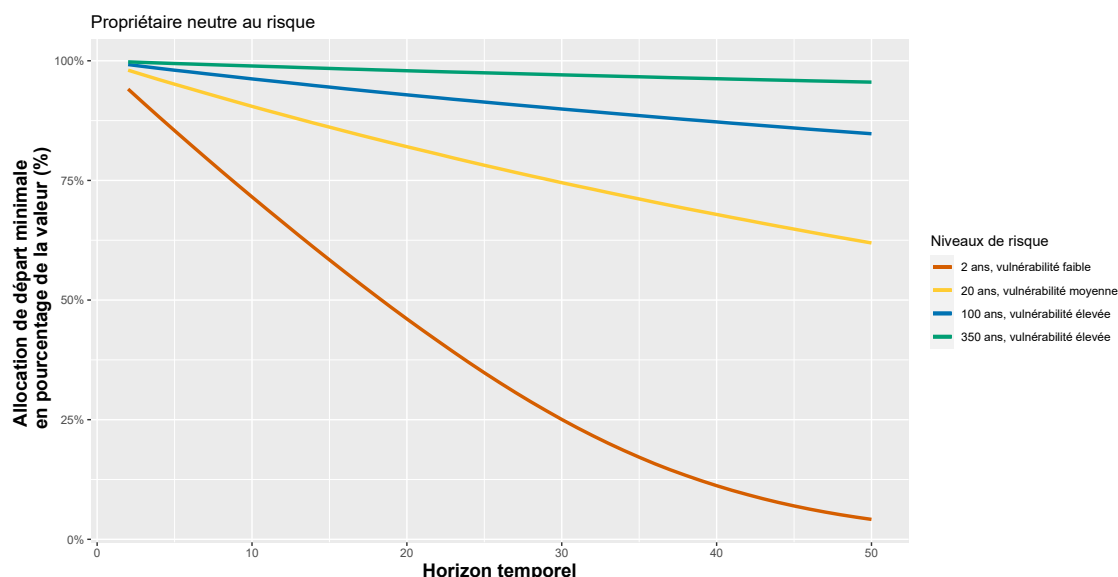


FIGURE 2.9 Effet de l'horizon temporel sur l'adhésion à la relocalisation

Le graphique 2.9 qui présente le pourcentage d'allocation minimal selon l'horizon temporel sur lequel sont considérés les dommages anticipés, montre que lorsque la propriété est située dans une zone à faible récurrence d'inondation, la longueur de l'horizon temporel influence faiblement le montant minimal d'allocation de départ. Par exemple pour une propriété à vulnérabilité élevée dans la zone de récurrence 350 ans, l'allocation de départ minimale acceptable par un individu neutre au risque baisserait d'environ 0.09% par année. Cette baisse s'estimerait à environ 0.3% pour une propriété à vulnérabilité élevée dans la zone de récurrence 100 ans. Cependant plus la fréquence des inondations augmente, plus l'effet de l'horizon temporel se perçoit. En effet, pour une propriété dans la zone de récurrence 2 ans ayant une vulnérabilité faible, un individu qui se projette sur un horizon de 10 ans, accepterait un montant d'allocation minimal correspondant à 71,55% de la valeur de sa propriété tandis qu'il accepterait 33,90% si son horizon était de 25 ans.

Nous avons analysé de la même façon, l'effet de l'horizon de planification de l'individu sur le montant maximal qu'il serait disposé à investir dans la mise en place d'une mesure visant à réduire le risque. Une telle mesure pourrait être par exemple, l'élévation du premier plancher au dessus du seuil de l'inondation centenaire. Les résultats obtenus confirment la nécessité de tenir compte de l'horizon de planification de l'individu dans l'élaboration de programmes publics de gestion du risque d'inondation. Supposons par exemple que le gouvernement élabore un programme de subvention pour la mise en place d'une mesure en considérant un horizon de 50 ans, comme c'est souvent le cas pour des projets visant à gérer les risques naturels. Dans ce cas, la contribution du propriétaire dont la résidence à vulnérabilité moyenne est située dans une zone de récurrence 20 ans, serait de 36,81% de la valeur de sa propriété, comme l'indique le graphique 2.10. Cependant si l'horizon de planification de l'individu est de seulement 10 ans, il serait irrationnel d'investir ce montant. En effet, lorsqu'on considère un horizon de 10 ans, le montant de l'investissement maximal s'élèverait à seulement 8,97%. Nous avons donc ici un écart d'environ 28% qui est assez considérable, soit par exemple un montant de 112 000\$ pour une propriété d'une valeur de 400 000\$.

2.8 Discussion

Le modèle théorique présenté dans ce chapitre a l'avantage d'être simple, flexible et facile à mettre en oeuvre. Il nous a permis d'intégrer et de mettre en lumière la pertinence de tenir compte d'éléments tels que l'attitude face au risque, la perception que les individus ont de celui-ci et l'attachement à leur cadre de vie, qui se sont révélés fondamentaux dans la décision d'adopter des comportements de protection.

Nous avons montré que l'adoption de mesures de protection s'avère rationnel

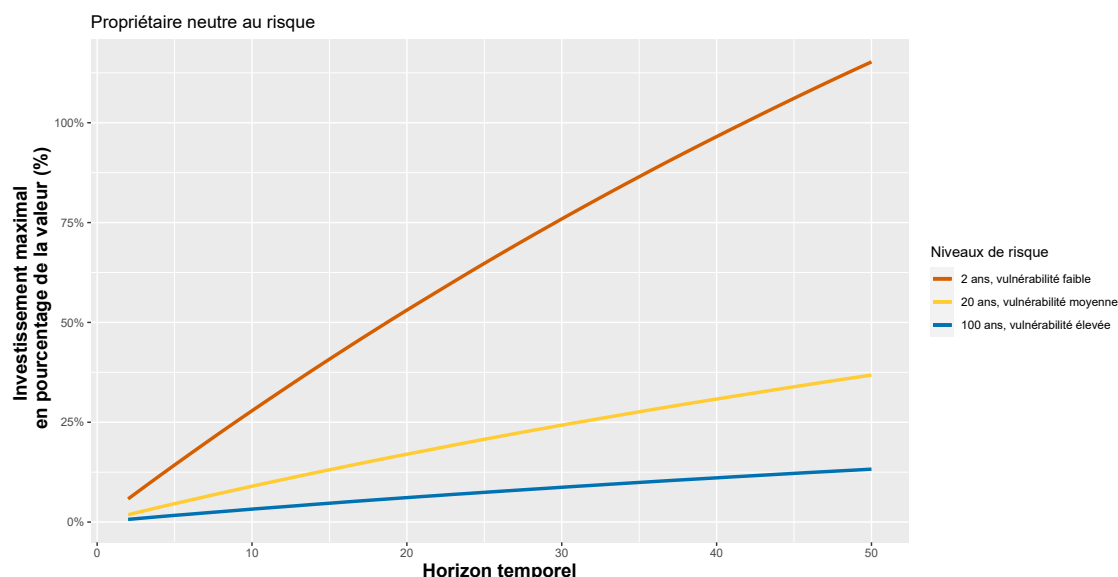


FIGURE 2.10 Effet de l’horizon temporel sur l’adoption de mesures de protection

et économiquement pertinente dans plusieurs situations. Toutefois, cette volonté d’adopter une mesure ne mènera pas nécessairement à la mise en place de celle-ci en raison de contraintes, telles que la faisabilité des mesures, le manque d’argent et l’horizon temporel. Par exemple, il serait tout à fait possible qu’un propriétaire pour lequel l’allocation de départ d’un montant maximal de 385 000\$ soit acceptable, de refuser la relocalisation, si ce montant ne lui permet pas de se reloger. Dans le cas de l’élévation du premier plancher, le propriétaire pourrait ne pas disposer de sa contribution de 10 000\$, ce qui constituerait un frein à la mise en place de la mesure. Il serait peut-être moins pertinent pour un individu qui souhaite posséder la propriété pendant seulement 5 ans d’adopter les mêmes comportements de protection qu’un individu dont l’horizon de planification est de 25 ans. Il serait encore moins pertinent pour un individu d’adhérer à un programme gouvernemental dans lequel les seuils d’indemnisation seraient fixés en considérant un horizon de 50 ans.

De plus, la perception du risque par les experts et les décideurs publiques diffère en général de celle des individus vivants dans les zones inondables. En effet, ceux-ci n'ont pas les moyens techniques d'évaluer correctement le risque auquel ils font face, et basent leurs décisions sur l'expérience passée du risque. Or, il est bien documenté que les individus sous-estiment la probabilité d'occurrence des événements rares pouvant causer des dommages catastrophiques. Ce biais d'optimisme, les amène à ne pas prendre les mesures adéquates pour s'en prémunir puisque la perception que les individus ont du risque influence fortement l'adoption de mesures de protection. D'où la nécessité que les gouvernements mettent en place des stratégies de communications efficaces, dans une vision intégrée de gestion du risque d'inondation à long terme, prenant en compte les concepts de vulnérabilité et de perception du risque par les individus affectés par le risque d'inondation, comme l'ont suggéré Fortin et *al.* (2020).

CHAPITRE III

ANALYSE MATHÉMATIQUE DU MOMENT OPTIMAL DE MISE EN PLACE DES MESURES DE MITIGATION

3.1 Contexte

Dans les chapitres précédents, nous avons analysé la pertinence économique de l'adoption de mesures de gestion du risque visant à réduire la vulnérabilité et l'exposition des propriétés situées dans une zone sujette aux inondations. Nous avons montré que les individus faisant face au choix d'une mesure, sont influencés par leur degré d'aversion pour le risque, l'attachement à leur propriété et au bien-être retiré de leur cadre de vie ou encore leur perception du risque. Nous avons également déterminé les conditions dans lesquelles un propriétaire supposé rationnel, adhérerait à la relocalisation dans le contexte du programme d'aide offert par le gouvernement du Québec. Nous avons considéré la situation dans laquelle le propriétaire a la possibilité de se relocaliser immédiatement, et que sa décision est prise en tenant compte des dommages futurs anticipés sur un horizon de 25 ans. En réalité, le gouvernement du Québec dans le cadre de son programme d'aide financière, n'offre pas l'option de relocaliser en échange d'une allocation de départ, à tous les propriétaires qui le souhaitent. En effet, la relocalisation est offerte seulement au moment où le montant cumulatif des aides financières accordées depuis le 10 avril 2019 atteint 50% du coût neuf de la propriété ou le

montant maximal de 162 500\$. Si le propriétaire refuse la relocalisation, aucune aide financière ne lui sera accordée dans le futur dans le cadre du programme. Le propriétaire devra donc assumer la totalité des dommages futurs en cas de refus. Toutefois, comme l'ont montré Boudreault et Bourdeau-Brien (2020), l'instauration de la limite d'indemnisation représente un lourd fardeau financier qui peut mener certains propriétaires à l'insolvabilité. Il apparaît donc nécessaire de s'interroger sur la pertinence de l'instauration d'une relocalisation conditionnelle à l'atteinte d'une limite, alors que nous avons montré dans le chapitre 2, qu'il serait tout à fait rationnel et acceptable pour plusieurs individus de se relocaliser ou d'immuniser leur propriété plutôt que de rester et assumer les pertes.

De plus, les propriétaires étant sujets à des biais cognitifs tels que la myopie auront tendance à penser que la mise en place d'une mesure de réduction du risque ou la relocalisation peuvent être reportées, puisqu'ils ne se projettent pas assez loin dans le futur et ne sont pas capables d'évaluer adéquatement les coûts liés à l'inaction. Ainsi, la décision d'adopter une mesure sera prise, non pas à la suite d'un processus d'analyse complexe qui permet d'estimer les dommages futurs, mais en fonction de leur expérience personnelle du risque. En effet, il a été relevé dans Villa et Bélanger (2013), que l'expérience liée aux inondations est le facteur qui influence le plus la perception du risque, et par conséquent, l'adoption de comportements de protection. En outre, l'adoption de mesures de protection implique des investissements coûteux ou des désagréments immédiats ou à court terme pour éviter des dommages futurs potentiels et incertains à long terme. De ce fait, même si la relocalisation s'avère théoriquement acceptable et est offerte immédiatement, sa mise en place pourrait ne jamais être effective si les propriétaires ne disposent pas de l'information pertinente nécessaire à la prise de décision optimale.

Ce chapitre vise à montrer, en utilisant quelques éléments de la théorie des martin-

gales et du temps d'arrêt optimal à temps discret, que le report de la relocalisation ou sa mise en place conditionnellement à l'atteinte d'une limite n'est pas optimale.

