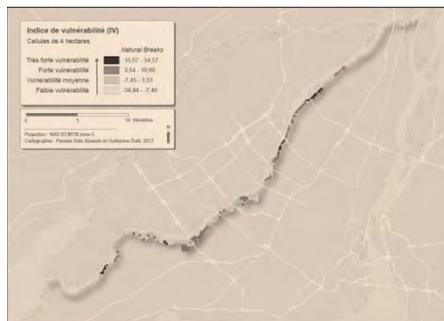
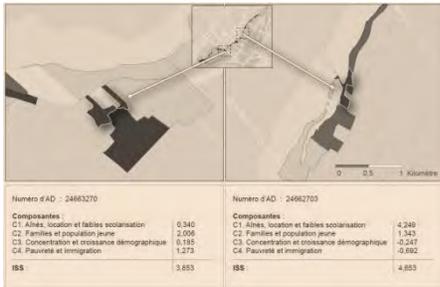


Analyser la vulnérabilité sociétale et territoriale aux inondations en milieu urbain dans le contexte des changements climatiques, en prenant comme cas d'étude la Ville de Montréal.



Source : Y. Thibault, CSC de Mtl, 2004



Isabelle Thomas

Nathalie Bleau

Pamela Soto Abasolo

Guillaume Desjardins-Dutil

Musandji Fuamba

Sonia Kadi

Mars 2012

Les résultats et opinions présentés dans cette publication sont entièrement la responsabilité des auteurs et n'engagent pas Ouranos ni ses membres.



Ressources naturelles Canada / Natural Resources Canada

Canada

Université de Montréal

Pour citation :

Thomas I., Bleau N., Soto Abasolo P., Desjardin-Dutil G., Fuamba M., Kadi S., 2012, Analyser la vulnérabilité sociétale et territoriale aux inondations en milieu urbain dans le contexte des changements climatiques, en prenant comme cas d'étude la ville de Montréal, Rapport final pour Ouranos, 137 p.

Table des matières

1. INTRODUCTION.....	7
2. CONTEXTE.....	8
3. CADRE THÉORIQUE	12
3.1. CADRE THÉORIQUE - GÉNÉRAL	12
3.2. CADRE THÉORIQUE – MÉTHODES.....	15
3.2.1 Méthodes de la sensibilité / capacité d'adaptation / vulnérabilité	16
3.2.2 Méthodes hydrologiques	Erreur ! Signet non défini.
4. MÉTHODOLOGIE/ DONNÉES	23
4.1. ÉTAT DES LIEUX DES INONDATIONS HISTORIQUES	23
4.1.1. Présentation de la zone d'étude	23
4.1.2. Historique d'urbanisation	24
4.1.3. Historique des inondations	27
4.2. MODÉLISATION DES NIVEAUX D'EAU	29
4.2.1 Modélisation numérique.....	32
4.2.1.1 Modélisation avec Hec-Ras.....	32
4.2.1.1.1 Implantation des sections de la rivière et des ouvrages civils.....	32
4.2.1.1.2 Étude Hydrologique.....	34
4.2.1.1.3 Calage du modèle numérique	34
4.2.1.2 Modélisation avec HydroSim	38
4.2.1.2.1 Topographie et maillage hydrodynamique	38
4.2.1.2.2 Répartition des coefficients de frottement	39
4.2.1.2.3 Répartition des conditions aux limites	39
4.2.1.2.4 Simulation	40
4.2.2 Analyse et discussion des résultats	40
4.2.2.1 Résultats obtenus des simulations numériques	40
4.2.2.1.1 Résultats obtenus avec HEC-RAS.....	40
4.2.2.1.2 Résultats obtenus avec Hydrosim	41
4.2.2.2 Tracé des cartes d'inondation.....	42
4.2.2.2.1 Vérification initiale et consolidation de la géoréférence.....	42
4.2.2.2.2 Interpolation des courbes de niveaux et édition cartographique	42
4.2.2.2.3 Lignes d'inondation	43
4.2.2.3 Discussions de résultats obtenus.....	43
4.2.2.3.1 Résultats obtenus sur les niveaux d'eau dans la rivière	44
4.2.2.3.2 Résultats obtenus sur les cartes d'inondation.....	45
4.2.3 Conclusion et recommandations.....	46
4.3. ANALYSE DE LA VULNÉRABILITÉ	46
4.3.1 Sensibilité.....	46
4.3.1.1. Indicateurs de la sensibilité	47
4.3.1.2. Méthode de la sensibilité sociale et résultats.....	48
4.3.1.2.1. Indice de la sensibilité sociale (ISS)	49
4.3.1.2.2. Indice de la sensibilité sociale par addition d'indicateurs pondérés (ISSAIP).....	56
4.3.1.2.3. Comparaison des deux méthodes sociales.....	61
4.3.1.2.4. Atelier	62
4.3.1.3. Méthode de la sensibilité territoriale et résultats	65
4.3.1.3.1. Indice de la sensibilité territoriale	66
4.3.2. Capacité d'adaptation	75
4.3.2.1. Indicateurs de la capacité d'adaptation.....	76
4.4. CARTOGRAPHIE DES TYPOLOGIES.....	91
4.4.1. Méthodologie de la vulnérabilité et résultats.....	91
4.4.2. Indice de la vulnérabilité.....	91
5. SYNTHÈSE DES RÉSULTATS	97

6. ANALYSE ET DISCUSSION	99
7. CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS.....	101
8. RÉFÉRENCES.....	102
ANNEXES	112
ANNEXE A - APERÇU DES RÉSULTATS OBTENUS AVEC HEC-RAS	112
ANNEXE B - APERÇU DES RÉSULTATS OBTENUS AVEC HYDROSIM	122
ANNEXE C – RÉSULTATS DES SIMULATIONS D'HYDROSIM TRANSPOSÉES DANS MAPINFO	129
ANNEXE D - SOURCE DES DONNÉES RECUEILLIES	130

Liste des figures

Figure 1 : La vulnérabilité et ses composantes, des exemples plus concrets	14
Figure 2 – Schéma de la méthode d'analyse du risque inondation	15
Figure 3 : Carte montrant l'élévation du sol pour Montréal et les régions qui l'entourent	24
Figure 4 : Évolution de l'urbanisation dans le secteur nord de l'île de Montréal entre 1920 et 2009.....	25
Figure 5 : Occupation du sol de la zone d'étude	27
Figure 6 : Principales zones soumises à des risques d'inondations en 2007 sur l'île de Montréal.	28
Figure 7 : limites de la zone inondable et la zone inondée historiquement de la rive de Montréal de la rivière des prairies.....	29
Figure 8 : Vue en plan des diverses sections transversales le long de la rivière des Prairies.....	33
Figure 9: Maillage topographique (vert) associé au maillage hydrodynamique (bleu) de la partie amont du barrage d'Hydro-Québec sur la RDP.....	38
Figure 10 : Répartition des coefficients de rugosité (secteur aval du barrage)	39
Figure 11 : Partition de conditions limites amont (entrée de la rivière), pour Q T100 ans	39
Figure 12 : Partition de conditions limites amont (affluent du bras nord de l'Île- Bizard) pour QT 100 ans.....	39
Figure 13 : Niveaux d'eau pour différents scénarios de simulation.....	40
Figure 14 : Limites d'inondation (en violet – amont du barrage et bleu – aval du barrage) pour la simulation Q100 ans + 2000 m3/s.	41
Figure 15 : Lignes d'inondation (bleu et rouge) générées avec les résultats de la simulation numérique Q100 ans + 2000 m3/s.....	43
Figure 16 : Zone d'étude. Aires de diffusion touchées par le profil d'inondation du modèle hydrologique (Profil 9 = Q100 + 2000 m3 / s)	50
Figure 17 : Schéma du fonctionnement de la rotation orthogonale (Varimax) dans l'analyse en composantes principales (ACP).....	51
Figure 18 : Résultat de l'indice de la sensibilité sociale (ISS).....	53
Figure 19 : Exemples des composantes des AD ayant un ISS à très forte sensibilité.....	54
Figure 20 : Parc d'appartements à loyer modique « Parc Cloverdale ».....	55
Figure 21 : Aperçu des résidences pour personnes âgées à Montréal-Nord.....	55
Figure 22 : Résultats de l'indice de la sensibilité sociale par addition d'indicateurs pondérés (ISSAIP)	58
Figure 23 : Exemples des composantes des AD ayant un ISSAIP à très forte sensibilité.....	59
Figure 24 : Multiplex dans le district Sainte-Geneviève à l'ouest de Montréal.....	60
Figure 25 : Habitation à loyer modique dans l'arrondissement Rivière-des-Prairies-Pointe-aux-Trembles.....	60
Figure 26 : Zone d'étude de l'Indice de la sensibilité territoriale (IST).....	68
Figure 27 : Aperçu de la table d'attributs de la base des données de la description de la sensibilité territoriale.	69
Figure 28 : Schéma des étapes de la réalisation de l'indice de la sensibilité territoriale.....	71
Figure 29 : Résultats de l'indice de la sensibilité territoriale.....	72
Figure 30 : Exemples des résultats de l'indice de la sensibilité territoriale (IST).....	74
Figure 31 : Édifices à résidences pour personnes âgées à l'est de Montréal.....	75
Figure 32 : Logements privés à forte densité à l'arrondissement Pierrefonds-Roxoboro.....	75
Figure 33 : Résultats de l'indice de la capacité d'adaptation.....	82
Figure 34 : Maisons unifamiliales, 94e avenue, Pointe-aux-Trembles.....	84
Figure 35 : Nouveau développement de maisons unifamiliales près de l'Anse-à-l'Orme, Sainte-Geneviève.....	84
Figure 36 : Immeuble à appartements et ancien chalet, Sainte-Geneviève.....	84
Figure 37 : Bungalows des années '70-80, Pierrefonds.....	84
Figure 38 : Résultats de l'indice de vulnérabilité (IVu)	93
Figure 39 : Profils d'inondations des simulations hydrologiques retenus	94