3.2 Éléments de la théorie des martingales et du temps d'arrêt optimal

3.2.1 Martingale, surmartingale et sousmartingale

Définition 1.2.1

Soit $(Z_t)_{t \in \mathbb{N}}$ un processus stochastique à temps discret c'est-à-dire une suite de variables aléatoires qui représentent un phénomène aléatoire et évolutif dans le temps. Ce processus est appelé,

- une martingale s'il est constant en moyenne c'est-à-dire sa valeur espérée étant donné l'information disponible au temps t , est sa valeur à cet instant c'est-à-dire,

$$\mathbb{E}[Z_{t+1} | Z_0, \dots, Z_t] = Z_t, \quad \text{pour tout } t \in \mathbb{N};$$

- une surmartingale s'il a tendance à décroître en moyenne c'est-à-dire,

$$\mathbb{E}[Z_{t+1} | Z_0, \dots, Z_t] \leq Z_t, \quad \text{pour tout } t \in \mathbb{N};$$

- une sousmartingale s'il a tendance à croître en moyenne c'est-à-dire,

$$\mathbb{E}[Z_{t+1} | Z_0, \dots, Z_t] \geq Z_t, \quad \text{pour tout } t \in \mathbb{N}.$$

Proposition 1.2.1 (transformations)

Soit $\phi : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$, une fonction telle que $\phi(X_t)$ soit intégrable pour tout t .

- si $(Z_t)_{t \in \mathbb{N}}$ est une martingale et ϕ convexe (resp. concave), alors $(\phi(Z_t))_{t \geq 0}$ est une sousmartingale (resp. surmartingale);

- si $(Z_t)_{t \in \mathbb{N}}$ est une surmartingale et ϕ croissante et concave, alors $(\phi(Z_t))_{t \in \mathbb{N}}$ est une surmartingale ;
- si $(Z_t)_{t \in \mathbb{N}}$ est une sousmartingale et ϕ croissante et convexe, alors $(\phi(Z_t))_{t \in \mathbb{N}}$ est une sousmartingale.

3.2.2 Théorie du temps d'arrêt optimal

Définition 1.2.2 (temps d'arrêt)

Soit τ une variable aléatoire, à valeurs dans $\mathbb{N}$, qui peut être interprétée comme le moment où le comportement d'un processus stochastique donné présente un certain intérêt. τ est un temps d'arrêt si la décision d'arrêter ou de poursuivre le processus au temps t est basée uniquement sur l'information disponible au temps t . Autrement dit, l'événement $\{\tau = t\}$ ne dépend que de $Z_0, \dots, Z_t$ pour tout $t \in \mathbb{N}$.

Définition 1.2.3 (temps d'arrêt optimal)

Un temps d'arrêt τ^* est optimal s'il optimise un critère d'optimalité dépendant des informations disponibles jusqu'à τ , par exemple $E[Z_\tau]$.

Proposition 1.2.2 (temps d'arrêt optimal)

- Si $(Z_t)_{t \in \mathbb{N}}$ est une surmartingale alors le temps d'arrêt optimal $\tau^* = 0$. Autrement dit, il n'est jamais optimal d'entrer dans un jeu où on perd en moyenne à chaque partie.
- Si $(Z_t)_{t \in \mathbb{N}}$ est une sousmartingale alors le temps d'arrêt optimal $\tau^* = T$. Autrement dit, il est optimal de rester aussi longtemps que possible dans un jeu où on gagne en moyenne à chaque partie.

- Si $(Z_t)_{t \in \mathbb{N}}$ est une martingale alors tous les temps d'arrêt entre 0 et T sont optimaux.

3.3 Analyse de la pertinence de la limite

Dans cette section, nous supposons que le gouvernement offre la possibilité au propriétaire de se relocaliser au moment où il le souhaite, c'est-à-dire que celui-ci a le choix de se relocaliser à un moment aléatoire τ entre 0 et T . Nous considérerons que le propriétaire prend la décision de se relocaliser à l'année n , juste avant que survienne une inondation. Cela implique donc que le pourcentage de dommages X_n est inconnu et aléatoire à $\tau = n$. Nous ferons l'hypothèse que cette décision sera basée essentiellement sur l'expérience passée du risque d'inondation jusqu'à $\tau = n$, c'est-à-dire sur les montants de sinistres passés noté $\mathcal{F}_n = \{X_1, \dots, X_{n-1}\}$ et non sur les dommages futurs. Nous supposons de plus, que la valeur de la propriété demeure constante sur l'horizon temporel car elle est remise en état après chaque inondation avec des fonds financés à 90 % par le gouvernement du Québec, en vertu du Programme général d'indemnisation et d'aide financière lors de sinistres réels ou imminents. Le propriétaire assume donc un montant correspondant à 10% des dommages à chaque inondation. À l'année n , le propriétaire a le choix de se relocaliser et recevoir une allocation de départ P_n ou de rester dans sa propriété et d'assumer 10% des dommages X_n . S'il opte pour la relocalisation à l'année n , le profit Z_n sera défini comme la différence entre l'allocation de départ reçue et la valeur de sa propriété, c'est-à-dire,

$$Z_n = P_n - \ell.$$

Nous supposons que le propriétaire dispose d'une épargne d'un montant initial ω_0 dont il se sert pour payer les 10% des dommages qui sont à sa charge. Le solde du compte à l'année n correspond à la différence entre le solde initial et le

montant cumulatif de la portion des dommages payés par celui-ci jusqu'à l'année n , c'est-à-dire,

$$\omega_n = \omega_0 - 10\% \sum_{k=1}^{n-1} \ell X_k.$$

La richesse totale du propriétaire est donc,

$$\Omega_n = Z_n + \omega_n = P_n + \omega_0 - \ell - 10\% \sum_{k=1}^{n-1} \ell X_k.$$

La richesse du propriétaire à une date donnée est donc une variable aléatoire dont nous pouvons représenter l'évolution dans le temps comme une suite de variables aléatoires $(\Omega_n)_{n \in \mathbb{N}}$. Le propriétaire prendra la décision de se relocaliser au moment aléatoire τ^* où l'utilité espérée de sa richesse étant donné l'information dont il dispose jusqu'à l'année n , sera maximal, c'est-à-dire,

$$\tau^* = \operatorname{argmax}_n \mathbb{E}[u(\Omega_{n+1}) | \mathcal{F}_n].$$

La variable aléatoire τ désignant le moment de la relocalisation représente un temps d'arrêt pour le processus $u((\Omega_n))_{n \in \mathbb{N}}$. Notre objectif sera donc de déterminer le temps d'arrêt optimal τ^* tel que,

$$\mathbb{E}[u(\Omega_{\tau^*+1}) | \mathcal{F}_{\tau^*}] < u(\Omega_{\tau^*}).$$

3.3.1 Décision optimale, cas de l'allocation de départ fixe

Dans cette section, nous analyserons la situation dans laquelle le propriétaire a le choix à chaque année n , de partir et recevoir une allocation fixe, c'est-à-dire $P_n = P$, pour tout $n = 0, \dots, T$, ou de faire face au risque d'inondation et assumer un montant de dommages aléatoires. Dans ce cas, la richesse à l'année n est donnée par,

$$\Omega_n = P + \omega_0 - \ell - 10\% \sum_{k=1}^{n-1} \ell X_k.$$

La suite de variables aléatoires $(\Omega_n)_{n \in \mathbb{N}}$, est telle que,

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[\Omega_{n+1} | \mathcal{F}_n] &= \mathbb{E} \left[P + \omega_0 - \ell - 10\% \sum_{k=1}^n \ell X_k | \mathcal{F}_n \right] \\ &= \Omega_n - 10\% \ell (\mathbb{E}[X_n | \mathcal{F}_n]) \\ &\leq \Omega_n, \quad \text{pour tout } n \in \mathbb{N}. \end{aligned}$$

Et par conséquent le processus de richesse $(\Omega_n)_{n \in \mathbb{N}}$ est une surmartingale. Donc la suite de variables aléatoire $(u(\Omega_n))_{n \in \mathbb{N}}$ représentant l'évolution de l'utilité du profit à la suite de la relocalisation, est une surmartingale, quelque soit le degré d'aversion pour le risque du propriétaire, d'après la proposition 1.2.1 car la fonction d'utilité d'un individu avers au risque est concave et croissante. Le temps d'arrêt optimal, c'est-à-dire le moment où la relocalisation maximise l'utilité espérée du profit est donc trivial. En effet, par la proposition 1.2.3, nous avons $\tau^* = 0$. La décision de reporter la relocalisation n'est donc pas optimale puisque le processus d'utilité de la richesse est décroissant en moyenne. Ainsi, la relocalisation immédiate s'avère optimale lorsque l'allocation de départ offerte est fixe quelque soit le moment de la relocalisation.

3.3.2 Décision optimale, cas de l'allocation de départ réduite

Dans cette section nous nous intéressons à la situation dans laquelle l'allocation de départ offerte est réduite du montant cumulatif de l'aide financière accordée jusqu'à l'année de la relocalisation. L'allocation de départ P_n offerte à l'année n est donc,

$$P_n = P - 90\% \sum_{k=1}^{n-1} \ell X_k - \ell.$$

La richesse aléatoire du propriétaire qui accepte de se relocaliser à l'année n , notée

Ω_n , correspond ce cas à,

$$\Omega_n = P_n + \omega_n = P - 90\% \sum_{k=1}^{n-1} \ell X_k - \ell + \omega_0 - 10\% \sum_{k=1}^{n-1} \ell X_k,$$

ce qui revient après quelques manipulations algébriques à,

$$\Omega_n = P - \ell + \omega_0 - \sum_{k=1}^{n-1} \ell X_k.$$

La suite de variables aléatoires $(Z_n)_{n \in \mathbb{N}}$, est telle que, pour tout $n = 0, \dots, T-1$,

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[\Omega_{n+1} | \mathcal{F}_n] &= \mathbb{E} \left[P - \ell + \omega_0 - \sum_{k=1}^n \ell X_k | \mathcal{F}_n \right] \\ &= \Omega_n - \ell(\mathbb{E}[X_n | \mathcal{F}_n]) \\ &\leq \Omega_n, \quad \text{pour tout } n \in \mathbb{N}. \end{aligned}$$

Le processus de richesse $(\Omega_n)_{n \in \mathbb{N}}$ est par conséquent, une surmartingale par la proposition 1.2.1. Puisque la fonction d'utilité d'un individu avers au risque est croissante et concave, le processus d'utilité de la richesse est également une surmartingale. En vertu de la proposition 1.2.3, nous avons $\tau^* = 0$. Il n'est donc pas optimal pour un individu avers ou neutre au risque de reporter la relocalisation puisque le processus représentant la richesse est décroissant en moyenne. Ainsi, la relocalisation immédiate s'avère optimale pour le propriétaire, peu importe son degré d'aversion pour le risque, lorsque l'allocation de départ offerte est réduite de l'aide financière accordée jusqu'à la date de la relocalisation. En effet, si le montant de l'allocation de départ est réduit du montant cumulé des aides financières reçues alors cela signifie que le propriétaire assume la totalité des dommages avant qu'il ne décide de se relocaliser.

3.4 Discussion

L'instauration de la limite d'indemnisation ouvre le débat sur la lassitude que la société éprouve à payer continuellement pour des dommages résultants de choix

volontaires ou non d'individus d'habiter dans des zones inondables . En fixant une limite d'indemnisation, le gouvernement a sans doute pour objectif de responsabiliser le citoyen et l'inciter à prendre des mesures durables, mais elle peut engendrer un stress financier important qui pourraient être la source d'autres maux dont la société ne peut se désengager. La décision de rester et assumer les dommages futurs est complexe, surtout dans le contexte où elle nécessite une analyse rigoureuse dont le citoyen n'a pas les moyens et connaissances techniques. Il est donc primordial de trouver un bon équilibre entre l'incitation à la relocalisation et la précarité financière des propriétaires. Comme nous l'avons montré, tout programme de relocalisation dans lequel le sinistré subit des pertes jusqu'au moment permis de la relocalisation est sous-optimal. La relocalisation conditionnelle à l'atteinte d'une limite, proposée par le gouvernement du Québec, n'est pas optimale pour les propriétaires dans la mesure où une partie des dommages reste à leur charge. La relocalisation devrait donc être offerte à tous les citoyens en zone inondable le plus rapidement possible. Les propriétaires prêts à se relocaliser doivent être accompagnés adéquatement afin de prendre une décision éclairée. Pour ce faire, les gouvernements doivent donc rendre l'information nécessaire à une prise de décision optimale, disponible et compréhensible pour tous les citoyens.