Liste des tableaux

Tableau 1: définitions du terme vulnérabilité (adapté de Manyena, 2006)	13
Tableau 2 : Les débits de crue 2 ans et 100 ans au niveau des biefs (scénarios de base/ Débits initiaux)	34
Tableau 3 : Débits et niveaux d'eau des 3 campagnes de mesures	35
Tableau 5 : Valeurs mesurées de débit à la station hydrométrique 02OA038	36
Tableau 4 : Valeurs mesurées de débit à la station hydrométrique 02OA072	36
Tableau 6 : Scénarios des simulations numériques	37
Tableau 7 : Différence de niveau d'eau entre les modèles Hec-Ras et Hydrosim pour certaines sections transversales de la RDP	44
Tableau 8 : Liste préliminaire d'indicateurs	39
Tableau 9 : Indicateurs de la sensibilité sociale	45
Tableau 10 : Indicateurs de la sensibilité territoriale	45
Tableau 11 : Liste d'indicateurs retenus pour l'ISS.	49
Tableau 12 : Variance totale expliquée par l'ACP	51
Tableau 13 : Matrice des composantes après rotation.....	52
Tableau 14 : Matrice synthèse de l'interprétation des composantes	52
Tableau 15 : Nombre et pourcentage des AD à l'intérieur des intervalles de l'ISS.	54
Tableau 16 : Indicateurs de l'ISSAIP	56
Tableau 17 : Poids des indicateurs de l'ISSAIP	57
Tableau 18 : Nombre et pourcentage des AD à l'intérieur des intervalles de l'ISSAIP.....	59
Tableau 19 : Nombre et pourcentage des AD à l'intérieur des intervalles de l'ISS et l'ISSAIP.	61
Tableau 20 : Pondération des indicateurs de l'analyse de la sensibilité sociale aux inondations dans le secteur de la rivière des Prairies déterminées par les groupes de l'atelier de travail.....	63
Tableau 21 : Indicateurs retenus pour l'analyse de l'indice de la sensibilité territoriale	66
Tableau 22 : Indicateurs et données recommandés dans l'analyse de la sensibilité territoriale dans d'autres études de cas.....	67
Tableau 23 : Statistiques descriptives des indicateurs de la sensibilité territoriale et détermination de sous-groupes d'indicateurs.....	69
Tableau 24 : Statistiques des intervalles de la sensibilité de l'IST	72
Tableau 25 : Variables pouvant servir à mesurer la capacité d'adaptation d'une communauté	78
Tableau 26 : Variables entrant dans la composition de l'indice de la capacité d'adaptation	81
Tableau 27 : Variables évaluées dans l'analyse qualitative de la capacité d'adaptation	81
Tableau 28 : Nombre et pourcentage des AD à l'intérieur des intervalles de l'indice IAdapt	83
Tableau 29 : Sommaire des résultats de la capacité d'adaptation	85
Tableau 30 : Synthèse de l'analyse qualitative de la capacité d'adaptation	89
Tableau 31 : Statistiques des intervalles de la vulnérabilité	94
Tableau 32 : Analyse des résultats des indicateurs clés et de la typologie de la vulnérabilité en fonction des divers scénarios d'inondation.	95

Liste des graphiques

Graphique 1 : Évolution de l'urbanisation de 1800 à 2009 sur le secteur nord de l'île de Montréal.	25
Graphique 2 : Variation du niveau d'eau pour différents scénarios de simulation.....	41
Graphique 3 : Distribution des degrés de la sensibilité sociale par nombre d'aires de diffusion (206 AD au total) du secteur de la rivière des Prairies à Montréal à partir des résultats de l'indice ISSAIP des groupes de l'atelier de travail.	64

1. Introduction

Le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'évolution du Climat (GIEC) expliquait dès 2001 que l'Amérique du Nord serait frappée par une augmentation du ruissellement en hiver et au printemps. L'un des principaux risques naturels dans le sud du Québec concerne les inondations.

La compréhension et la prise de conscience des enjeux liés aux inondations sont primordiales pour les principaux bénéficiaires du projet (municipalités, Ministère de la Sécurité publique (MSP), Ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire (MAMROT), etc.). Les conséquences des inondations en milieu urbain peuvent être atténuées considérablement si les acteurs locaux et régionaux connaissent bien le phénomène des inondations sur leur territoire et sont informés de la vulnérabilité de celui-ci.

Le but principal de l'approche de la vulnérabilité est de promouvoir la recherche qui contribue à la prise de décisions d'adaptation en fournissant une structure dans laquelle **les priorités peuvent être établies malgré les incertitudes concernant le changement climatique futur** [Lemmen et Warren, 2004]. *"L'analyse de la vulnérabilité sert de point de départ pour trouver des moyens efficaces de promouvoir des mesures correctives susceptibles de limiter les impacts, en appuyant des stratégies d'atténuation et en facilitant l'adaptation"* [Kelly et Adger, 2000, p. 325].

Notre projet propose **d'analyser la vulnérabilité sociétale et territoriale aux inondations en milieu urbain dans le contexte des CC, en prenant comme cas d'étude la Ville de Montréal**. Il pourrait permettre aux acteurs de mieux comprendre les défis à relever pour diminuer leur vulnérabilité face aux événements d'inondation dans le contexte des changements climatiques (CC) et servir comme aide à la prise de décision. En analysant la vulnérabilité de la Ville de Montréal face aux inondations et les enjeux rattachés à ces événements, cette recherche tente de déceler les populations et les secteurs qui sont et seraient particulièrement affectés et favorise également l'établissement des priorités en matière de réponse adaptative.

Dans le cadre de ce projet, les sites à l'étude se concentrent sur les secteurs affectés par les débordements de la rivière des Prairies (RDP) dans la partie nord de ville de Montréal. Cette analyse est développée sur la base d'une cartographie des zones inondées maximales historiques et de simulation de niveaux d'eau à une échelle fine (microtopographie). Cette analyse implique plusieurs étapes et le développement de plusieurs outils dont : la collecte des données disponibles et nécessaires pour réaliser un état des lieux des zones inondées historiquement pour une partie de la Ville de Montréal, la modélisation de l'espace occupé par l'eau selon différents niveaux d'eau possiblement atteints lors de débordement de la rivière, la collecte des données disponibles et nécessaires ainsi que le développement d'indices pour analyser la sensibilité à l'élévation du niveau de l'eau et la capacité d'adaptation des secteurs affectés et au final une cartographie de la vulnérabilité en fonction des multiples niveaux d'eau possiblement atteints qui permet d'identifier, de caractériser et de hiérarchiser les espaces.

Ce projet a donc l'ambition d'apporter un élément de réponse aux acteurs locaux et régionaux en termes de vulnérabilité aux inondations de cours d'eau en milieu urbain. Il implique la collaboration de chercheurs experts dans des disciplines complémentaires : urbanisme, aménagement, géomatique et hydrologie, et un budget dont la totalité du financement en espèce provient du Programme ICAR-Québec.

2. Contexte

Le double défi lancé au 21^{ème} siècle à l'humanité pourrait bien être celui de son développement urbain dans un contexte de CC. La croissance urbaine effrénée, maintenant commune au monde entier, pose drastiquement le problème des ressources, des inégalités sociales et celui de notre rapport à l'environnement. Les CC auront pour effet d'exacerber ces pressions. Les zones inondables qui se situent en milieu urbanisé sont ainsi des territoires vulnérables, tant du point de vue de la population qui s'y concentre que des extrêmes hydrométéorologiques auxquels elles sont de plus en plus exposées et avec lesquels elles doivent composer.

Différentes des inondations, même si souvent prises comme synonymes, les crues correspondent à l'augmentation du débit (m³/s) d'un cours d'eau, dépassant plusieurs fois le débit moyen : elles se traduisent généralement par une augmentation de la hauteur d'eau et peuvent ainsi entraîner une inondation [Besson, 1996].

Au Québec, lorsqu'il est question de crues, et d'inondations qui peuvent en découler, deux types peuvent être distingués [CEHQ, 2010]. Les crues-éclair surviennent à la suite de pluies intenses sur une courte période de temps. L'eau tombée n'arrive pas à s'écouler normalement sur le territoire ou à s'infiltrer dans le sol [Estupina-Borell et al., 2005]. Les crues éclair affectent souvent de petits bassins versants ou les milieux urbains où les sols sont imperméabilisés. Les secondes, qui font partie du contexte dans lequel la présente recherche s'inscrit, sont les crues de plaine qui se caractérisent par la montée relativement lente des eaux. Au Québec, elles découlent généralement de la fonte des neiges printanière (mais elles pourraient aussi résulter d'une période de fortes pluies) souvent couplée à des sols déjà saturés [St-Laurent et Lavoie, 2009]. Malgré leur relative lenteur, les crues de plaine sont parfois jumelées, comme c'est le cas sur le territoire à l'étude, à des phénomènes plus menaçants et moins prévisibles, dont le frasil, mais aussi les embâcles et les débâcles.

Les impacts négatifs¹ engendrés par les inondations peuvent être classés sous quatre classes, les dommages humains, matériels, économiques et environnementaux [GRELOT, 2004]. Au Québec les inondations sont rarement meurtrières mais elles sont sources de blessures physiques, de détresse psychologique et de traumatismes, permanents dans certains cas. Les inondations sont également dommageables pour les biens. Elles affectent les habitations, les immeubles, les ponts, et diverses infrastructures dont certaines essentielles (tableau 10). Les inondations ont un impact économique sur la région affectée en paralysant, en tout ou en partie, les activités économiques avec comme conséquences des flux réduits, des pertes de production, une réduction des chiffres d'affaires, etc. Concrètement, cela peut se traduire par des entreprises qui se voient obligées de cesser leurs activités temporairement ou définitivement, des travailleurs qui se voient obligés de délaisser leur emploi de façon temporaire. Point de vue environnemental, les inondations peuvent entre autres provoquer la destruction d'écosystèmes ou encore être à l'origine de pollution diffuse de milieux environnants.

Le GIEC a constaté qu'entre 1900 et 2005, les précipitations ont fortement augmenté dans l'est de l'Amérique du Nord [GIEC, 2007]. Le GIEC (2007) a clairement évoqué l'influence des CC sur les inondations (occurrence, fréquence, ampleur). Plus spécifiquement, pour le sud du Québec on trouve une littérature scientifique qui s'accorde pour dire qu'en automne on s'attend à plus de pluie, à une arrivée plus tardive et moins permanente du couvert de neige; et en hiver on s'attend à des températures plus chaudes, à de plus fortes hausses des précipitations liquides ainsi que possiblement plus de cycles de gel/dégel et redoux [Bourque et Simonet, 2008; Ouranos, 2010]. Bates et al. rapportent également que "*les épisodes de fortes précipitations devraient devenir plus fréquents dans la plupart des régions au cours du XXI^e siècle, ce qui devrait entraîner des risques de crues éclair et d'inondations en milieu urbain*" [Bates et al., 2008, p. 48]. Les scénarios de changements climatiques

¹ Les inondations peuvent également avoir des impacts positifs, entre autres dans la plaine alluviales où elles permettent la fertilisation des sols et contribuent au maintien de la biodiversité.

en ce qui concerne les températures et les précipitations pointent également vers de plus forts étiages en été et une augmentation des niveaux et des débits d'eau pour les rivières de l'extrême sud du Québec. Ceci est consistant avec d'autres analyses sur les tendances récentes qui permettent d'entrevoir une aggravation des conditions génératrices d'inondations [Turcotte et Cyr, 2008; Leclerc et al., 2006]. Le Québec connaît depuis de nombreuses années des épisodes d'extrêmes hydrologiques qui se traduisent, entre autres, par des débordements de cours d'eau. Des études indiquent que ces phénomènes restent un problème d'actualité pour les municipalités. Les modifications prévues dans la pluviométrie, dues aux CC, vont ainsi affecter le régime hydrique du Québec et entraîner des problèmes d'inondation plus intenses. Ces épisodes peuvent accroître le risque tant pour les infrastructures et les activités économiques que pour les populations.

L'adaptation à ces changements est une nécessité et vient s'ajouter aux constats actuels pour la région montréalaise. *"Même les sociétés dotées d'une grande capacité d'adaptation restent vulnérables à l'évolution et à la variabilité du climat et aux extrêmes climatiques"* [GIEC, 2007, p. 56]. Cette mise en garde prouve le besoin d'adaptation et d'anticipation de façon viable, surtout dans les zones plus densément peuplées.

Cette recherche s'inscrit dans l'optique du cadre d'action de Hyogo (2005-2015), "Building the Resilience of Nations and Communities to Disasters", dont le but fondamental est de connaître la vulnérabilité et d'instaurer la résilience des collectivités (autorités, responsables de la sécurité publique, citoyens) face aux catastrophes par une réduction considérable des pertes dues aux catastrophes d'ici 2015 - pertes tant en vies humaines qu'au niveau du capital social, économique et environnemental des collectivités et des pays. Ce document, produit à la suite de la Conférence mondiale tenue à Kobe : "World conference on Disaster reduction" en 2005, insiste sur la nécessité d'adopter plus particulièrement une approche de type "prévention, adaptation, renforcement de la résilience", par opposition à une approche de type "gestion de l'urgence et réaction".

Malgré ces démarches qui se veulent proactives, nombre d'études ont révélé que différents facteurs exercent une influence sur le poids que l'on accorde aux CC dans les décisions relatives à l'aménagement du territoire et à la gestion des risques naturels. Les principaux facteurs seraient en lien avec les incertitudes face aux CC à venir, les compressions budgétaires, les perceptions et les comportements de la collectivité et des autorités, les tensions entre les différents usagers d'une même ressource ou d'un même territoire, ainsi que la gouvernance et les orientations politiques municipales, régionales et provinciales en place [Fédération des municipalités canadiennes, 2001; Ivey et al., 2004; Naess et al., 2005; Crabbe et Robin, 2006; GIEC, 2007]. Ces facteurs agissent comme des barrières à la recherche de solutions. Pourtant, bien qu'ils doivent être pris en compte, ils ne doivent pas pour autant empêcher toute forme de réflexion et de travail.

Pour pallier à ces barrières, *"il est possible de procéder à une première évaluation de la vulnérabilité sans connaître avec précision les changements qui se produiront dans l'avenir, en analysant la sensibilité passée à la variabilité climatique et la capacité actuelle du système de s'adapter aux variations des conditions"* [Lemmen et Warren, 2004, p. 32]. Bien que les travaux sur les changements climatiques continuent d'être teintés d'un bon nombre d'éléments incertains, ces derniers ne devraient pas constituer un justificatif pour reporter le travail de développement et d'élaboration de solutions d'adaptation aux CC [Lemmen et Warren, 2004]. Ces éléments devraient plutôt nous amener à nous concentrer sur des solutions d'adaptation permettant l'atténuation des vulnérabilités actuelles en accroissant les possibilités et la capacité d'adaptation.

Ainsi, pour réduire les risques d'inondations en milieu urbain, les collectivités doivent connaître non seulement la gravité, la fréquence, la probabilité des inondations urbaines dans le contexte des CC (l'aléa), mais aussi la population, l'environnement et les principales activités socio-économiques localisées dans les zones inondables de leur territoire telles que les hôpitaux, les entreprises, les maisons pour personnes âgées, les infrastructures de transports, etc.

Cette vulnérabilité est devenue peu à peu un concept central dans l'analyse des risques. Envisagée au départ comme une simple fonction de l'exposition aux aléas, la vulnérabilité s'est affinée [Wisner et al., 2003; D'Ercole, 1994; Reghezza, 2006b]. Une littérature abondante y est consacrée [Bankoff et al. 2004; Cannon, 2000; Pelling, 1997; Thouret et Chardon, 1994]. *"Être vulnérable, c'est donc être physiquement exposé à un aléa, c'est présenter une certaine fragilité face au danger et c'est aussi ne pas envisager, ou mal envisager les moyens disponibles pour affronter la crise"* [Maret et Cadoul, 2008, p. 205]. Dauphiné (2007) note que *"la vulnérabilité est fonction du statut socio-économique des communautés locales frappées par les risques"* [Dauphiné, 2007, p. 118]. Cardona (2003) appuie ce propos, mais le nuance un peu en affirmant que la pauvreté n'est qu'un élément parmi l'ensemble des facteurs qui constituent la vulnérabilité. Par ailleurs, l'urbanisation est aussi considérée comme étant un facteur qui tend à augmenter l'ampleur de la vulnérabilité [PNUD, 2004] puisque d'après Veyret (2004), elle implique des enjeux écologiques, humains, environnementaux, sociaux, patrimoniaux et économiques.

La vulnérabilité est liée à l'exposition d'un système aux impacts climatiques, à la sensibilité de ce système ainsi qu'à sa capacité de s'adapter [Allen Consulting Group, 2005; GIEC, 2007]. Il est nécessaire de différencier vulnérabilité et sensibilité, puisqu'au-delà de la sémantique, la *"sensibilité fait abstraction de l'effet modérateur des stratégies d'adaptation, tandis que la vulnérabilité renvoie aux impacts qui restent après que les mesures d'adaptation ont été prises en compte"* [Kelly et Adger, 2000 – traduit dans Lemmen et Warren 2004, p. 19]. Ainsi, un système qui serait jugé comme étant relativement sensible aux changements climatiques ne serait pas forcément vulnérable s'il a une grande capacité d'adaptation [Lemmen et Warren, 2004].

Plusieurs approches visant à mieux cerner la vulnérabilité ont été élaborées. Parmi celles-ci, on trouve l'approche en termes d'indicateurs de vulnérabilité [Theys, 1987], l'approche classique de la vulnérabilité [Chaline et Dubois-Maury, 1994], l'approche en termes de facteurs de vulnérabilité [D'Ercole et J.C.Thouret, 1996], par l'endommagement [Pigeon, 2002], en termes de vulnérabilité sociétale [Becerra et Peltier, 2009], de vulnérabilité active ou encore de vulnérabilité territoriale par enjeux [D'Ercole, Metzger, 2009].

Ces approches se complètent et permettent de développer de nouvelles façons d'analyser la vulnérabilité des territoires. Par ailleurs, leur multiplicité reflète la complexité des enjeux que la vulnérabilité suscite. Aussi, nous intégrerons également dans notre réflexion les travaux concernant l'influence des CC sur les critères de vulnérabilité [Dessai et al, 2009; Adger, 2007; Fussel, 2007]. Notre objectif étant d'analyser la vulnérabilité sociétale et territoriale aux inondations en milieu urbain dans le contexte des changements climatiques, en prenant comme cas d'étude la Ville de Montréal, il s'agira non seulement d'identifier les lieux où se localisent les enjeux majeurs mais également leur degré de vulnérabilité face aux débordements de la rivière des Prairies.

L'étude des phénomènes passés, à l'échelle de la Ville de Montréal, permet de mieux comprendre leurs causes et de définir leurs conséquences. Elle suscite une réflexion approfondie sur les mesures de protection / prévention passées et actuelles face aux débordements de cours d'eau sur le plan urbanistique et leur pertinence sur le long terme. Dans une étude approfondie des crues et inondations majeures des villes de l'Estrie, D. Saint-Laurent et M. Hahni concluent : *"il semble que la politique gouvernementale actuelle sur la protection des rives, du littoral et des plaines inondables (MDDEP, 1987) ne joue pas pleinement son rôle de protection pour ces zones à risques"* [Saint Laurent et Hahni, 2008, p. a69]. Il est utile de mener le même type d'analyse dans le contexte montréalais et d'établir un cadre des besoins en matière de prévention.

Traiter le cas de la Ville de Montréal permettra d'étudier un certain nombre de sujets pertinents, dont les déterminants de la vulnérabilité territoriale et structurelle aux inondations en milieu urbain. Le besoin de connaître la vulnérabilité des collectivités face aux risques d'inondations et la nécessité de mettre en place des mesures d'adaptation efficaces se sont traduits dans d'autres contextes internationaux par la constitution de groupes interdisciplinaires afin de travailler sur cette problématique

complexe. Ce projet permettra de participer à la mise en place des bases d'un observatoire urbain interdisciplinaire, à l'image d'autres pays, indispensable à la compréhension des enjeux de la résilience et de l'adaptation. Des équipes de chercheurs, en France comme aux États-Unis, utilisent des laboratoires urbains afin de faire avancer les réflexions sur les risques.

Ce projet permettra non seulement d'analyser, de manière exhaustive, la vulnérabilité sociétale et territoriale de la Ville de Montréal face aux débordements de la rivière des Prairies; il permettra également de s'inscrire dans une mouvance internationale de création d'observatoires urbains internationaux, dont les principaux objectifs sont tout à fait cohérents avec l'approche, la stratégie d'Ouranos en termes de R&D pour l'adaptation aux CC.

Enfin, il est bien de préciser que ce projet a été élaboré dans le souci de répondre aux objectifs du programme ICAR-Québec, dont celui d'évaluer la vulnérabilité aux impacts des CC afin de déceler les populations et les secteurs qui sont et seront particulièrement affectés et pour permettre l'établissement des priorités en matière de réponse adaptative. Les objectifs du programme ICAR-Québec constituent une opportunité de pouvoir collaborer au développement des connaissances dans le but de parvenir à l'élaboration d'une stratégie d'adaptation aux CC et à son application efficace en milieu urbain.

3. Cadre théorique

Les municipalités sont de plus en plus confrontées aux enjeux d'une part de la vulnérabilité de leurs communautés et d'autre part aux incertitudes liées aux dérèglements du climat. Les urbanistes sont amenés à réfléchir à des modèles et outils innovants visant à intégrer la prévention des risques et l'adaptation aux changements climatiques dans la planification. Pour ce faire, des groupes de recherche (Zone Atelier Loire; RAVON, etc.) se développent dans le monde afin non seulement de cerner les enjeux liés aux changements climatiques, mais aussi les vulnérabilités sociétales et territoriales à amoindrir. Cette intégration croissante de la problématique des changements climatiques pousse à développer des outils et des méthodes innovantes, scientifiquement solides et répliquables pour permettre la mise en place de stratégies pertinentes.

3.1. Cadre théorique - général

Enjeux : une problématique internationale

Dès 1994, la conférence de Yokohama sous l'égide des Nations Unies adopte une stratégie et un plan dont les cinq principaux points à améliorer témoignent de la prise de conscience des enjeux liés aux risques, à savoir la gouvernance, l'identification des risques et la préparation, la réduction des facteurs de risques sous-jacents, la préparation pour une réponse et une reconstruction plus efficaces.

La question de la planification des risques fut ensuite mise en avant lors de la conférence mondiale sur le développement durable. Une approche multirisques intégrée pour gérer les risques et la vulnérabilité, incluant la prévention, la mitigation et la préparation est présentée comme essentielle pour construire un monde plus sécuritaire pour le 21^{ème} siècle (*Johannesburgh Plan of Implementation of the World Summit on sustainable development*). Le thème de la vulnérabilité est alors intégré dans un programme de travail de la commission sur le développement durable. Si l'analyse de la vulnérabilité des populations dans le contexte des changements climatiques s'avère incontournable, aucun consensus n'est encore établi quant à la définition du concept ou encore la méthode à utiliser pour la cerner.