Étant donné que la richesse ne commence à décroître qu'à partir du moment où la propriété subit des pertes, une relocalisation stratégique à la prochaine inondation pourrait être envisagée. En effet, l'expérience d'une catastrophe peut amener les individus à modifier leurs croyances antérieures et à accroître leur perception du risque. Ceci permettrait non seulement d'augmenter l'adhésion à la relocalisation mais aussi d'étaler sa mise en place de manière à cibler les propriétés présentant un niveau de risque élevé. De plus, cette option permettrait au gouvernement de profiter des intérêts générés par l'investissement de l'allocation de départ jusqu'au moment de la relocalisation.

CHAPITRE IV

ASSURANCES D'ÉCHÉANCE UN AN

4.1 Contexte

Dans les chapitres précédents, nous avons analysé la pertinence économique de l'adoption de mesures de gestion du risque visant à réduire la vulnérabilité et l'exposition des propriétés situées dans une zone sujette aux inondations. Selon Meyer et Kunreuther (2017), les individus sont guidés par certains biais cognitifs qui les amènent à sous-estimer le risque et à ne pas adopter les comportements de protection adéquats. Ainsi donc, bien que les mesures s'avèrent économiquement rationnelles ou théoriquement optimales, certains propriétaires refuseront la relocalisation ou seront réticents à investir des montants élevés dans le but de potentiellement réduire des dommages futurs sur le long terme. De plus, même dans le cas où les individus adoptent des mesures visant à réduire le risque, tout en restant dans la zone inondable, il subsistera un risque résiduel non négligeable qui pourrait potentiellement augmenter du fait des changements climatiques. D'où l'importance du rôle de l'assurance qui, selon Botzen et van den Bergh (2012), permettrait de mutualiser le risque, réduire le stress des populations riveraines, et accélérer le processus de rétablissement après une inondation.

Dans ce chapitre, nous nous intéresserons donc à l'assurance en tant qu'outil de gestion de risque permettant de réduire l'impact financier de l'occurrence d'une

inondation. En effet, l'assurance est un mécanisme par lequel un individu transfère un risque en totalité ou en partie à un assureur, moyennant le paiement d'une prime fixe. Le propriétaire qui contracte une assurance ne sera donc plus soumis au stress lié à des dommages incertains, pouvant survenir à des moments aléatoires. L'assureur assumera la totalité ou une partie du risque selon le type de contrat souscrit. Nous nous intéresserons à trois types de contrats assez communs en assurance de dommages, soit la pleine assurance, le contrat avec un déductible et le contrat avec une limite d'indemnisation. Nous déterminerons d'une part la prime et au chargement de sécurité maximal selon l'aversion pour le risque du propriétaire pour des contrats typiques en utilisant le modèle simplifié d'estimation des dommages présenté au chapitre 2. Nous tenterons d'autre part, de trouver le contrat optimal pour un propriétaire avec un degré d'aversion et un niveau d'épargne donné, c'est-à-dire le déductible ou la limite qui maximise l'utilité de sa richesse.

4.2 Assurance complète

Nous nous situons dans le contexte où le propriétaire possède une résidence d'une valeur ℓ susceptible de subir des dommages annuels estimés à $100X\%$ de sa valeur en cas d'inondation. De plus, la probabilité qu'une inondation survienne est de p . La richesse initiale du propriétaire avant la souscription à la police d'assurance est donc,

$$\Omega = \omega + \ell - \ell X = \omega + \ell(1 - X).$$

La souscription à une police d'assurance complète permet au propriétaire de transférer tout le risque à un assureur qui s'engage à verser une indemnité ℓX correspondant à la totalité des dommages en cas d'inondation. Le propriétaire en échange, paie une prime fixe π qui est déterminée en fonction du niveau de risque

de la propriété. Cette prime est composée de la prime pure encore appelée prime actuarielle qui correspond au prix du risque et d'un chargement de sécurité.

La prime pure est le montant dont doit disposer l'assureur pour dédommager, en moyenne, les assurés touchés par les inondations, sans excédent ni déficit. Cette prime correspond aux dommages moyens c'est-à-dire,

$$PP = \ell \, E[X].$$

Dans le cadre de notre analyse, le pourcentage de dommages que subirait la propriété en cas d'inondation, est modélisé par une variable aléatoire distribuée selon une loi bêta dont les paramètres α et β dépendent de la vulnérabilité de la propriété. Si nous désignons par I la variable indicatrice de l'occurrence d'une inondation, alors le pourcentage de dommages moyens est donc,

$$\begin{aligned} E[X] &= E[E[X|I]] \\ &= p \, E[X|I = 1] + (1 - p) \, E[X|I = 0] \\ &= p \, \frac{\alpha}{\alpha + \beta}. \end{aligned}$$

Ainsi la prime pure pour une propriété d'une valeur de ℓ \$ ayant une probabilité annuelle p de subir une inondation est alors,

$$PP = p \ell \, \frac{\alpha}{\alpha + \beta}.$$

Le tableau 5.1 nous donne le montant de la prime pure annuelle, pour une propriété d'une valeur de 400 000\$, selon la vulnérabilité et la récurrence des inondations. On remarque que les niveaux de prime pure sont très élevés pour des propriétés situées dans les zones de récurrence 2 ans et 20 ans, ce qui pourrait rendre l'assurance inabordable dans ces zones.

Récurrence	Niveau de vulnérabilité	Prime pure	Pourcentage de la valeur
2 ans	Faible	12 500	3.125%
	Moyenne	40 000	10%
	Élevée	80 000	20%
20 ans	Faible	1 250	0.3125%
	Moyenne	4 000	1%
	Élevée	8 000	2%
100 ans	Faible	250	0.0625%
	Moyenne	800	0.2%
	Élevée	1 600	0.4%
350 ans	Faible	72	0.018%
	Moyenne	229	0.05725%
	Élevée	458	0.11425%

TABLEAU 4.1 Prime pure pour une propriété de 400 000\$

Comme mentionné plus haut, la prime pure ne correspond pas à la prime payée par l'assuré, puisque l'assureur fait face à des frais de fonctionnement et à des fluctuations des indemnisations dues à la volatilité des sinistres. L'assureur rajoute donc une marge, appelée chargement de sécurité, au montant à la prime pure afin de couvrir ces frais. Le chargement de sécurité permet également à l'assureur de minimiser son risque d'insolvabilité et de dégager un profit. Considérons que le chargement de sécurité correspond à un pourcentage de la prime pure que nous noterons θ . Ainsi, la prime payée pour une assurance d'une échéance d'un an dont l'indemnité correspond à la totalité des dommages est donc,

$$\pi = (1 + \theta) PP = p \ell \frac{\alpha}{\alpha + \beta} (1 + \theta).$$

L'action de souscrire à une police d'assurance, permet au propriétaire, s'il opte pour la pleine assurance, de transformer sa richesse initiale incertaine Ω en une

richesse finale certaine $W = \omega + \ell - \pi$.

Conformément à l'hypothèse que les agents choisissent toujours l'action qui maximise leur utilité, le propriétaire préférerait souscrire à une police d'assurance au lieu d'assumer le risque, si l'utilité de sa richesse lorsqu'il souscrit à une police d'assurance est supérieure à celle sans assurance. Il est donc nécessaire que le chargement de sécurité θ soit tel que,

$$E[u(W)] > E[u(\Omega)].$$

L'objectif de cette section est de déterminer, le chargement de sécurité maximal $\theta^{\max}$ qui pourrait être appliqué de sorte que l'assurance soit préférable au statu quo. $\theta^{\max}$ est donc tel que le propriétaire est indifférent entre souscrire à une police d'assurance ou non, c'est-à-dire,

$$E[u(W)] = E[u(\Omega)],$$

ce qui est équivalent après quelques manipulations algébriques à,

$$\theta^{\max} = \frac{(\alpha + \beta) \left(\omega + \ell - ((1 - \gamma) E[u(\Omega)])^{(1/1-\gamma)} \right)}{p \ell \alpha} - 1. \quad (4.1)$$

Comme nous pouvons le remarquer avec l'équation 4.1, le chargement de sécurité maximal dépend du niveau de risque de la propriété, de l'aversion pour le risque du propriétaire ainsi que de l'épargne dont il dispose. Nous analyserons donc, dans les prochaines sections, l'effet de ces paramètres sur le chargement de sécurité maximal que le propriétaire serait prêt à accepter.

4.2.1 Effet de l'épargne sur le chargement de sécurité

Dans cette section nous nous intéresserons à la manière dont l'épargne du propriétaire affecte le chargement de sécurité maximal. Le graphique 4.1 présente le

chargement de sécurité maximal que le propriétaire serait prêt à accepter selon l'épargne dont il dispose pour quatre niveaux de risque. Ce graphique montre que plus le propriétaire a un niveau d'épargne élevé, plus bas est le chargement de sécurité qu'il sera prêt à accepter. En d'autres mots, le seuil de chargement de sécurité au-delà duquel les propriétaires refuseront de s'assurer est plus bas chez les propriétaires ayant de l'épargne comparativement à ceux qui n'en ont pas. Ceci s'expliquerait par le fait que les propriétaires ayant un niveau d'épargne élevé sont capables d'assumer une part plus importante du risque que ceux ayant moins d'épargne.

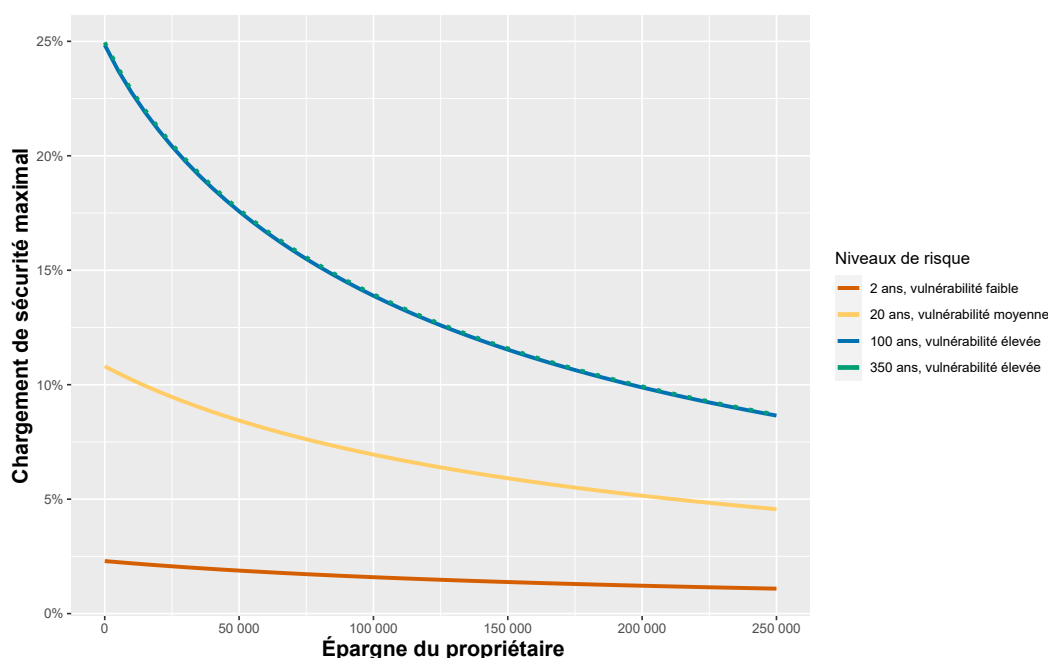


FIGURE 4.1 Chargement de sécurité maximal selon l'épargne du propriétaire

4.2.2 Effet du degré d'aversion au risque et de la vulnérabilité sur le chargement de sécurité

Le graphique 5.1 présente le chargement de sécurité maximal que l'assureur pourrait appliquer selon le degré d'aversion pour le risque du propriétaire. Nous pou-

vons voir à la lumière de ce graphique que le chargement de sécurité maximal augmente avec le degré d'aversion pour le risque. En d'autres termes, plus un individu est avers au risque, plus le montant qu'il est disposé à payer afin de transférer le risque est important. Le graphique 5.1 montre également que ce chargement de sécurité maximal est très bas, pour les propriétés à haut niveau de risque, soit de moins de 60%, même pour des niveaux d'aversion pour le risque élevés. Ceci pourrait expliquer le fait que l'assurance ne soit pas offerte pour ces propriétés étant donné qu'il y a un fort potentiel d'indemnisation, mais une marge de sécurité relativement faible. En revanche, il serait tout à fait possible d'offrir l'assurance aux propriétés dans la zone de récurrence 100 ans et dans la zone de récurrence 20 ans lorsque la propriété est à faible vulnérabilité. En effet, la prime actuarielle présentée dans le tableau 4.1 pour ces propriétés est relativement abordable. De plus, il y a la possibilité pour l'assureur d'appliquer un chargement de sécurité plus élevé.