Définition des concepts principaux

Les premières recherches sur les risques se sont longtemps concentrées sur les aléas pour ensuite s'intéresser à la vulnérabilité. La définition et la notion de risque, de même que de ses composantes évoluent ainsi depuis une trentaine d'années dans les travaux de recherche. La formule généralement utilisée et communément acceptée pour définir le risque est la suivante [Chardon, 1994, Barroca, 2007, Thouret, D'Ercole, 1996] :

*Risque naturel = Aléa * vulnérabilité.*

Si la définition de l'aléa peut paraître assez claire, celle de la vulnérabilité est complexe, et on retrouve de multiples articles dans la littérature à ce sujet. Il est à noter que ces deux termes ont évolué dans leurs définitions et leurs approches.

L'aléa a été compris par plusieurs chercheurs comme la probabilité d'occurrence d'un phénomène en un point et un instant donnés [Picon et al, 2005; Lindley et al, 2006]. L'aléa peut représenter une menace pour la société et générer des dommages [Thouret et d'Ercole, 1996, Guigo, 2002]. L'aléa est exprimé de différentes manières, par exemple par une intensité, une fréquence, une probabilité etc. [Picon et al, 2005, Chardon 2004]. Cependant, dans le cadre de cette recherche et dans le contexte des CC nous avons choisi de développer des scénarios hypothétiques présentant une intensité (hauteur) et un champ d'action (un espace) dans le but d'intégrer le caractère incertain de l'évènement.

Le terme de vulnérabilité est amplement utilisé dans les études sur le risque. "*La vulnérabilité joue un grand rôle dans l'équation du risque, car elle minore ou, au contraire amplifie la catastrophe*" [Thouret, 2002, p. 507]. L'urbanisation est un facteur qui tend à augmenter l'ampleur de la vulnérabilité [PNUD,

2004]; elle implique des enjeux écologiques, humains, environnementaux, sociaux, patrimoniaux et économiques - Veyret (2004). La difficulté à saisir ce terme se traduit dans le texte de Weichselgartner (2001), qui propose un tableau de 24 définitions recensées dans la littérature des années 1980 à 2000. Le tableau suivant retranscrit par Manyena (2006) en témoigne.

Tableau 1: définitions du terme vulnérabilité (adapté de Manyena, 2006).

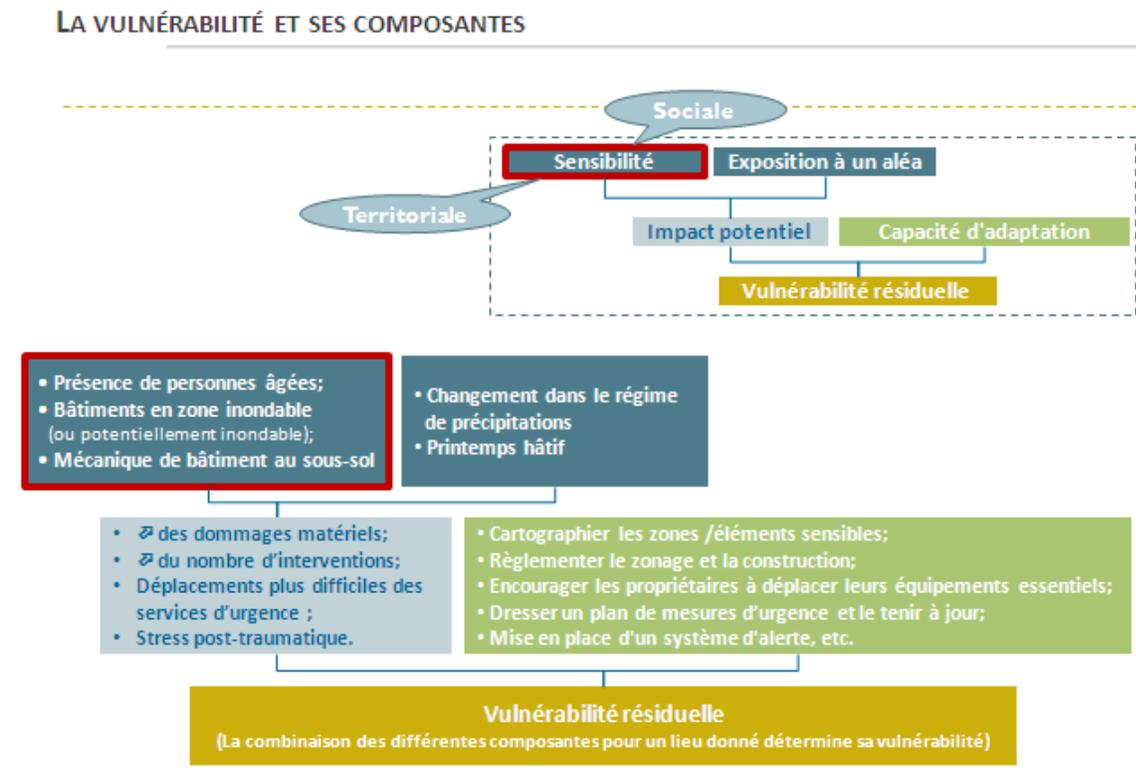
Author	Definition
Timmerman, (1981)	Vulnerability is the degree to which a system acts adversely to the occurrence of a hazardous event. The degree and quality of the adverse reaction are conditioned by a system's resilience (a measure of the system's capacity to absorb and recover from the event).
Pijawka and Radwan, 1985	Vulnerability is the threat or interaction between risk and preparedness. It is the degree to which hazardous materials threaten a particular population (risk) and the capacity of the community to reduce the risk or adverse consequences of hazardous material releases.
Dow, 1992	Vulnerability is the differential capacity of groups and individuals to deal with hazards, based on their positions within physical and social worlds.
Watts and Bohle, 1993	Vulnerability is defined in terms of exposure, capacity and potentiality. Accordingly, the prescriptive and normative response to vulnerability is to reduce exposure, enhance coping capacity, strengthen recovery potential and bolster damage control (i.e., minimise destructive consequences) via private and public means.
Blaikie et al., 1994	By vulnerability we mean the characteristics of a person or a group in terms of their capacity to anticipate, cope with, resist and recover from the impact of a natural hazard. It involves a combination of factors that determine the degree to which someone's life and livelihood are put at risk by a discrete and identifiable event in nature or in society.
Green et al., 1994	Vulnerability to flood disruption is a product of dependence (the degree to which an activity requires a particular good as an input to function normally), transferability (the ability of an activity to respond to a disruptive threat by overcoming dependence either by deferring the activity in time, or by relocation, or by using substitutes), and susceptibility (the probability and extent to which the physical presence of flood water will affect inputs or outputs of an activity).
Bohle, Downing and Watts, 1994	Vulnerability is best defined as an aggregate measure of human welfare that integrates environmental, social, economic and political exposure to a range of potential harmful perturbations. Vulnerability is a multilayered and multidimensional social space defined by the determinate, political, economic and institutional capabilities of people in specific places at specific times
Weichselgartner and Bertens, 2000	By vulnerability, we mean the condition of a given area with respect to hazard, exposure, preparedness, prevention, and response characteristics to cope with specific natural hazards. It is a measure of the capability of this set of elements to withstand events of a certain physical character.

Source: adapted from Weichselgartner, 2001

Nous avons choisi dans cette recherche d'utiliser la définition suivante :

La vulnérabilité (figure 1) est une notion liée à l'exposition d'un système aux impacts climatiques, à la sensibilité de ce système ainsi qu'à sa capacité de s'adapter [Group TCA ,2005; GIEC, 2007].

Figure 1 : La vulnérabilité et ses composantes, des exemples plus concrets



Source : Bleau et Thomas-Maret, 2010

La sensibilité est un état (physique, mental, socio-économique, environnemental) fragile face au danger (un aléa). La **capacité d'adaptation** représente la capacité des communautés et des écosystèmes à s'ajuster pour faire face aux changements climatiques afin de minimiser les effets négatifs et de tirer profit des avantages. La "sensibilité (et la fragilité) fait abstraction de l'effet modérateur des stratégies d'adaptation, tandis que la vulnérabilité renvoie aux impacts qui restent après que les mesures d'adaptation ont été prises en compte" [Kelly et Adger, 2000. Traduit dans Lemmen et Warren 2004 : 19]

"Être vulnérable, c'est être physiquement exposé à un aléa, c'est présenter une certaine fragilité face au danger en plus de ne pas envisager, ou mal envisager les moyens disponibles pour affronter la crise" [Maret et Cadoul, 2008 (1) : 105]. Ainsi, un système qui serait jugé comme étant relativement sensible aux aléas ne serait pas forcément vulnérable s'il a une grande capacité d'adaptation [Lemmen et Warren, 2004]. Donc pour analyser la vulnérabilité d'un milieu, il faut aussi connaître ses moyens/mécanismes d'adaptation (tant structurel/physique que non-structurel/ règlement, normes, directives, programmes, etc.).

Cette définition est importante car elle permet de comprendre notre approche méthodologique. Les communautés urbaines sont des systèmes dynamiques. Une atteinte à une des composantes du système peut déséquilibrer d'autres composantes via l'effet domino. La vulnérabilité des systèmes urbains implique donc d'intégrer les notions de temps, d'imbrication d'échelles et de chaînes d'interactions.

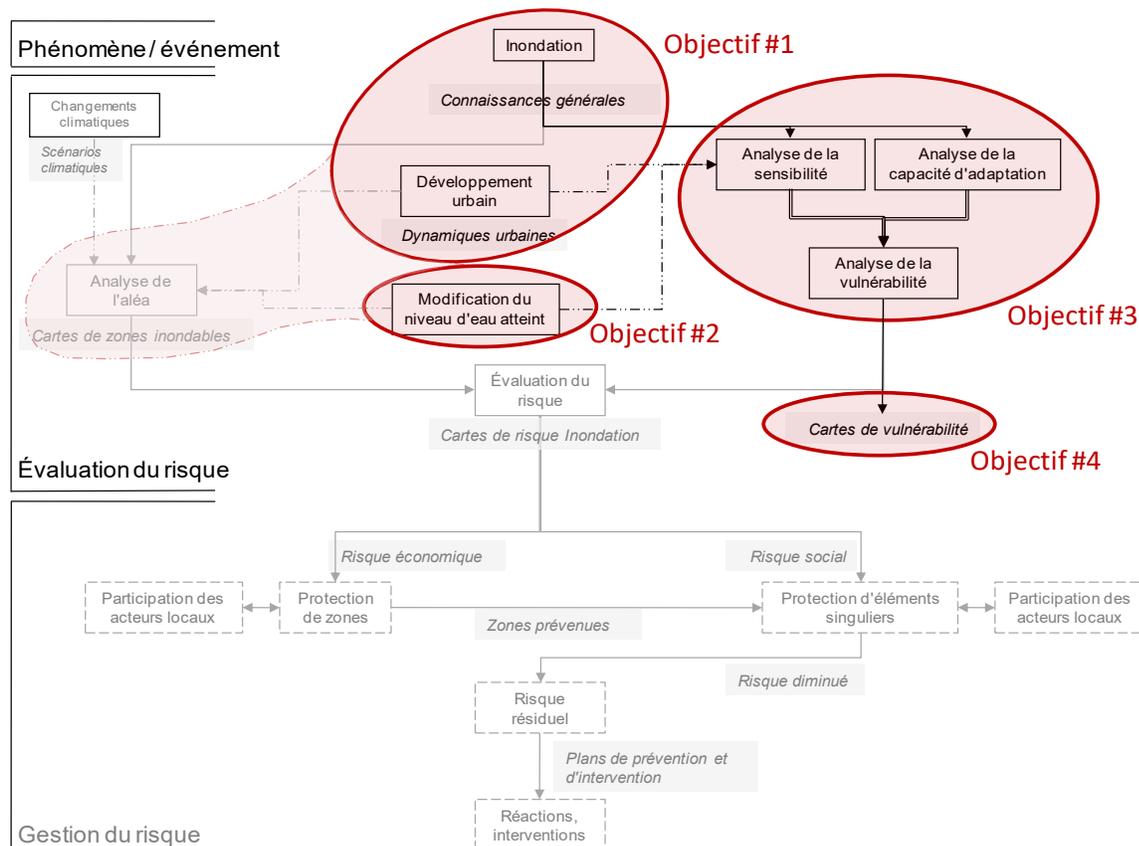
3.2. Cadre théorique – méthodes

Le cadre théorique présenté ici se veut une base pour bien comprendre les méthodes utilisées pour développer notre propre méthode d'analyse de la vulnérabilité sociétale et territoriale aux inondations en milieu urbain dans le contexte des changements climatiques. Méthode développée également pour susciter la réflexion quant à la résilience des milieux urbains aux aléas climatiques. Si la méthode novatrice développée se situe au sein d'une revue exhaustive de la littérature, sa mise en pratique est soumise à des difficultés d'ordre technique et politique. Les expériences réalisées et les leçons tirées sont toutefois très encourageantes. C'est enfin une méthode qui tente de rallier les intérêts des acteurs de l'adaptation, tant chercheurs, que gestionnaires, décideurs ou opérateurs.

La figure 2 représente une méthode d'analyse de la vulnérabilité sociétale et territoriale aux inondations en milieu urbain dans le contexte des changements climatiques. Dans le cadre de notre projet, une partie de la première étape d'«Évaluation du risque» sera traitée.

L'aléa sera bien sûr pris en compte puisqu'on traite d'inondation, mais il n'y aura pas d'analyse de l'aléa au sens littéral du terme, c'est-à-dire en tant que détermination de l'extension spatiale, de l'intensité (vitesse, volume, hauteur, etc.) et des processus d'endommagement du phénomène naturel pour différentes périodes de retour. En effet, l'analyse de l'aléa fait actuellement l'objet d'autres initiatives en cours au gouvernement du Québec. Les cartes qui en résultent sont par ailleurs contestées puisque certains acteurs considèrent le risque qui en découle surestimé et injustifiée produisant des effets inacceptables sur leur territoire. La cartographie apparaît alors comme un enjeu central dans la mesure où les cartes des zones inondables s'avèrent "porteuses d'un pouvoir" (Donze, 2002). Des travaux en ce sens pourront aussi faire l'objet de travaux futurs associés à ce projet.

Figure 2 – Schéma de la méthode d'analyse du risque inondation



3.2.1 Méthodes de la sensibilité / capacité d'adaptation / vulnérabilité

SENSIBILITÉ

Méthode d'analyse de la sensibilité sociétale

La question des risques suscite depuis de nombreuses années des recherches tant théoriques qu'empiriques. L'intégration des enjeux liés aux changements climatiques est récente et entraîne le développement de nouvelles méthodes d'analyse. Les recherches ont premièrement été basées sur la compréhension de l'aléa et de ses conséquences. Si on se concentre sur la littérature nord-américaine, on note une évolution importante du modèle théorique. Ainsi, dans les années 40, les chercheurs utilisaient une approche basée surtout sur l'exposition aux risques où l'aléa avait une place centrale [White et Hass, 1975]. Dans les années 70, les recherches s'orientent vers les causes de la vulnérabilité [O'Keefe et al, 1976] afin d'identifier et d'analyser les éléments vulnérables.

Les auteurs utilisent communément le terme de vulnérabilité. Nous substituons dans cette partie le terme de sensibilité à celui de vulnérabilité pour les besoins de notre démarche². Blaikie et al proposent dans le livre *At Risk*, en 1994, une description des facteurs humains de la sensibilité. En 1996, Cutter développe un modèle basé sur des études de cas présentant l'interaction entre l'exposition et la sensibilité sociale. Si cette analyse ne permet pas de comprendre les causes de la sensibilité sociale, elle présente une méthode empirique intéressante et des techniques géo spatiales avancées.

En Europe, plusieurs approches visant à mieux cerner la sensibilité ont été élaborées. Parmi celles-ci, on trouve l'approche en termes d'indicateurs de sensibilité [Theys, 1987], l'approche classique de la sensibilité [Chaline et Dubois-Maury, 1994], l'approche en termes de facteurs de sensibilité [D'Ercole et J.C.Thouret, 1996], par l'endommagement [Pigeon, 2002], en termes de sensibilité sociétale [Becerra et Peltier, 2009], de sensibilité active ou encore de sensibilité territoriale par enjeux [D'Ercole, Metzger, 2009].

Les recherches sur la sensibilité ont pu tendre à se concentrer sur un aspect spécifique, que ce soit le caractère sociétal [Cutter et al, 2000], économique [Larue et Campuis], fonctionnel et technique [Thouret et d'Ercole, 1996], institutionnel, voire environnemental [Kok et al, 2006]. Les échelles des études varient également, allant de la région métropolitaine, au quartier. Les questions de sensibilités directe et indirecte sont aussi soulevées.

Certaines approches privilégient des méthodes uniquement quantitatives [Cutter et al, 2003], alors que d'autres sont plutôt basées sur des analyses plus qualitatives. Les approches actuelles tentent de plus en plus de prendre en compte la variabilité climatique et à développer des indicateurs quantitatifs pour évaluer la sensibilité dans ces contextes [Leichenko et O'Brien, 2002 ; Ericksen et Kelly, 2007], mais ces approches sont encore difficiles [Cutter et al, 2009]. De nombreux chercheurs utilisent la notion de système dans leur définition de la sensibilité. Pourtant, les études demeurent assez fragmentées.

Parmi les méthodes quantitatives d'analyse de la sensibilité sociétale, nous avons choisi d'utiliser en partie la méthode de Cutter. Dès 2000, cette chercheuse américaine développe neuf indicateurs pris dans une revue exhaustive de la littérature afin de quantifier la sensibilité sociale des populations vivant dans les zones à risques de Georgetown County en Caroline du Sud [Cutter et al, 2000]. En 2003, Cutter et al développent le "Social Vulnerability Index (SoVI)". Cet indice implique un algorithme mathématique solide et un nombre important d'indicateurs variés et significatifs. Chaque indicateur a un poids et est cartographié dans un SIG afin d'obtenir une carte de sensibilité sociétale. À ce stade, nous avons choisi de modifier cette étape de la méthode et d'ajouter un atelier multi acteurs pour intégrer la participation de chercheurs et acteurs locaux tant dans la validation des indicateurs que dans le choix de la pondération. Cette étape permet entre autres une participation et une validation des choix. Elle permet également l'échange de points de vue complémentaires et le partage des connaissances. L'objectif est ensuite de traduire les résultats sur des cartes qui permettent aux acteurs locaux de prendre conscience de la sensibilité des populations dans la zone à risque.

² Dans les citations, le mot vulnérabilité à été changé pour sensibilité mais laissé en police régulière (non mis en italique), et précédé et suivi de trois points de suspension.

Dans notre projet, nous développons donc une méthode pilote qui permet d'explorer les sensibilités sociétales des communautés dans le contexte des changements climatiques tout en intégrant la participation des acteurs locaux. Cependant, l'analyse de la vulnérabilité ne se réduit pas à cette étape. Il est ensuite essentiel d'intégrer les aspects liés à la sensibilité territoriale.

Méthode d'analyse de la sensibilité territoriale³

Les recherches visent à analyser la sensibilité aux aléas dans le contexte des changements climatiques en comprenant le caractère indirect des impacts et en intégrant une dimension systémique dans les analyses. Nombre de chercheurs utilisent la notion de système dans leur définition et leur approche pour étudier la sensibilité. On pourra alors qualifier cette sensibilité de territoriale.

D'après Thouret, la sensibilité [2002, p. 507] est un «*concept complexe qui comprend de multiples facteurs structuraux, conjoncturels et géographiques*». Cette complexité et les interrelations qui la caractérisent amènent d'ailleurs à utiliser le terme de «système» [Guigo et al, 2002]. Ce système est «*articulé autour d'un grand nombre de variables, naturelles et humaines, dont la dynamique dans le temps et dans l'espace peut engendrer des situations plus ou moins dangereuses pour une société exposée*» [D'Ercole, 1994, p. 87].

Certains auteurs comme Chardon (1994), Guigo et al. (2002), Lindley et al. ou encore D'Ercoles et Metzger (2009) développent un système d'analyse de la sensibilité territoriale à différentes échelles, basé sur une approche par enjeux. La prise en compte de la complexité territoriale aidée des performances accrues des systèmes d'informations géographiques [Robin, 2002] amène à créer une définition de la sensibilité adaptée à chaque territoire.

D'Ercoles et Metzger (2009) montrent que la sensibilité d'un territoire peut s'appréhender par la sensibilité de ses enjeux majeurs. La carte de sensibilité territoriale désigne des lieux particulièrement sensibles qui entraînent une fragilité pour l'ensemble d'un territoire. Selon les auteurs, ce concept de la sensibilité territoriale est basé sur l'idée "*qu'il existe au sein de tout territoire des éléments localisables susceptibles d'engendrer et de diffuser leur vulnérabilité à l'ensemble du territoire, provoquant des effets qui peuvent perturber, compromettre, voire interrompre son fonctionnement et son développement*" [D'Ercole et Metzger, 2009]. Ces éléments constituent les enjeux majeurs qui sont utilisés pour analyser la vulnérabilité territoriale. Les enjeux majeurs sont "*ces éléments clés qui permettent à l'ensemble d'un territoire de fonctionner de se développer et de faire face à une situation d'urgence*" [D'Ercole et Metzger, 2009].