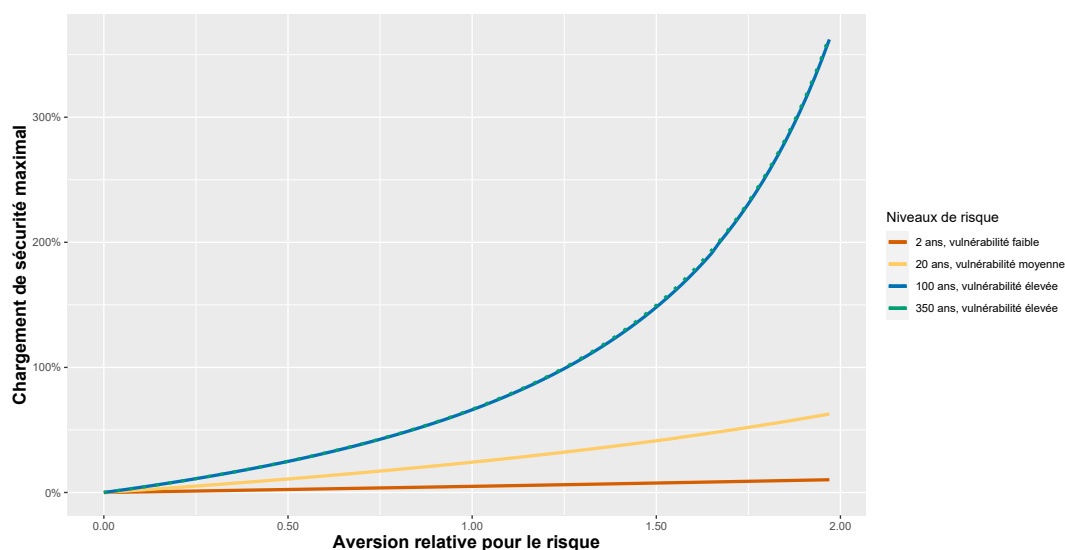


FIGURE 4.2 Chargement de sécurité maximal selon l'aversion

Remarquons qu'un propriétaire neutre au risque n'opterait pour une couverture

totale que si la prime π correspond à la prime actuarielle. Dans le cas où un chargement de sécurité est appliqué à la prime, les individus neutres au risque n'opteraient pas pour une couverture d'assurance complète, mais pour une couverture partielle. Quant aux individus ayant de l'aversion pour le risque, ils se couvriraient totalement s'ils paient la prime actuarielle ou si le chargement de sécurité est en dessous du chargement de sécurité maximal. Lorsque le chargement de sécurité appliqué par l'assureur est au-delà du chargement de sécurité maximal, les individus avers au risque opteraient pour une couverture partielle.

L'assurance complète n'étant pas la meilleure option pour tous les propriétaires, nous aborderons dans les sections suivantes, les contrats de couverture partielle que sont les contrats avec un déductible et les contrats avec une limite d'indemnisation.

4.3 Contrat d'assurance avec un déductible

4.3.1 Prime et chargement de sécurité maximal

Un déductible se définit comme le montant d qui reste à la charge de l'assuré en cas de sinistre. Un contrat avec déductible se caractérise donc par le fait que l'indemnité en cas d'inondation est égale à la différence entre le montant des dommages et le déductible, lorsque les dommages excèdent le déductible. L'assuré ne reçoit donc aucune indemnité lorsque le montant des dommages est inférieur au déductible. L'indemnité payée par l'assureur, en cas d'inondation, peut donc être définie comme,

$$(\ell X - d)_+ = \max \{0, \ell X - d\}.$$

Si l'assuré choisit un contrat avec un déductible d , l'assureur lui chargera une prime $\pi^d = (1 + \theta)PP^d$, qui correspond à l'espérance de l'indemnité majorée du

chargement de sécurité θ . La prime pure étant donnée par,

$$PP^d = p \, E[(\ell X - d)_+] = p \, \ell \int_{d/\ell}^1 \left(x - \frac{d}{\ell}\right) f(x) dx,$$

où f désigne la fonction de densité de $X \sim \text{bêta}(\alpha, \beta)$.

Récurrence	Vulnérabilité	Deductible en \$				
		1 000	2 000	5 000	25 000	50 000
2 ans	Faible	12 009	11 357	10 221	4 451	1 476
	Moyenne	39 502	39 010	35 562	28 968	20 516
	Élevée	79 501	79 004	77 523	68 080	57 294
20 ans	Faible	1 201	1 154	1 022	445	148
	Moyenne	3 950	3 901	3 756	2 897	2 052
	Élevée	7 950	7 900	7 725	6 808	5 729
100 ans	Faible	240	231	204	89	30
	Moyenne	790	470	751	579	410
	Élevée	1 590	1 580	1 550	1 362	1 146
350 ans	Faible	69	66	59	26	9
	Moyenne	226	223	215	166	117
	Élevée	455	452	443	389	328

TABLEAU 4.2 Prime pure pour un contrat d'assurance avec deductible

Le tableau 4.2 donne un aperçu des niveaux de prime pure pour des contrats avec un deductible de 1 000, 2 000, 5 000, 25 000 et 50 000\$. Les primes pour un contrat avec deductible sont plus basses que celle du contrat de pleine assurance. Mais elles demeurent assez élevées pour les propriétés à haut risque sauf si l'assuré opte pour des montants de deductible relativement élevés. Pareillement au cas de la pleine assurance, le chargement de sécurité que l'assureur peut appliquer augmente avec le degré d'aversion pour le risque du propriétaire lorsque le contrat comporte un

déductible. De même, le chargement de sécurité maximal décroît avec le niveau d'épargne de l'assuré.

4.3.2 Déductible optimal

Nous avons fait l'hypothèse que les propriétaires prennent toujours les décisions de sorte à maximiser l'utilité espérée de leurs richesses. Le propriétaire qui souscrit à une police d'assurance avec un déductible d , transforme sa richesse aléatoire Ω en une richesse également aléatoire W telle que,

$$W(d) = \begin{cases} W_1 = \omega + \ell - \pi^d & \text{si } I = 0 \\ W_2 = \omega + \ell - \pi^d - \ell X & \text{si } I = 1 \text{ et } \ell X \leq d \\ W_3 = \omega + \ell - \pi^d - d & \text{si } I = 1 \text{ et } \ell X > d. \end{cases}$$

où I est la variable indicatrice d'occurrence d'inondation.

Nous nous intéresserons à déterminer le déductible optimal d^* qui maximise l'utilité espérée de la richesse, c'est-à-dire qui est tel que,

$$\mathbb{E}[u(W(d^*))] = \max_{0 \leq d \leq \ell} \mathbb{E}[u(W(d))].$$

L'utilité espérée de la richesse d'un assuré qui opte pour un contrat d'assurance avec un déductible d est donc,

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[u(W(d))] &= \mathbb{E}[\mathbb{E}[u(W(d))|I]] \\ &= p \mathbb{E}[u(W(d))|I = 1] + (1 - p) \mathbb{E}[u(W(d))|I = 0] \\ &= (1 - p)u(W_1) + p \left[u(W_2) \mathbb{P}(X > d/\ell) + \int_0^{d/\ell} u(W_3) f(x) dx \right]. \end{aligned}$$

L'optimisation numérique de l'utilité espérée de la richesse $\mathbb{E}[u(W(d))]$ montre que le déductible optimal d^* dépend du niveau de risque, de l'aversion pour le risque

et du chargement de sécurité appliqué par l'assureur. Les résultats présentés à la figure 4.3 montrent le déductible optimal selon le chargement de sécurité appliqué par l'assureur pour quatre niveaux de risque et cinq niveaux d'aversion au risque.

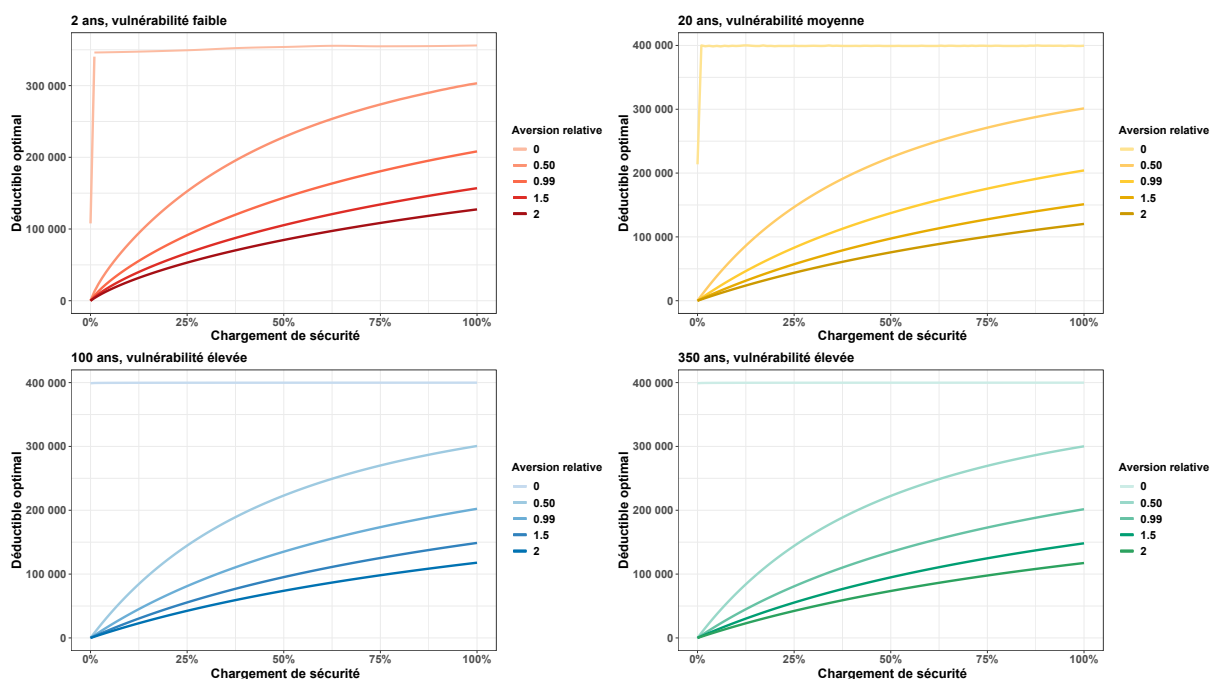


FIGURE 4.3 Déductible optimal selon le chargement de sécurité

Nous observons que le déductible optimal décroît avec le degré d'aversion pour le risque, lorsque tous les autres paramètres sont fixés. Ainsi, il serait optimal pour les individus ayant une aversion pour le risque plus marquée d'opter pour un contrat avec un déductible moins élevé donc une couverture d'assurance plus grande que ceux dont l'aversion pour le risque est plus faible. Quant aux individus neutres au risque, ils préféreront ne pas s'assurer lorsque l'assureur applique un chargement de sécurité à la prime pure.

Le graphique montre aussi que pour les individus ayant de l'aversion pour le risque,

le déductible optimal est nul seulement si le chargement de sécurité est nul. Un déductible nul signifie que le propriétaire opte pour la pleine assurance. Il n'est donc optimal pour un riscophobe d'opter pour la pleine assurance que si la prime payée est actuarielle. Si l'assureur ajoute un chargement de sécurité, le propriétaire riscophobe choisira un déductible optimal non nul. Ce qui est en accord avec le résultat démontré par Arrow (1963) qui stipule que si la prime demandée par l'assureur comporte un chargement de sécurité proportionnel à la prime actuarielle, alors le contrat avec un déductible est optimal pour les agents riscophobes. L'augmentation du chargement de sécurité fait augmenter le montant du déductible optimal. Pour un chargement de sécurité trop élevé, le déductible optimal serait égal à la valeur de la propriété, c'est-à-dire que le propriétaire pourrait éventuellement choisir de ne pas s'assurer si l'assureur applique un chargement de sécurité trop élevé.

Nous remarquons également que les déductibles optimaux sont très élevés. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que les primes basées sur le risque sont élevées. L'assuré s'assurerait donc uniquement dans l'éventualité où des dommages catastrophiques surviendraient. Il choisirait ainsi d'assumer une partie plus importante du risque en échange d'une réduction de prime considérable.

4.4 Contrat d'assurance avec une limite d'indemnisation

4.4.1 Prime et chargement de sécurité maximal

La limite se définit comme le montant d'indemnité maximal L que l'assureur verserait à l'assuré en cas de sinistre. Dans un contrat avec une limite, l'assureur s'engage à verser le montant total des dommages jusqu'à concurrence de $L\$$. L'excédent des dommages au-delà de la limite reste à la charge de l'assuré. L'indemnité

payée par l'assureur, lorsqu'une inondation survient est donc définie comme,

$$\ell X \wedge L = \min\{L, \ell X\}.$$

Si l'assuré choisit une limite L , l'assureur lui chargera une prime $\pi^L = (1+\theta)PP^L$, qui correspond à l'espérance de l'indemnité majorée du chargement de sécurité θ .

On a,

$$PP^L = E[\ell X \wedge L] = p \ell \int_0^{L/\ell} x f(x) dx + p L P \left(X > \frac{L}{\ell} \right),$$

où f désigne la fonction de densité de $X \sim \text{bêta}(\alpha, \beta)$.

Le tableau 4.3 donne un aperçu des niveaux de prime pure pour des contrats avec une limite de 100 000, 200 000 et 300 000\$.

Récurrence	Vulnérabilité	Prime pure		
		$L = 100\ 000$	$L = 200\ 000$	$L = 300\ 000$
2 ans	Faible	12 375	12 500	12 500
	Moyenne	30 508	38 750	39 961
	Élevée	41 029	65 858	77 500
20 ans	Faible	1 237	1 250	1 250
	Moyenne	3 051	3 875	3 996
	Élevée	4 103	6 586	7 750
100 ans	Faible	247	250	250
	Moyenne	610	775	799
	Élevée	821	1 317	1 550
350 ans	Faible	71	72	72
	Moyenne	174	221	228
	Élevée	234	376	443

TABLEAU 4.3 Prime pure pour un contrat d'assurance avec une limite de L \$

4.4.2 Limite optimale

L'assuré a pour objectif de maximiser l'utilité espérée de sa richesse. Il choisira donc une limite L^* qui est telle que,

$$E[u(W(L^*))] = \max_{0 \leq L \leq \ell} E[u(W(L))].$$

Nous déterminerons la limite optimale qui maximise l'utilité de la richesse $W(L)$ du propriétaire qui souscrit à une police d'assurance avec une limite L . En effet, celui-ci transforme sa richesse aléatoire Ω en une richesse également aléatoire $W(L)$ telle que,

$$W(L) = \begin{cases} W_1 = \omega + \ell - \pi^L & \text{si } I = 0 \text{ ou } I = 1 \text{ et } \ell X \leq L \\ W_2 = \omega + \ell - \pi^L - \ell X + L & \text{si } I = 1 \text{ et } \ell X > L. \end{cases}$$

L'utilité espérée de la richesse d'un assuré qui opte pour un contrat d'assurance avec une limite L est donnée par,

$$\begin{aligned} E[u(W(L))] &= E[E[u(W(L))|I]] \\ &= (1-p) E[u(W(L))|I=0] + p E[u(W(L))|I=1] \\ &= [(1-p) + p P(\ell X \leq L)] u(W_1) + p \int_{L/\ell}^1 u(W_2) f(x) dx. \end{aligned}$$

L'optimisation numérique de l'utilité espérée de la richesse $E[u(W(L))]$ montre que la limite optimale L^* dépend du niveau de risque, de l'aversion pour le risque et du chargement de sécurité appliqué par l'assureur. Les résultats présentés à la figure 4.4 montrent la limite optimale selon le chargement de sécurité appliqué par l'assureur pour quatre niveaux de risque et cinq niveaux d'aversion pour le risque.

Nous remarquons que la limite optimale L^* dépend du niveau de risque, de l'aversion pour le risque, du chargement de sécurité. La limite optimale est très élevée lorsque l'assureur applique un chargement de sécurité faible, mais décroît assez rapidement lorsque le niveau de chargement augmente. Elle devient même nulle lorsque l'assureur applique un chargement de sécurité élevé, ce qui signifie que l'assuré préférerait ne pas s'assurer. Le seuil de chargement pour lequel l'assuré préférerait ne pas s'assurer dépend du niveau de risque de la propriété. Il est de moins de 8% pour les propriétés dans la zone de récurrence deux ans. Ce qui est trop bas pour permettre à l'assureur de couvrir les frais de fonctionnement. Pour les propriétés dans la zone de récurrence 20 ans et plus, l'aversion pour le risque influence grandement le choix de la limite optimale, comme le montre le graphique 4.4.

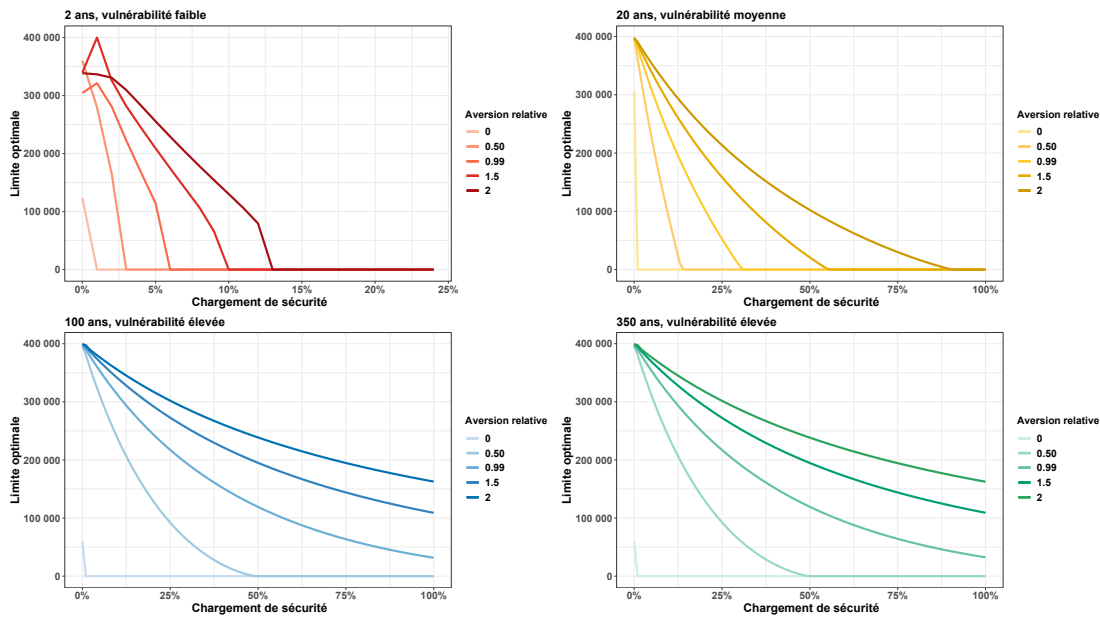


FIGURE 4.4 Limite optimale selon le chargement de sécurité

4.5 Discussion

Les résultats présentés dans ce chapitre montrent que les primes d'assurance sont élevées pour les propriétés à haut risque, ce qui pourrait rendre l'assurance inabordable pour ces propriétaires. Toutefois, si elles sont basées sur le risque réel, les primes d'assurance élevées pourraient envoyer un signal de prix qui permettrait d'éveiller les consciences des propriétaires sur le risque d'inondation réel et corriger leur perception (Thistlethwaite, 2020).

Les résultats de l'analyse empirique de la demande d'assurance contre les inondations aux Pays-Bas, en utilisant des méthodes de préférences déclarées, réalisée par Botzen et *al.* (2009), a montré que la perception du risque influence positivement et de manière significative la demande d'assurance contre les inondations. En effet, plus les individus se perçoivent comme à risque, plus ils auront la volonté de prendre des mesures de réduction du risque ou souscrire à une police d'assurance. Cependant, les individus sous-estiment souvent le risque, c'est-à-dire la probabilité d'occurrence et l'ampleur potentielle des dommages liés aux inondations. De ce fait, l'assurance peut sembler peu attrayante, surtout du fait que le niveau de prime basé sur le risque est élevé.

Mais la tarification basée sur le risque aura pour avantage d'envoyer un signal de prix qui permettrait d'éveiller les consciences des propriétaires sur le niveau de risque réel et corriger leur perception, décrit comme l'élément essentiel menant à l'adoption de mesures de réduction du risque comme l'ont souligné Botzen et van den Bergh (2012). L'assurance pourrait ainsi amener les propriétaires à adopter des comportements visant à réduire le risque et pourrait être un outil à utiliser conjointement avec les mesures de réduction du risque, pour une gestion plus efficace du risque d'inondation.

Aussi, un autre aspect limitant l'offre de l'assurance est qu'un nombre important d'assurés, du fait de la myopie, résilient leurs polices d'assurance après plusieurs années sans sinistre. En effet, Michel-Kerjan et Kunreuther (2011) ont analysé 8,9 millions de polices d'assurance émises aux États-Unis dans le cadre du NFIP (*National Flood Insurance Program*) au cours de la période du 1er janvier 2001 au 31 décembre 2009. Leur analyse empirique a montré que la durée médiane durant laquelle les polices restent en vigueur est de 3 à 4 ans. En moyenne, seulement 74% respectivement 36 % des nouvelles polices étaient encore en vigueur un an et 5 ans après la souscription. Ces résultats montrent que le non-renouvellement de contrat est un enjeu significatif qui pourrait rendre les assureurs réticents à offrir les contrats d'assurance inondation dont la tarification nécessite des investissements importants dans l'analyse de risque. Afin de limiter l'annulation de polices et accroître la viabilité de l'assurance inondation, les assureurs devraient comme le suggère Meyer et Kunreuther (2017), analyser davantage la possibilité d'offrir des contrats d'assurance multiannées .

CHAPITRE V

ASSURANCE MULTIANNÉES

5.1 Contexte

Ce chapitre a pour objectif d’analyser la pertinence des contrats d’assurance inondation multiannées. Nous nous intéresserons à la manière dont les contrats d’assurance multiannées peuvent contribuer à accroître la viabilité de l’assurance inondation ainsi que l’implication des assureurs dans la résilience des communautés riveraines. La couverture d’assurance inondation d’échéance $n > 1$ années sera comparée avec la stratégie de couverture consistant à renouveler la police d’un an durant n années, sous l’hypothèse qu’il existe de l’incertitude au renouvellement de ce contrat. En effet, nous considérerons qu’à chaque renouvellement du contrat d’assurance d’échéance d’un an, le propriétaire fait face, au risque de :

- subir une augmentation de prime $100g\%$ à la suite d’une réclamation ou d’une réévaluation du niveau de risque de sa propriété,
- ne plus être assurable à la suite d’un sinistre dont la sévérité dépasse un seuil représentant un pourcentage s de la valeur de la propriété.

En prenant en compte le risque lié au renouvellement d’un contrat d’échéance un an, l’assureur pourra dégager une marge de sécurité plus importante puisqu’un assuré ayant de l’aversion pour le risque serait prêt à payer une prime de risque pour se débarrasser de ce risque additionnel. Notre but sera de quantifier l’im-

pact de l'incertitude au renouvellement sur le chargement de sécurité maximal et déterminer si le chargement de sécurité additionnel est suffisant pour financer un processus d'analyse de risque et de tarification plus précis et/ou des mesures individuelles de réduction du risque.

5.2 Assurance multiannées

Nous nous situons dans le contexte où le propriétaire possède une résidence d'une valeur ℓ susceptible de subir à l'année i , des dommages estimés à $100X_i\%$ de sa valeur en cas d'inondation. Dans le cadre de notre analyse, le pourcentage de dommages X_i est modélisé par une variable aléatoire distribuée selon une loi bêta dont les paramètres α et β dépendent de la vulnérabilité de la propriété. Supposons qu'au cours des n années de couverture, il survient un nombre aléatoire d'inondations représenté par une variable aléatoire N distribuée selon une loi binomiale de paramètres n et p qui désignent respectivement la durée du contrat et la probabilité annuelle d'occurrence d'une inondation. Le montant des dommages totaux anticipés durant les n années de couverture est alors égal à,

$$S = \sum_{i=1}^N \ell X_i.$$

La prime pure pour un contrat d'assurance d'échéance n années qui correspond au montant moyen des dommages potentiels subis par la propriété assurée au cours des n années de couverture est donc,

$$\Pi = E[S] = \ell E[N] E[X_i] = \ell n p \frac{\alpha}{\alpha + \beta}.$$

Si la prime est payable en n versements égaux à chaque année et si on ne tient pas compte des rendements, l'assuré paiera en début d'année,

$$\pi_n = \frac{\Pi}{n}(1 + \theta_n) = \ell p \frac{\alpha}{\alpha + \beta} (1 + \theta_n),$$

qui correspond à la prime pure à laquelle l'assureur applique un chargement de sécurité θ_n .

Lorsque le propriétaire souscrit à une police d'assurance d'une échéance de n années, il s'engage à payer au début de chaque année la prime fixe π_n en échange d'une couverture complète. La richesse à l'année i d'un propriétaire qui bénéficie d'une couverture de n années est donc,

$$W_i^n = \omega_i + \ell - \pi_n, \quad \text{pour } i = 0, \dots, n-1,$$

où ω_i représente l'épargne du propriétaire à l'année i .