Les sélections effectuées par les auteurs concernant le choix des outils de collecte de données et d'analyse sont basées sur «*le principe que la notion de la... sensibilité ...territoriale découle de l'idée qu'il existe une solidarité de fait entre enjeux majeurs et territoire*» [D'Ercole et Metzger, 2009]. Quatre étapes différentes sont décrites afin d'arriver à une carte finale de la sensibilité territoriale:

1. L'identification des enjeux majeurs et des lieux stratégiques du territoire;
2. L'analyse détaillée de la sensibilité de ces enjeux et lieux;
3. La cartographie des lieux sensibles du territoire (selon leur exposition et leur accessibilité) et ;
4. La construction de la carte de la sensibilité territoriale, en synthétisant les trois types d'information spatiale ci-dessus (la localisation des enjeux majeurs, leur sensibilité et la sensibilité spatiale du territoire).

Cette approche constitue un outil pour les autorités qui peut les aider à identifier les territoires à protéger et les rendre plus résilients en priorité, non seulement dans le cas d'un aléa, mais en tout temps. Cependant, cette approche ne pourrait pas être utilisée sans une identification des caractéristiques classiques de la sensibilité spatiale d'un lieu (les caractéristiques biophysiques et sociales). Cette démarche permet ainsi d'identifier les espaces sensibles et aussi les lieux susceptibles de propager la sensibilité au sein du territoire. Cette méthode est complémentaire de l'analyse de la sensibilité sociétale et permet de cartographier les lieux dont dépend la sensibilité de l'ensemble du territoire.

³ Sylvain Pouzet a contribué à cette partie de la recherche. Il a été assistant de recherche pour le projet et termine actuellement sa maîtrise à l'Institut d'Urbanisme sur la thématique des risques sous la direction d'Isabelle Thomas-Maret.

Enfin, la méthode que nous développons est en accord avec le fait que la vulnérabilité dépend de la capacité d'adaptation des communautés. Provitolo (2003, p. 2) explique ainsi que la "*vulnérabilité n'est pas une somme de variables désagrégées mais un état sans cesse modifié par l'action humaine. Elle dépend de la capacité de réponse des sociétés. Il est alors possible de parler de vulnérabilité synthétique*". La suite de la recherche implique donc un travail sur la capacité d'adaptation afin de pouvoir faire un état de la vulnérabilité des populations.

CAPACITÉ D'ADAPTATION

Le concept de capacité d'adaptation, qui trouve son origine dans les sciences naturelles, a été appliqué à des disciplines aussi diverses que la psychologie et la botanique, ce qui souligne l'importance du contexte d'application pour éviter les possibilités de glissement de sens. Rappelons que nous comprenons ici la capacité d'adaptation comme étant la faculté des populations ou des systèmes naturels de diminuer les impacts négatifs potentiels d'un événement donné et/ou d'en augmenter les impacts bénéfiques, en prenant des mesures appropriées [Lemmen et Warren, 2004]. Suivant la formule de Sherrieb, "*les capacités d'adaptation ne sont pas des stratégies spécifiques de préparation à l'urgence, mais plutôt des composantes du tissu social et économique de la communauté*" [Sherrieb, 2010, p. 228].

Tout comme les concepts de vulnérabilité et de sensibilité, la capacité d'adaptation a été l'objet d'une attention scientifique soutenue au cours des deux dernières décennies. Cette attention a engendré un foisonnement de définitions, dont certains critiques ont relevé qu'elles étaient parfois concurrentes ou entretenaient un certain flou [Hinkel, 2011, p. 199], ce qui ne simplifie pas la comparaison entre les différentes recherches publiées sur le sujet.

Il appert à la lumière de la revue de la littérature qu'une question centrale dans ce champ d'étude est celle de l'échelle d'analyse. En effet, les auteurs ayant abordé la capacité d'adaptation face aux risques ou aux changements climatiques l'ont fait initialement à l'échelle d'un pays entier. Une des études phares du domaine, celle de Smit et Pilifosova (2003), a édicté une série de grands déterminants pour la capacité d'adaptation : 1. Ressources économiques; 2. Technologie; 3. Information et compétences; 4. Infrastructures; 5. Institutions; 6. Équité. Cette étude et celles qui s'en sont directement inspiré proposaient une méthode s'appliquant à des pays ou des régions, et utilisaient des indicateurs macroéconomiques ou socioéconomiques tels que le PIB par habitant, l'IDH ou encore la part d'investissements en technologie, recherche et développement dans l'économie [Cutter, 2010, p. 14 ; Hinkel, 2011, p. 201].

La critique la plus sérieuse de ce corpus d'études utilisant des indicateurs pour évaluer la capacité d'adaptation ou la vulnérabilité nous vient probablement de Hinkel (2011). Cet auteur remet en doute la valeur scientifique et l'utilité pour les décisions politiques de ce type d'étude à grande échelle. L'utilité d'études basées sur des indicateurs ne vaut selon lui que si elles sont réalisées à partir de données statistiques portant sur un territoire limité qui puisse prendre en compte les plus petites variations locales [Hinkel, 2011, p. 202], ce qui est le cas de notre étude.

Certaines des études initiales étaient basées sur une méthodologie non divulguée et reposaient beaucoup sur des jugements d'experts [Hinkel, 2011 : 202]. D'autres critiques ont souligné l'échelle de temps des analyses de la capacité d'adaptation, de même que les difficultés méthodologiques d'évaluer scientifiquement les interactions entre les nombreuses variables de systèmes complexes [Patt, 2005, p. 413]. Au fil du temps, pourtant, les critiques comme celles de Hinkel deviennent de moins en moins fondées, car plusieurs auteurs spécialisés dans la capacité d'adaptation se sont efforcés de renforcer les assises scientifiques de leur champ d'étude. Polsky (2007) a par exemple proposé le Vulnerability Scoping Diagram (VSD), qui se veut un modèle des différents aspects de la vulnérabilité en phase avec les définitions les plus répandues (sensibilité-aléa-capacité d'adaptation). Une des forces de ce modèle est qu'il permet d'appliquer une grille d'analyse qui se veut à la fois générale et adaptable aux spécificités de chaque situation, ce qui augmente son pouvoir explicatif.

Keskitalo (2011) a mis à l'épreuve les déterminants de la capacité d'adaptation de Smit et Pilisofova (2001) dans le contexte de régions nordiques de pays à l'économie développée (Russie, Canada et pays scandinaves). Ils concluent entre autres que l'existence de ressources économiques en soi ne se traduit pas nécessairement par une plus grande capacité d'adaptation, et que la capacité d'adaptation établie selon les déterminants précités n'est pas nécessairement répartie équitablement au sein de la société. Ils rappellent parallèlement que des attitudes inadéquates face au risque ou encore la présence de nombreuses infrastructures peuvent être le talon d'Achille de régions développées, et augmenter la vulnérabilité. Cette étude appuie donc notre choix de nous concentrer à une échelle plus réduite pour ce type d'évaluation, car ce niveau d'analyse permettra de prendre en considération les plus petites variations locales entre les différentes populations et juridictions du territoire.

Tol et Yohe proposent pour leur part l'hypothèse dite du maillon faible (*weakest link hypothesis*) Selon eux, *"la capacité d'adaptation de tout système confronté à un vecteur de stress externe peut être expliqué par le plus faible de ses déterminants sous-jacents"* [Tol et Yohe, 2007, cité dans Keskitalo, 2011, p. 580]. Certains ont déjà attiré l'attention sur les failles du tissu institutionnel à réduire l'exposition et ainsi à protéger la capacité d'adaptation existante dans une zone contiguë à notre zone d'étude. L'étude de Benoit Robert (2003), fait état des importantes limites de l'application des politiques de mitigation des inondations basées sur la désignation de zones inondables. L'auteur concluait que, tout comme ailleurs au Canada, ces politiques *"n'avaient eu aucun impact sur l'occupation des plaines inondables et n'avaient réduit ni les dommages dus aux inondations, ni même l'augmentation de ces dommages"* [Robert, 2003, p. 284]. Ainsi, la composante institutionnelle semble d'emblée connaître là une limite majeure. Il est important de souligner par contre qu'en raison des interconnexions existant entre les variables, l'hypothèse du maillon faible est très difficile à tester de façon empirique [Keskitalo, 2011, p. 580].

Suivant le constat de Sherrieb et al. (2010), *"les capacités d'information/communication de même que la cohésion d'une communauté sont plutôt caractérisées par des processus (ex. : la formation de réseaux de communication, la prise de décision, la création de consensus), qu'il est possible de mesurer, mais pas au moyen de données d'archives secondaires. (...) étant donné notre échelle d'analyse restreinte, il est donc essentiel afin de tester le modèle de reconnaître l'importance de colliger des données originales afin de pouvoir mesurer la cohésion communautaire et les capacités d'information/communication"* [Sherrieb, 2010, p. 228]. Eakin et Lemos [2006, cité dans Keskitalo, 2011, p. 581] proposent une approche semblable, mais avec une emphase un peu plus marquée sur les éléments du contexte institutionnel que sur les communications.

Les considérations soulevées par ces auteurs nous ont donc amenés à créer une méthode d'analyse faite pour être appliquée à un territoire restreint. Elle est basée sur un indice synthétique représentant la capacité d'adaptation (ou l'adaptation dans certains cas) des communautés riveraines au risque d'inondations, qui intègre des éléments à la fois socioéconomiques, territoriaux, et liés au contexte institutionnel. Cet indice fait ainsi le pont entre les portraits de la sensibilité décrits plus haut et l'analyse de la vulnérabilité proprement dite.

VULNÉRABILITÉ

Le but de cette partie est de fournir un aperçu de l'existant en matière de travaux sur les indices de vulnérabilité, sans du tout prétendre à l'exhaustivité.

L'analyse de la vulnérabilité est de plus en plus retenue comme un des éléments clés de la diminution des risques et de la résilience aux événements extrêmes [Birkmann, 2006].

La dernière décennie a vu naître de multiples travaux sur l'analyse de la vulnérabilité. La majorité des démarches sont basées sur l'analyse statistique, sur les systèmes d'information géographique (SIG), sur des calculs d'endommagement, et dernièrement sur le développement d'indices synthétiques. Ces

démarches tiennent compte souvent, et sont parfois dépendantes de l'échelle géographique et de la nature de la vulnérabilité, des différents aléas, des changements climatiques, de l'environnement, d'une crise économique, etc.

Avant d'analyser la vulnérabilité, il faut d'abord s'entendre sur une définition, même au sens large. Il en existe plusieurs et nous avons opté pour celle mentionnée en III.1 : "*La vulnérabilité est une notion liée à l'exposition d'un système aux impacts climatiques, à la sensibilité de ce système ainsi qu'à sa capacité de s'adapter*".

Les discussions, échanges, écrits actuels sur le sujet témoignent nettement que la vulnérabilité comprend plusieurs dimensions : physique, économique, sociale, environnementale et institutionnelle, dont il faut tenir compte lors de l'analyse. D'où la complexité à analyser la vulnérabilité, comme le rappelle S. Beccera (2010), quand il est question d'expliquer en détail comment les systèmes (sociaux, écologiques, politiques, etc.) sont liés et comment ils agissent et s'influencent mutuellement.

Comme le mentionne S. Beccera, "*La définition très simple que Plate donne d'un indice de vulnérabilité comme étant «un facteur converti en nombre» permet de s'accorder sur la démarche à suivre : identifier des facteurs de vulnérabilité / adaptabilité et leur donner une valeur numérique ; Cependant certains facteurs qualitatifs échappent à ce type de valorisation*" [Beccera, 2010, p. 143]. Ainsi, le terme *analyse* semble aller au-delà du terme *mesure* tentant d'intégrer autant les indicateurs quantitatifs que qualitatifs.

"*Les indicateurs et indices cherchent à représenter une réalité complexe ou un concept abstrait avec des valeurs sommaires. Un bon indicateur ou indice devrait alerter les décideurs d'un problème avant qu'il ne devienne trop difficile à corriger (...) Un indice est une valeur numérique sommaire renseignant sur le statut relatif de l'élément à risque auquel on s'intéresse*" [Pelling, 2004, p. 26].

Par ailleurs, différents auteurs [Gleyze, et Reghezza (2007), Beccera (2010), Cutter (2009), Leone et Vinet (2006), D'Ercoles et Metger (2009)] soulignent l'importance de rapprocher le processus d'analyse de la vulnérabilité et les résultats de cette analyse. En quoi les deux sont utiles aux décideurs, aux acteurs impliqués dans la prévention des risques, dans l'adaptation aux changements climatiques ? Il faut s'interroger sur l'utilité de l'analyse de la vulnérabilité, voir par exemple dans une approche participative les avantages en terme de sensibilisation des participants à l'existence de leurs propres capacités, etc. "*En outre, l'usage de méthodes telles que la télédétection ou les enquêtes par questionnaires sont des premiers pas importants pour comprendre la vulnérabilité mais ne suffisent pas pour comprendre en profondeur le couplage des dynamiques socio-environnementales et pour comprendre comment le pouvoir politique et économique aux niveaux nationaux et internationaux affectent la vulnérabilité au niveau local*" [Beccera, 2010, p. 146].

Beccera (2010) souligne que Birkmann (2007) et Pelling et al. (2004) produisent chacun une revue de littérature sur la construction d'indicateurs (de risque et vulnérabilité). Reghezza (2006) et plusieurs autres ont également travaillé à ce genre d'inventaire.

Ce qui ressort, pour Birkmann, est que l'une des principales difficultés liées au développement d'indices pour analyser la vulnérabilité est la négligence de rédiger des objectifs clairs en matière de réduction de la vulnérabilité "*One of the major problems in the future development of indicators and tools to measure vulnerability and risk is the absence of clear goals of risk and vulnerability reduction*" [Birkmann, 2007, p. 30].

Il mentionne également, et nous l'avons constaté, que les données, leur disponibilité, leur actualisation, leur échelle, etc. sont aussi une difficulté importante lorsqu'il est question de développer des indices. Le véritable risque est alors de développer des indices en fonction de la disponibilité des données plutôt qu'en fonction des besoins réels [Birkmann, 2007].

Pelling (2004) renchérit sur la nécessité de réfléchir aux indices en amont des données, des formules, des calculs. Il se questionne sur l'échelonnement des indices, comment un même indice peut-être utilisé à différentes échelles ? Est-ce toujours possible ? Il s'interroge également sur leur contextualisation, comment exprimer le concept de vulnérabilité en indices quantitatifs et/ou qualitatifs

Selon une revue de littérature produite par Turner (2003) et selon son expérience quant au développement du cadre théorique sur l'analyse de la vulnérabilité, il nous rappelle qu'un consensus sur la vulnérabilité suggère que l'utilité de son analyse augmente quand :

- L'accent mis sur la vulnérabilité est ancré dans un système socio-économique/biophysique;
- La complexité, la connectivité et la nature itérative de ses composants sont reconnues;
- Sont soulignés/reconnus les problèmes d'emboîtement d'échelle, mais en même temps quand l'analyse permet une meilleure compréhension de la vulnérabilité pour un endroit donné;
- Elle attire l'attention sur la dynamique du système socio-économique/biophysique et sur les autres dangers potentiels qui pourraient affecter ce système en plus de l'aléa principalement considéré;
- Elle facilite l'identification d'interactions critiques

Reghezza (2006b) propose d'adopter une démarche synthétique, afin de pouvoir intégrer la vulnérabilité aux opérations, aux politiques de gestion et surtout pour souligner la complexité de la question. D'Ercoles et Metzger (1999), André Dauphiné (2003) et le Allen Consulting Group ont travaillé à l'évolution de la définition de cette vulnérabilité synthétique. Reghezza traduit ces réflexions, la vulnérabilité synthétique est *"la fragilité d'un système dans son ensemble, et de manière indirecte, sa capacité à surmonter la crise provoquée par un aléa. Plus un système est apte à se rétablir après une catastrophe, moins il est vulnérable. La vulnérabilité synthétique peut également s'exprimer en terme de résilience : moins un système est vulnérable, plus il est résilient."* [Reghezza, 2006b, p. 38]. Cette démarche synthétique ne renonce pas aux autres méthodes employées, jugées plus analytiques, au contraire elle s'en nourrit et tente d'intégrer de nouvelles solutions davantage centrées sur la société [Reghezza 2006a] et les besoins des décideurs.

Cette démarche synthétique entraîne un certain mouvement des cadres théoriques des recherches traitant des changements climatiques. Le fait qu'elle puisse être utilisée, peu importe l'aléa impliqué, tout en s'arrimant à un contexte où souvent les chercheurs (et sur un plan plus opérationnel les décideurs et gestionnaires) doivent négocier avec l'incertitude intrinsèque aux changements climatiques, rend cette démarche fort pertinente.

3.2.2 Méthodes hydrologiques

MODÉLISATION HYDRAULIQUE

La modélisation hydraulique est utilisée pour simuler les écoulements d'un cours d'eau afin de prédire le rehaussement induit par des événements hydrologiques extrêmes qui sont responsables des épisodes d'inondation. La méthodologie de conception d'un modèle hydraulique suit généralement la démarche suivante :

- Privilégier l'approche la plus simple pour résoudre le problème de rehaussement du niveau d'eau (la moins coûteuse en données et en temps ingénieur)
- Se préoccuper de la qualité des données
- Avoir la connaissance hydraulique nécessaire pour pouvoir analyser les résultats des simulations.

L'art de la conception d'un modèle numérique adéquat exige donc une bonne connaissance des phénomènes physiques qui caractérisent l'événement extrême responsable de l'inondation et de la technique de mise en œuvre des simulations numériques. Il est donc nécessaire de bien connaître les hypothèses de mise en marche de l'outil numérique à utiliser. Le découpage du cours d'eau en biefs permet de modéliser les apports intermédiaires. Si nécessaires, les coefficients de débit des ouvrages doivent être calés sur des mesures de terrain. La modélisation introduit très souvent des simplifications de la réalité, pour parvenir à des modèles numériques variés.

Il existe principalement deux types de modélisation hydraulique : la modélisation unidimensionnelle (1D) et la modélisation bidimensionnelle (2D). Le premier type considère des écoulements unidirectionnels suivant le courant. Les modélisations 1D sont les plus utilisées et adaptées pour les

cours d'eau ayant un sens d'écoulement privilégié. Dans le cas où le cours d'eau est le siège d'écoulements latéraux secondaires, il est possible de modéliser ce type d'écoulement en maillant le modèle 1D. Un modèle 1D maillé permet donc de simuler des écoulements multiples certes, mais toujours unidirectionnels. Les modèles 1D ne sont pas capables de modéliser tous les types d'écoulements avec la même efficacité. Un nombre de Froude élevé (> 0.5) engendre des problèmes de calcul. Les logiciels les plus courants ont des problèmes pour les passages en torrentiel et lorsque les écoulements sont sur fond sec. Ces problèmes sont particulièrement présents dans le cas de réseaux maillés complexes [Baume et Belaud, 2007].

La modélisation bidimensionnelle considère des écoulements multidirectionnels. Ce type d'écoulement est plutôt observé dans les rivières de plaine lorsque la pente des cours d'eau est faible. Les rivières sont alors caractérisées par un lit majeur très large et un réseau hydrographique complexe, ce qui entraîne des écoulements multidirectionnels en période de hautes eaux [Marant, 2004].

Certains logiciels permettent de construire un troisième type de modèle qui couple des modèles unidimensionnels avec des modèles bidimensionnels. Dans ce type de modèle, le lit mineur des rivières est défini par un modèle unidimensionnel et le lit majeur est modélisé par un modèle bidimensionnel. Le couplage peut apparaître très intéressant si on dispose de données précises de la morphologie bathymétrique du cours d'eau. Malheureusement, la modélisation bidimensionnelle exige plus de temps et de technicité autant d'un point de vue de la construction du modèle que de la simulation hydraulique. Il est donc naturel de se demander si une modélisation 1D ne suffit pas pour établir des cartes d'inondation même dans des zones où la modélisation 2D serait plus apte à simuler les phénomènes ? Autrement dit, la modélisation 2D est-elle rentable d'un point de vue de la précision des résultats par rapport au temps et à l'argent dépensé pour modéliser un tronçon ? Le choix d'un logiciel est le plus souvent guidé par les questions relatives à la vitesse de la crue et à la nature de l'événement critique [Baume et Belaud, 2007]. En effet si la crue est lente, un modèle permanent peut suffire, en revanche les crues rapides répondent à un événement transitoire. De même que si l'on n'a pas affaire à des débordements, alors un modèle 1D peut suffire. Il reste que les deux types de modèles ont de grandes difficultés à modéliser les chocs hydrauliques, les propagations sur fond sec et les passages du régime fluvial en régime torrentiel.

COMPARAISON DES MODÈLES

À défaut d'avoir une certitude sur le modèle numérique à utiliser pour une étude sur les inondations, on utilise souvent plus d'un modèle numérique et on procède à la comparaison des résultats. C'est ce qu'ont fait Horritt et Bates (2002) qui ont analysé différents épisodes d'inondation sur une rivière de 60 kms au Royaume-Uni. Trois modèles hydrauliques ont été construits à l'aide des logiciels unidimensionnel HEC-RAS (unidimensionnel), bidimensionnel *Lisflood* (2012), et *Telemac2D* (2012). Cette étude a permis de mettre en évidence l'efficacité du modèle HEC-RAS pour ce qui est de la simulation des surfaces inondées. *Telemac2D* est également efficace mais un peu moins que HEC-RAS et le logiciel *Lisflood* apparaît plus limité. Selon les conclusions de l'étude, les écarts observés s'expliquent par une réactivité différente des logiciels vis-à-vis de la rugosité.