L'utilité intertemporelle de la richesse de l'assuré devient dans ce cas,

$$U_n = E \left[\sum_{i=0}^{n-1} \frac{u(\omega_i + \ell - \pi_n)}{(1 + \rho)^i} \right]. \quad (5.1)$$

5.3 Renouvellement d'un contrat d'assurance un an

Considérons à présent la situation dans laquelle l'assuré décide de souscrire à une police d'assurance annuelle et de la renouveler chaque année. Supposons qu'au moment du renouvellement, l'assureur peut décider d'augmenter la prime d'un pourcentage g ou de ne plus offrir de couverture à l'assuré en raison d'une réévaluation du risque ou d'une réclamation importante dont le montant dépasse un certain pourcentage s de la valeur de la propriété. L'assuré fait donc face à un risque lié à l'incertitude des montants annuels consacrés à la gestion des inondations. Ainsi en prenant en compte ce risque, le montant payé par l'assuré à l'année

$i, i = 1, \dots, n$ est une variable aléatoire C_i définie par,

$$C_i = \begin{cases} \pi_n & \text{si } I_1 = I_2 = \dots = I_{i-1} = 0, \\ (1+g)\pi_n & \text{si } \exists k < i \text{ t.q. } I_k = 1 \text{ et } X_k \leq s, \\ \ell X_i & \text{si } \exists k \leq i \text{ t.q. } I_k = 1 \text{ et } X_k > s. \end{cases}$$

La richesse totale du propriétaire à l'année i est donc,

$$W_i^R = \omega_i + \ell - C_i,$$

où ω_i représente l'épargne du propriétaire à l'année i .

L'utilité intertemporelle de la richesse d'un assuré qui choisit de renouveler son contrat d'assurance chaque année est donc,

$$U_R = E \left[\sum_{i=0}^{n-1} \frac{u(\omega_i + \ell - C_i)}{(1+\rho)^i} \right]. \quad (5.2)$$

L'utilité donnée par l'équation 5.2 sera calculée par simulation et permettra d'estimer le chargement de sécurité maximal que l'assureur pourrait appliquer au contrat d'assurance multiannées en tenant compte du risque au renouvellement, avec des valeurs de g et s déterminées par l'assureur.

5.4 Analyse des résultats

5.4.1 Effet du risque au renouvellement sur le chargement de sécurité

Le propriétaire a pour but de maximiser l'utilité intertemporelle de sa richesse. Il souscrira donc à une police d'assurance multiannées d'échéance n années au lieu d'opter pour la stratégie de renouvellement annuel, uniquement lorsque l'assureur applique un chargement θ_n qui est tel que $U_n > U_R$. Autrement dit, le

chargement de sécurité maximal $\theta_n^{\max}$ que l'assureur peut appliquer à la prime pure d'un contrat d'assurance d'échéance n années est tel que l'utilité de souscrire à ce contrat et celle de renouveler la police d'assurance annuelle avec un risque au renouvellement sont égales. La résolution numérique de l'équation $U_n = U_R$ permettra d'obtenir le chargement de sécurité maximal $\theta_n^{\max}$. Nous pourrions ainsi déterminer le chargement de sécurité additionnel, c'est-à-dire la différence entre $\theta_n^{\max}$ et $\theta^{\max}$, le chargement de sécurité maximal pour un contrat multiannées lorsque le risque au renouvellement n'est pas considéré. $\theta^{\max}$ correspond au chargement de sécurité appliqué dans le cas d'une assurance d'échéance un an donné par l'équation 4.1. En effet, lorsqu'on ne considère pas de risque au renouvellement la stratégie qui consiste à renouveler un contrat annuel et celle de souscrire à une couverture multiannées sont équivalentes.

Le tableau 5.1 présente le chargement de sécurité additionnel que l'assureur peut appliquer à la prime pure annuelle pour une couverture d'assurance 5 ans dans le cas d'un propriétaire ayant une aversion relative γ de 0,5. Nous avons considéré que la propriété devient non assurable si elle subit une inondation qui cause des dommages s'élevant à plus de 50 % de sa valeur. Les résultats présentés dans le tableau montrent que l'effet du risque au renouvellement est moindre pour les propriétés dans les zones de faible récurrence (100 ans et 350 ans), car pour celles-ci, il y a moins de risque que la prime augmente ou que la propriété devienne non assurable. En revanche, le chargement de sécurité est très sensible à l'augmentation de la prime à la suite d'un sinistre, pour les propriétés avec un niveau de risque élevé ou modéré. Par exemple pour une propriété à vulnérabilité moyenne dans la zone de récurrence 2 ans, le chargement de sécurité additionnel passe de 5,91% si l'assureur augmente la prime de 10% après le premier sinistre à 29,81% si la prime augmente plutôt de 50%. Ce qui donne en nous référant aux taux de primes pures dans le tableau 4.1, des montants respectifs de 2 364\$ et 11 924\$

pour une propriété d'une valeur de 400 000\$. Les montants additionnels sont non négligeables, mais sont toutefois insuffisants pour financer des mesures de réduction du risque structurelles. Il serait toutefois possible que l'assureur investisse les montants additionnels pour améliorer la connaissance du risque ainsi que le processus d'évaluation de la vulnérabilité des propriétés assurées.

Récurrence	Vulnérabilité	Chargement sans risque au renouvellement	Chargement additionnel pour $s = 50\%$			
			$g = 10\%$	$g = 25\%$	$g = 50\%$	$g = 100\%$
2 ans	Faible	2,39	6,13	15,48	31,08	62,36
	Moyenne	8,02	5,91	14,84	29,81	60,08
	Élevée	17,19	3,82	9,45	19,05	39,24
20 ans	Faible	3,14	0,85	2,32	4,77	9,67
	Moyenne	10,80	11,73	13,21	15,67	20,61
	Élevée	24,22	0,86	1,99	3,88	7,69
100 ans	Faible	3,21	0,07	0,37	0,88	1,90
	Moyenne	11,05	0,19	0,50	1,01	2,04
	Élevée	24,84	0,19	0,43	0,82	1,62
350 ans	Faible	3,09	0,06	0,15	0,29	0,59
	Moyenne	11,09	0,26	0,35	0,50	0,80
	Élevée	24,96	0,24	0,31	0,42	0,65

TABLEAU 5.1 Chargement de sécurité additionnel (en %) pour un contrat d'assurance 5 ans lorsque la prime augmente de g après la première réclamation et que la propriété devient non assurable après un sinistre dont la réclamation excède un seuil s 50% de la valeur de la propriété, pour un propriétaire avec une aversion relative γ de 0,5.

5.4.2 Effet de la durée du contrat sur le chargement de sécurité maximal

Cette section sera consacrée à l'analyse de l'effet de la durée du contrat d'assurance multiannées sur le chargement de sécurité maximal en présence du risque au renouvellement. Le graphique 5.1 présente le chargement de sécurité additionnel que l'assureur pourrait appliquer selon la durée du contrat d'assurance multiannées dans le cas d'un propriétaire ayant une aversion relative γ de 0,5, si la prime augmente de 25% à la première inondation et que la propriété devient non assurable à la suite d'un sinistre dont les dommages s'élèvent à plus de 50% de sa valeur.

À la lumière de ce graphique, nous constatons que lorsqu'on tient compte du risque au renouvellement de la police d'assurance annuelle, le chargement de sécurité augmente avec la durée du contrat. L'assureur disposerait donc d'une plus grande marge de manœuvre lorsque le contrat d'assurance multiannées s'étend sur une longue échéance. Cette augmentation du chargement de sécurité n'est cependant pas homogène et dépend du niveau de risque de la propriété. Elle est plus marquée pour les propriétés à risque élevé ou modéré et relativement faible pour les propriétés à faible risque. Par exemple, le chargement de sécurité pour une propriété à vulnérabilité élevée dans la zone de récurrence 100 ans passe de 24,78% pour un contrat d'assurance 2 ans à 25,86 % pour un contrat d'échéance 10 ans. Tandis que dans le cas d'une propriété à vulnérabilité faible dans la zone de récurrence 2 ans, elle passe 8,68% pour un contrat d'assurance 2 ans à 22,59% lorsque le contrat est d'une échéance de 10 ans. Les contrats d'assurance multiannées ayant de longues échéances contribuent donc à accroître la viabilité de l'assurance inondation en offrant une marge de sécurité plus importante à l'assureur.

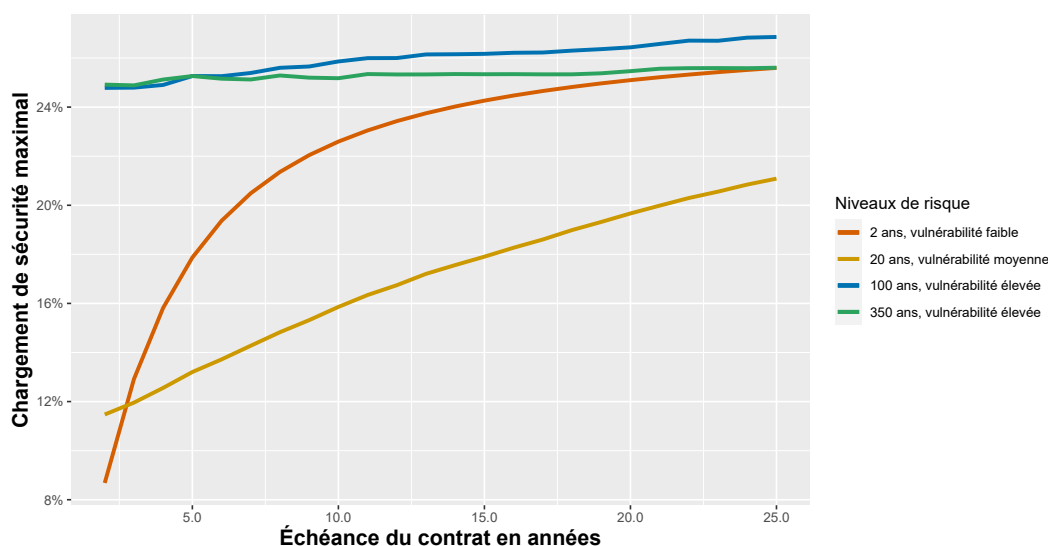


FIGURE 5.1 Chargement de sécurité maximal selon la durée du contrat pour une augmentation de prime g de 25% à la première inondation et un seuil de non-assurabilité après un sinistre dont les dommages excèdent 50% de la valeur de la propriété pour une aversion relative γ de 0.5.

5.4.3 Effet de l'aversion pour le risque sur le chargement de sécurité

Le tableau 5.2 présente le chargement de sécurité additionnel que l'assureur peut appliquer à la prime pure annuelle pour une couverture d'assurance 5 ans dans le cas d'un propriétaire ayant une aversion relative γ de 1,5. Nous avons considéré que la propriété devient non assurable si elle subit une inondation qui cause des dommages s'élevant à plus de 50 % de sa valeur. En comparant les résultats y sont présentés à ceux du 5.1, nous constatons que le niveau d'aversion au risque a une influence majeure sur le chargement de sécurité additionnel. En effet, l'aversion pour le risque vient améliorer considérablement la viabilité de l'assurance inondation multiannées. Prenons le cas d'une propriété à vulnérabilité moyenne dans la zone de récurrence 20 ans avec une police d'assurance dans laquelle la prime augmente de 10% après le premier sinistre. Le chargement de sécurité additionnel

passé de 11,72% pour un assuré avec un niveau d'aversion pour le risque de 0,5 à 42,55 si son niveau d'aversion est de 1,5%. On constate également que l'impact de l'aversion est encore plus marqué pour les propriétés dans les zones de faible récurrence.

Récurrence	Vulnérabilité	Chargement sans risque au renouvellement	Chargement additionnel pour $s = 50\%$			
			$g = 10\%$	$g = 25\%$	$g = 50\%$	$g = 100\%$
2 ans	Faible	7,23	13,76	23,58	40,02	73,14
	Moyenne	28,88	35,98	46,77	65,13	103,36
	Élevée	80	86,17	95,59	113,57	162,77
20 ans	Faible	9,62	10,67	12,23	14,84	20,07
	Moyenne	41,34	42,55	44,44	47,60	53,98
	Élevée	140,93	142,63	144,86	148,62	156,34
100 ans	Faible	9,84	10,05	10,38	10,92	12
	Moyenne	42,58	42,89	43,29	43,95	45,27
	Élevée	148,13	148,83	149,30	150,09	151,69
350 ans	Faible	9,88	9,94	1,03	10,19	10,51
	Moyenne	42,78	43,17	43,29	43,48	43,86
	Élevée	149,47	150,35	150,49	150,72	151,18

TABLEAU 5.2 Chargement de sécurité additionnel (en %) pour un contrat d'assurance 5 ans lorsque la prime augmente de g après la première réclamation et que la propriété devient non assurable après un sinistre dont la réclamation excède un seuil s 50% de la valeur de la propriété, pour un propriétaire avec une aversion relative γ de 1.5.

5.5 Discussion

Les résultats présentés dans ce chapitre montrent que les contrats d'assurance multiannées représentent une option intéressante qui permettrait d'améliorer la

viabilité de l'assurance inondation. Ils permettent en effet de dégager une marge de sécurité plus importante pour l'assureur et offrent le bénéfice d'une diversification temporelle dans la gestion des risques financiers.

L'un des objectifs de ce chapitre était d'évaluer si la marge de sécurité additionnelle serait assez élevée pour permettre à l'assureur de financer des mesures de réduction du risque. Toutefois il appert que l'assureur seul ne peut pas supporter une partie significative des coûts des mesures de réduction du risque même si le contrat est d'une très longue durée. Les marges additionnelles pour les propriétés à risque élevé sont élevées, mais en général insuffisantes pour financer des mesures de réduction du risque non structurelles et peu coûteuses, sauf pour des niveaux d'aversion pour le risque assez élevés. Toutefois, le chargement de sécurité additionnel lié à la prise en compte du risque au renouvellement des contrats annuels pourrait en théorie permettre à l'assureur d'améliorer la connaissance du risque par exemple en investissant dans l'élaboration de cartes d'inondation ou grâce à la mise en place d'un système de certification administré par un organisme indépendant. Ce système accorderait à la suite d'inspections périodiques des propriétés, une « cote de risque » selon les mesures de réduction mise en place par l'assuré pour réduire la vulnérabilité et l'exposition de sa propriété. Une amélioration de la « cote de risque » lors de ces inspections pourrait donner lieu à des réductions de primes dans le but d'inciter les propriétaires à adopter des comportements visant à réduire le risque.

Des contrats d'assurance inondation multiannées ne sont pas encore offerts par les assureurs selon nos connaissances. Toutefois, d'un point de vue microéconomique, ces contrats sont plus viables du fait que la prise en compte d'un risque additionnel au renouvellement du contrat annuel justifierait le paiement d'une prime de risque plus importante. La propension à payer une prime plus élevée se traduirait par une augmentation du chargement de sécurité et améliorerait la viabilité de l'as-

surance inondation. Une analyse plus approfondie de l'impact réel de l'assurance inondation multiannées sur la stabilité à long terme des assureurs est nécessaire pour vérifier les hypothèses énoncées plus haut, mais hors de contexte pour ce mémoire.

CONCLUSION

Ce mémoire visait à analyser d'un point de vue mathématique la rationalité du choix d'un propriétaire de rester, relocaliser, immuniser ou assurer sa propriété, sous la perspective de la théorie microéconomique des choix en situation d'incertitude afin de proposer des pistes d'amélioration des outils et programmes de gestion de risque d'inondation.

L'analyse coûts-avantages (ACA) est une approche largement utilisée pour évaluer la pertinence économique d'options d'adaptation au risque d'inondation. Elle consiste à comparer les coûts estimés de la mise en place des mesures de mitigation avec les bénéfices anticipés sur un horizon temporel donné. Dans le cadre d'une ACA, on considère les dommages annuels moyens (DAM) comme le coût des inondations qui devraient se produire chaque année, en moyenne sur le long terme. La décision d'adopter une mesure ou non est basée sur la valeur actuelle nette (VAN) moyenne.

Cependant, la moyenne a comme défaut d'accorder plus d'importance aux pertes mineures qui se produisent fréquemment et peu de poids aux pertes catastrophiques lors d'événements majeurs. Ainsi l'utilisation de la VAN moyenne masque les impacts financiers catastrophiques des événements à faible probabilité d'occurrence. Or lorsqu'on évalue la mise en place de mesures de mitigation à une échelle locale où le risque d'inondation n'est pas diversifiable, l'accent devrait être mis sur la gestion des extrêmes qui pourraient engendrer des coûts potentiellement catastrophiques. Il s'avère donc pertinent d'utiliser une approche actuarielle qui permet de quantifier la variabilité des dommages futurs et de renforcer la robus-

tesse de la prise de décision grâce à l'analyse de la distribution de probabilité des principaux indicateurs de performance tels que la VAN afin de mettre en lumière les impacts des scénarios catastrophiques

Les options d'adaptation ou de réduction du risque sont en général analysées d'un point de vue collectif. Toutefois, le choix de rester, relocaliser, immuniser sa propriété ou souscrire à un contrat d'assurance est souvent une décision individuelle et volontaire. Il est donc important de comprendre l'influence de facteurs propres à l'individu sur sa décision, dans le but non seulement de mieux outiller et accompagner les propriétaires, mais de bâtir des programmes de relocalisation et d'aide financière favorisant leur adhésion.

Nous avons montré au chapitre 2 que d'un point de vue microéconomique, il est optimal pour un propriétaire neutre au risque d'accepter comme allocation de départ minimale, la valeur de sa propriété moins la valeur actualisée des dommages totaux anticipés sur son horizon de planification. Le montant minimal acceptable décroît lorsque le degré d'aversion pour le risque de l'individu augmente. Il croît avec la valeur de la propriété et décroît avec son niveau de risque. De même, le montant maximal qu'un propriétaire serait disposé à investir dans une mesure de réduction du risque augmente avec son degré d'aversion pour le risque, la valeur et le niveau de risque de sa propriété ainsi que l'efficacité de la mesure à réduire les dommages.

Cependant, plusieurs études dans le domaine de l'économie comportementale ont montré que les individus qui font face à un choix visant à atténuer les dommages potentiellement catastrophiques d'événements à faible probabilité d'occurrence sont soumis à certains biais cognitifs qui les amènent à faire des choix économiquement irrationnels. En effet, les individus du fait du biais d'optimisme ont tendance à sous-estimer la probabilité d'occurrence des événements rares et donc

à se percevoir moins à risque qu'ils le sont en réalité. Cette perception erronée du risque ne conduit pas à la mise en place de mesures qui présentent une efficacité économique. L'attachement à la propriété et au cadre de vie constitue également un frein à la relocalisation puisque l'individu, en accordant une valeur additionnelle au bien-être qu'il en retire, surestime la valeur de sa propriété. Cet attachement encourage plutôt les propriétaires à prendre des mesures afin de réduire le risque tout en demeurant en zone inondable, ce qui n'est pas nécessairement une bonne option pour les propriétés à haut risque. De plus, les individus sont myopes, c'est-à-dire qu'ils ne sont pas capables de se projeter assez loin dans le futur pour évaluer les bénéfices de l'adoption de mesures sur le long terme. L'horizon de planification à court terme des individus ne favorise pas la mise en place de mesures permettant d'obtenir un résultat optimal pour la société si l'on prend en compte les bénéfices sur un horizon de long terme qui s'étend typiquement sur 25 à 50 ans.

Ainsi donc, si l'on vise une gestion optimale du risque d'inondation, il est essentiel d'une part d'amener les individus au niveau d'information nécessaire à la bonne compréhension et perception du risque par la mise en place d'outils donnant l'information pertinente de manière vulgarisée et facilement accessible au public. Il est également important d'autre part, en tant que société, de financer les mesures collectivement optimales et bénéfiques à l'échelle individuelle, adaptées pour réduire les impacts des inondations à long terme, mais qui dépassent les capacités individuelles. En effet, la décision d'adopter une mesure est certes individuelle, mais c'est un choix qui entraîne des conséquences collectives, puisque le fardeau financier des inondations ainsi que ses impacts psychosociaux reposent sur la société dans son ensemble à travers les programmes d'aide gouvernementaux. Pour favoriser l'adhésion à la relocalisation par exemple, on pourrait offrir des allocations de départ qui dépassent les seuils d'acceptabilité théoriques, mais qui

reflètent les prix dans le marché immobilier dans le but de permettre aux citoyens de se reloger dans des zones exemptes de risque d'inondation, car la disponibilité et l'abordabilité des logements représentent un frein à la relocalisation.

Une autre question de recherche importante à laquelle ce mémoire visait à répondre était de déterminer le moment optimal de la relocalisation. Nous avons montré au chapitre 3 que tout programme de relocalisation dans lequel le sinistré subit des pertes jusqu'au moment permis de la relocalisation est sous-optimal d'un point de vue mathématique. Le Québec dans la nouvelle mouture de son programme a introduit une limite d'indemnisation à partir de laquelle le propriétaire se voit offrir la possibilité de relocalisation ou d'adoption d'une mesure d'immunisation.

Cette relocalisation conditionnelle à l'atteinte d'une limite offerte au Québec n'est pas pertinente d'un point de vue mathématique, car la relocalisation immédiate ou du moins le plus rapidement possible est optimale. On pourrait stratégiquement offrir la relocalisation immédiate en priorité aux propriétés à haut risque du fait des coûts importants que nécessite cette mesure et/ou pour des raisons logistiques. Mais la relocalisation devrait être une option proposée immédiatement ou du moins le plus rapidement possible à tous les propriétaires en zone inondable. Il est important de garder à l'esprit que la relocalisation est la stratégie permettant d'enrayer complètement le risque d'inondation puisque c'est la présence de personnes et de biens vulnérables dans les zones inondables qui crée le risque.

Nous avons également analysé la viabilité de l'assurance inondation aux chapitres 4 et 5. Nous nous sommes intéressés à deux aspects importants qui influencent l'offre et la demande d'assurance, soit les taux de primes et le chargement de sécurité. Le premier constat est que les taux de prime basés sur le risque réel sont très élevés, en particulier pour les propriétés à haut risque, pouvant atteindre plusieurs

dizaines de milliers de dollars par année. Ces taux de primes sont inabordables pour plusieurs ménages, ce qui pourrait se traduire par une faible demande de l'assurance inondation. Nous avons aussi remarqué que le chargement de sécurité maximal que l'assureur peut appliquer à la prime d'un contrat offrant une couverture totale est en général très bas. L'assureur ne dispose donc pas d'une marge suffisante pour faire face aux frais d'exploitation et pour assurer sa stabilité à long terme. Cette faible marge de manœuvre de l'assureur combinée au faible taux de participation rend l'assurance contre les inondations peu viable.

L'assureur peut toutefois décider d'appliquer un chargement de sécurité supérieure au maximum acceptable. Dans ce cas, l'assuré n'optera pas pour la pleine assurance, mais choisira un contrat d'assurance avec un déductible ou une limite. Les déductibles optimaux que nous avons obtenus sont élevés. L'assuré prendrait donc la responsabilité d'assumer les pertes plus fréquentes et s'assurera uniquement dans l'éventualité où des dommages catastrophiques surviendraient. Cette stratégie n'est pas nécessairement une bonne idée dans les zones où les inondations sont récurrentes. Les limites optimales sont également assez basses. En choisissant une petite limite, l'assuré n'est pas protégé contre les événements catastrophiques qui engendrent des impacts financiers importants. Ainsi, lorsque l'assureur applique un chargement de sécurité élevé, il est optimal pour l'assuré de conserver une part importante du risque en échange d'une réduction de prime considérable, mais cette stratégie peut mener l'assuré à une situation de sous-assurance. Une intervention du gouvernement est donc nécessaire pour offrir aux propriétaires un niveau de couverture adéquat et assurer la viabilité de l'assurance inondation.

De plus, il est assez documenté que la myopie pousse les assurés à ne pas renouveler leurs contrats d'assurance après quelques années sans sinistres. Ce phénomène ne motive pas les assureurs à offrir des couvertures d'assurance inondation et à prendre une part active dans l'évaluation et la gestion du risque. Pour résoudre

ce problème, les assureurs devraient analyser davantage la possibilité d'offrir des contrats multiannées, comme suggérée par Meyer et Kunreuther (2017). Comme nous l'avons montré au chapitre 5, les contrats multiannées offrent un chargement de sécurité plus élevé si l'on considère que l'assuré fait face à un risque au renouvellement de sa police d'assurance annuelle. Ce type de contrat donne aussi à l'assureur une potentielle marge additionnelle provenant des revenus de placement et une possibilité de diversification temporelle du risque. Cependant, cette marge additionnelle n'est pas assez élevée pour que l'assureur investisse dans des mesures de réduction du risque structurelles et coûteuses. Elle pourrait en revanche être utilisée par l'assureur afin d'améliorer la connaissance du risque.

Une bonne connaissance du risque est en effet essentielle pour une tarification adéquate et passe par une bonne connaissance de l'aléa ainsi que de la vulnérabilité et l'exposition des propriétés assurées. Pour mieux connaître l'aléa, l'élaboration d'une cartographie plus précise des inondations ainsi que le développement de méthodes permettant une meilleure estimation des dommages sont nécessaires. La mise en place d'un système d'inspection menant à une certification permettrait de mieux évaluer la vulnérabilité des propriétés assurées. Ce système pourrait être administré par un organisme indépendant qui accorderait, à la suite d'une inspection du bâtiment, une « cote de risque » reconnue par tous les assureurs. La « cote de risque » serait attribuée selon les caractéristiques du bâtiment ainsi que les mesures mises en place par l'assuré pour réduire la vulnérabilité et l'exposition de sa propriété. La « cote de risque » pourrait être réévaluée sur une base régulière afin de responsabiliser les assurés. Une baisse du niveau de risque pourrait se traduire par une réduction de prime afin d'encourager les propriétaires à mettre davantage d'efforts dans la réduction du risque à l'échelle individuelle.

Dans un contexte où les coûts liés aux inondations devraient potentiellement augmenter du fait des changements climatiques, il est primordial de passer d'une ges-

tion réactive du risque d'inondation à une gestion proactive. Les gouvernements doivent donc mettre en place des politiques axées sur la transparence, l'accompagnement et la recherche de solutions concertées avec les communautés vivant dans les zones inondables et les partenaires clés que sont les assureurs privés. L'assurance est en effet un instrument important pour accroître la résilience et la conscience du risque des populations riveraines. Lorsque les primes sont basées sur le risque réel, elles favorisent une conscientisation du risque en envoyant un signal de prix. De plus, le traitement des sinistres et le paiement des indemnités qui se font assez rapidement dans cette industrie permettent d'accélérer le processus de rétablissement post-inondation. Cependant, le faible taux de participation et de rétention des assurés combiné à la faible viabilité peuvent rendre les assureurs réticents à offrir des couvertures pour le débordement de cours d'eau. Il est donc pertinent de construire des programmes d'assurance résultant de partenariat entre les gouvernements et les assureurs privés visant à offrir une couverture possiblement obligatoire, reliée à une hypothèque et à des taux subventionnés afin d'augmenter le taux de participation tout en prenant soin de communiquer le niveau de risque réel des individus pour accroître la conscience du risque.

L'assurance n'est toutefois pas une panacée. C'est un outil à utiliser conjointement avec des moyens comme la relocalisation et l'immunisation des propriétés, qui permettent de réduire et éliminer le risque à l'échelle individuelle. Dans une optique de gestion du risque à long terme, il est essentiel de prendre les mesures efficaces et adaptées au niveau de risque. La relocalisation par exemple devrait être une solution privilégiée, surtout pour les propriétés à haut risque dans les zones sujettes aux inondations récurrentes. Lorsque la relocalisation n'est pas envisageable et que des mesures de réduction du risque structurelles efficaces existent, l'immunisation pourrait être une bonne option. Une saine gestion du risque d'inondation passe également par la mise à jour régulière, l'uniformisation et l'accessibilité des outils

d'analyse du risque ainsi qu'une révision du schéma d'aménagement du territoire pour mieux vivre avec l'eau. Il est primordial que chacune des parties prenantes prenne la responsabilité qui lui incombe et mette en place à son échelle les mesures appropriées.

RÉFÉRENCES

- Aerts, J. C. J. H., Botzen, W. J., Clarke, K. C., Cutter, S. L., Hall, J. W., Merz, B., Michel-Kerjan, E., Mysiak, J., Surminski, S. et Kunreuther, H. (2018). Integrating human behaviour dynamics into flood disaster risk assessment. Nature Climate Change, 8(3), 193–199. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1038/s41558-018-0085-1>
- Arrow, K. (1963). Uncertainty and the welfare economics of medical care. The American Economic Review, 53(5).
- Arrow, K. J., Cropper, M. L., Gollier, C., Groom, B., Heal, G. M., Newell, R. G., Nordhaus, W. D., Pindyck, R. S., Pizer, W. A., Portney, P. R. et al. (2014). Should governments use a declining discount rate in project analysis? Review of Environmental Economics and Policy.
- Bennis, S. (2007). Hydraulique et hydrologie, 2e édition. Les Presses de l'Université du Québec.
- Björk, T. (2009). Arbitrage theory in continuous time. Oxford university press.
- Bonnifait, L. (2005). Développement de courbes submersion-dommages pour l'habitat résidentiel québécois. (Mémoire de maîtrise). Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique, Québec.
- Botzen, W. J. W., Aerts, J. C. J. H. et van den Bergh, J. C. J. M. (2009). Dependence of flood risk perceptions on socioeconomic and objective risk factors. Water Resources Research, 45(10).

- Botzen, W. J. W. et van den Bergh, J. C. J. M. (2012). Risk attitudes to low-probability climate change risks : WTP for flood insurance. Journal of Economic Behavior & Organization, 82(1). <http://dx.doi.org/10.1016/j.jebo.2012.01.005>
- Boudreault, M. et Bourdeau-Brien, M. (2020). Limite à vie sur les inondations successives : vers un nouveau pacte social ? Assurances et gestion des risques / Insurance and Risk Management, 87(1-2), 1–32.
- Boudreault, M., Grenier, P., Pigeon, M., Potvin, J.-M. et Turcotte, R. (2020). Pricing Flood Insurance with a Hierarchical Physics-Based Model. North American Actuarial Journal, 24(2), 251–274.
- Boyer-Villemaire, U., Lamy, A., Roques, J., Morin, H., Desjardins, R. et Heinrich, D. (2021b). Analyse coûts-avantages des options d'adaptation aux inondations et aléas fluviaux du bassin versant de la rivière Chaudière. Rapport technique, Ouranos, Montréal. Rapport présenté à Ressources naturelles Canada. 113 pages + Annexes.
- Boyer-Villemaire, U., Simard, C., Lamy, A., Roques, J., Morin, H., Desjardins, R. et Heinrich, D. (2021). Guide méthodologique d'analyse coûts-avantages des options d'adaptation aux inondations et aléas fluviaux en contexte de changements climatiques. Rapport technique, Ouranos, Montréal. Rapport présenté à Ressources naturelles Canada. 113 pages + Annexes.
- Buffin-Bélanger, T., Maltais, D., Gauthier, M. et (Eds.). (2022). Les inondations au Québec : Risques, aménagement du territoire, impacts socioéconomiques et transformation des vulnérabilités (1 éd.). Presses de l'Université du Québec.
- Bureau d'assurance du Canada (2015). La gestion financière du risque d'inondation. Rapport technique

- Burningham, K., Fielding, J. et Thrush, D. (2008). "it'll never happen to me" : understanding public awareness of local flood risk. Disasters, 32(2), 216–238.
- Cayatte, J.-L. (2009). Microéconomie de l'incertitude (2e édition éd.). Ouvertures économiques. De Boeck.
- Denuit, M. et Charpentier, A. (2005). Mathématiques de l'Assurance Non-Vie. Tome II : Tarification et Provisionnement. Economica. (Série Économie et statistiques avancées).
- Eeckhoudt, L., Gollier, C. et Schlesinger, H. (2005). Economic and Financial Decisions under Risk. Princeton University Press. <http://dx.doi.org/10.2307/j.ctvcm4j15>
- Fortin, G., Poirier, C., Duhamel, F. et Germain, D. (2020). Risques d'inondation et vulnérabilité : l'exemple du bassin versant de la rivière Kennebecasis, Nouveau-Brunswick, Canada. IdeAs. Idées d'Amériques, (15). Number : 15 Publisher : Institut des Amériques, <http://dx.doi.org/10.4000/ideas.7999>
- Francès, N. et Thomas, I. (2019). Le citoyen au coeur de la résilience dans l'agglomération de Montréal : lorsque l'adaptation au risque devient la préoccupation de chacun. (Mémoire de maîtrise). Université de Montréal.
- Gaume, E., Hubert, G. et Torterotot, J.-P. (2000). La prise en compte des incertitudes dans l'estimation du coût des dommages dûs aux inondations. La Houille Blanche, 3-4, 76–82.
- Gouvernement du Québec (2023). Décret du gouvernement du Québec concernant l'établissement du programme général d'assistance financière lors de sinistres. Décret 673-2023. Récupéré de <https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/adm/min/securite-publique/>

publications-adm/publications-secteurs/securite-civile/
aide-financiere/programme-2023/decret_673-2023.pdf

- Kick, E. L., Fraser, J. C., Fulkerson, G. M., McKinney, L. A. et De Vries, D. H. (2011a). Repetitive flood victims and acceptance of FEMA mitigation offers : an analysis with community–system policy implications. *Disasters*, 35(3), 510–539.
- Kick, E. L., Fraser, J. C., Fulkerson, G. M., McKinney, L. A. et De Vries, D. H. (2011b). Repetitive flood victims and acceptance of FEMA mitigation offers : an analysis with community–system policy implications. *Disasters*, 35(3).
- Meyer, R. et Kunreuther, H. (2017). The Ostrich Paradox : Why We Underprepare for Disasters. Philadelphia : University of Pennsylvania Press.
- Michel-Kerjan, E. et Kunreuther, H. (2011). Redesigning Flood Insurance. *Science*, 333(6041), 408–409. Publisher : American Association for the Advancement of Science.
- Ministère des Affaires municipales et de l’Habitation, Gouvernement du Québec (2020). Des solutions durables pour mieux protéger nos milieux de vie plan de protection du territoire face aux inondations.
- Montmarquette, C. et Scott, I. (2007). Taux d’actualisation pour l’évaluation des investissements publics au Québec. CIRANO Montréal.
- Morin, M., Québec(Province) et Direction générale de la sécurité civile et de la sécurité incendie. (2008). Concepts de base en sécurité civile. (Ser. Publications gouvernementales du Québec en ligne : monographies électroniques).Sécurité publique Québec. Récupéré de <http://collections.banq.qc.ca/ark:/52327/1825603>

- Oubennaceur, K., Chokmani, K., Lessard, F., Gauthier, Y., Baltazar, C. et Tous-saint, J.-P. (2022). Understanding flood risk perception : A case study from canada. Sustainability, 14(5), 3087.
- Pearce, D. W., Atkinson, G. et Mourato, S. (2006). Analyse coûts-bénéfices et environnement : Développements récents. Paris : OCDE-Organisation de co-opération et développement économiques.
- Penning-Rowsell, E. (2013). Flood and coastal erosion risk management : a manual for economic appraisal. Routledge. 420 pages.
- Ressources naturelles Canada, Gouvernement du Canada (2019). Procédures hydrologiques et hydrauliques fédérales pour la délimitation des zones inondables. Récupéré de <https://doi.org/10.4095/299809>
- Shao, W., Xian, S., Lin, N., Kunreuther, H., Jackson, N. et Goidel, K. (2017). Understanding the effects of past flood events and perceived and estimated flood risks on individuals voluntary flood insurance purchase behavior. Water Research, 108, 391–400. <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2016.11.021>
- Surminski, S., Bouwer, L. M. et Linnerooth-Bayer, J. (2016). How insurance can support climate resilience. Nature Climate Change, 6(4), 333–334.
- The Geneva Association. (2020). Flood Risk Management in Canada : Building flood resilience in a changing climate. Auteurs : Maryam Golnaraghi, Jason Thistlethwaite, Daniel Henstra, Craig Stewart. Récupéré de https://www.genevaassociation.org/sites/default/files/frm_canada_web.pdf
- Thistlethwaite, J. (2017). The Emergence of Flood Insurance in Canada : Navigating Institutional Uncertainty. Risk Analysis, 37(4), 744–755.

- Thistlethwaite, J. et Feltmate, B. (2013). Évaluation de la viabilité de l'assurance inondation des terres : Le marché canadien de l'assurance des propriétés domiciliaires. Faculté de l'environnement, University Waterloo.
- Thistlethwaite, J., Henstra, D., Brown, C. et Scott, D. (2018). How flood experience and risk perception influences protective actions and behaviours among canadian homeowners. Environmental management, 61(2), 197–208.
- Thistlethwaite, J., Henstra, D., Brown, C. et Scott, D. (2020). Barriers to Insurance as a Flood Risk Management Tool : Evidence from a Survey of Property Owners. International Journal of Disaster Risk Science, 11(3), 263–273.
- Villa, J. et Bélanger, D. (2013). Perception du risque d'inondation dans un contexte de changements climatiques - Recension systématique des articles scientifiques sur sa mesure (1990-2011). Direction de la santé environnementale et de la toxicologie, Institut national de santé publique Québec .
- Willis, K. F., Natalier, K. et Revie, M. (2011). Understanding Risk, Choice and Amenity in an Urban Area at Risk of Flooding. Housing Studies, 26(2), 225–239.
- Zweifel, P., Eisen, R. et Eckles, D. L. (2021). Insurance economics (second edition éd.). Classroom companion : economics. Cham : Springer.