4. Méthodologie/ données

4.1. État des lieux des inondations historiques

Objectif 1 : *Réalisation d'un état de lieux des zones inondées historiquement pour la Ville de Montréal. Cet état des lieux permettra de documenter et de faire des liens entre les niveaux maximums d'eau atteints historiquement par la rivière des Prairies, les territoires submergés (occupation) à ces moments significatifs, et les cartes des zones inondables définies dans les documents officiels.*

4.1.1. Présentation de la zone d'étude

-Hydrologie et topographie

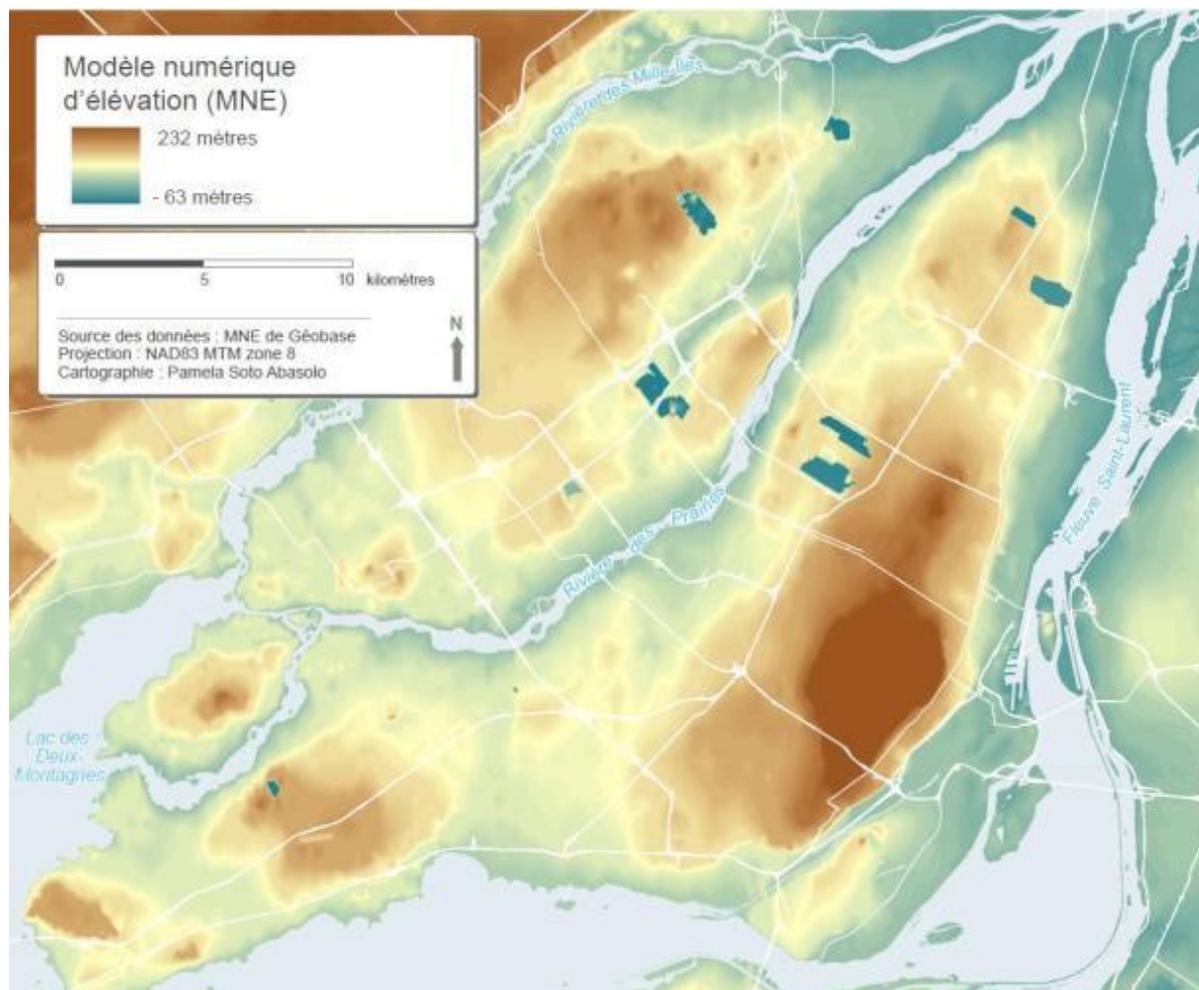
La rivière des Prairies est principalement alimentée par la rivière des Outaouais, à travers le lac des Deux-Montagnes. Elle encadre l'île Bizard et borde la rive nord de l'île de Montréal, séparant celle-ci de l'île Jésus (Laval). Seule la portion située sur l'île de Montréal a toutefois été considérée aux fins de la présente étude, comprenant en partie les arrondissements montréalais de Pierrefonds-Roxboro, Ahuntsic-Cartierville, Montréal-Nord et Rivière-des-Prairies-Pointe-aux-Trembles.

Le bassin versant de la rivière remonte très au nord jusqu'aux sources de l'Outaouais pour couvrir un territoire de 146 000 km², ce qui en fait le bassin versant le plus étendu de l'est du Canada [Benyahya et al. 2009]. La rivière des Outaouais compte à elle seule près d'une centaine de barrages et ouvrages de rétention [CEHQ-a, 2010], dont le plus influent pour le niveau et le débit de la RDP est le barrage hydroélectrique de Carillon, situé à l'entrée du lac des Deux-Montagnes. Propriété d'Hydro-Québec, celui-ci retient 171 000 000 m³ d'eau. La RDP peut de plus être influencée par les niveaux que connaît le fleuve Saint-Laurent [MSP, 2010]. Cette dimension hors du commun permet de prendre la mesure des défis reliés à l'étude de son régime hydrologique, sans oublier la complexité administrative dans la gestion de ses eaux, sur laquelle nous reviendrons plus loin.

La RDP compte pour sa part un barrage au fil d'eau, Centrale de la Rivière-des-Prairies, exploité par Hydro-Québec depuis sa mise en service en 1930 et qui a une capacité de production de 54 mégawatts. Enfin, notons que dix ponts traversent la rivière afin de relier l'île de Montréal à l'île de Laval, à l'île Bizard et à la région de Lanaudière.

La topographie de la rive est relativement plane, se situant entre 10 et 30 mètres au-dessus du niveau de la mer et ne présente pas dans l'ensemble de dénivellation abrupte (figure 3).

Figure 3 : Carte montrant l'élévation du sol pour Montréal et les régions qui l'entourent.

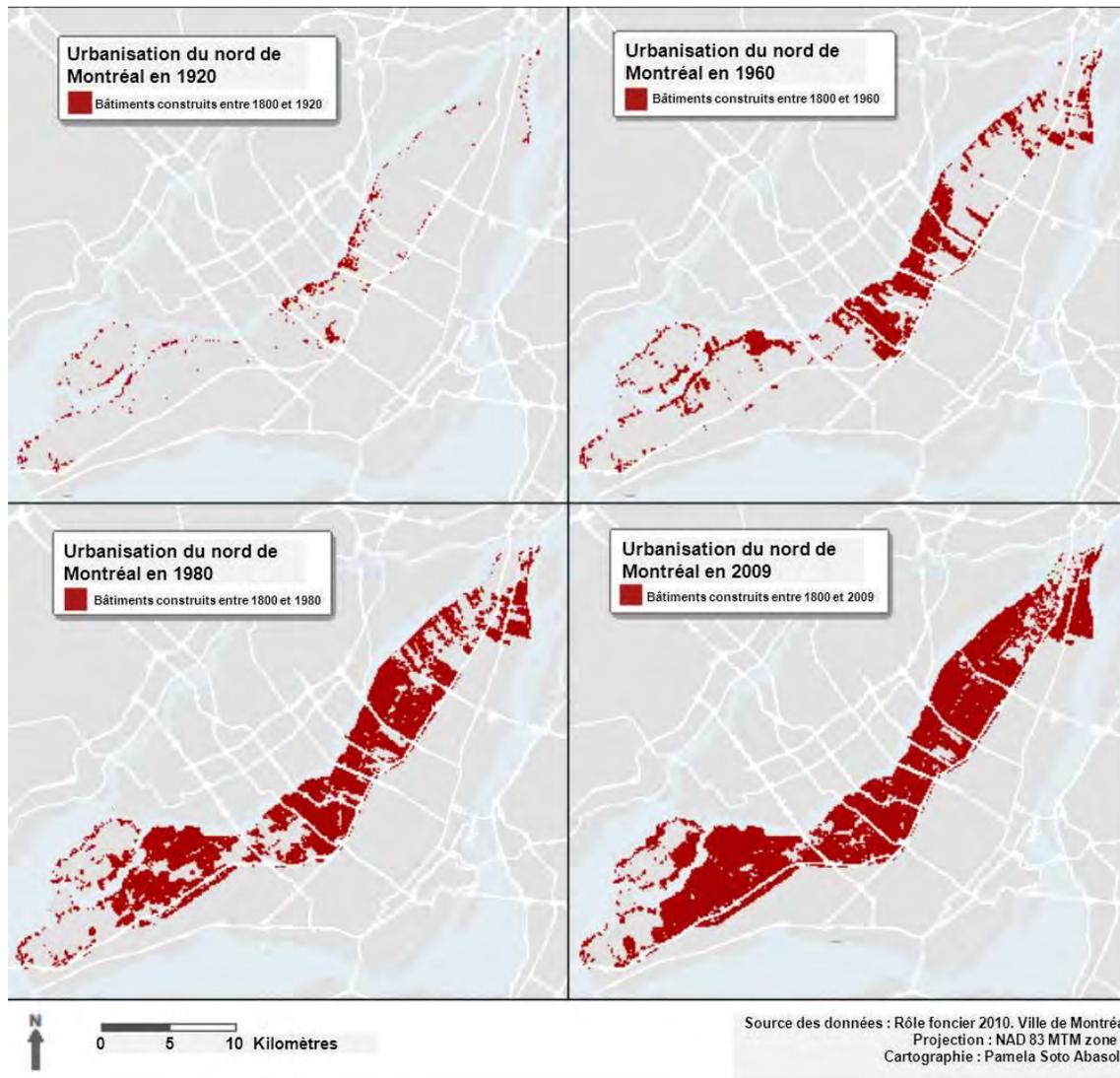


4.1.2. Historique d'urbanisation

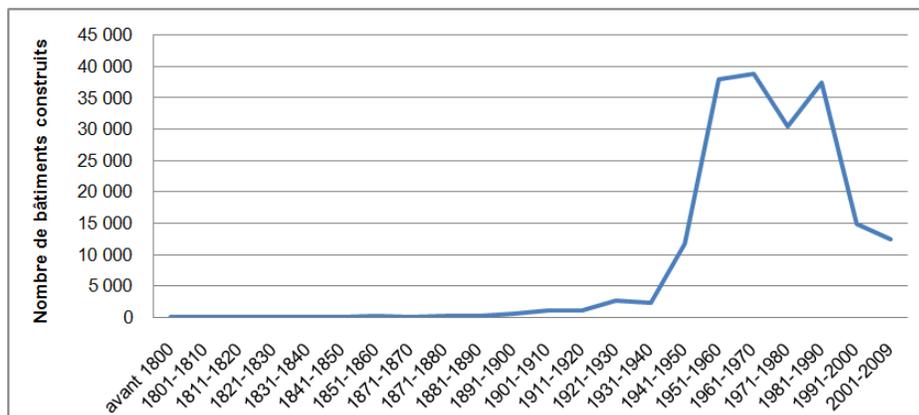
Montréal, ville insulaire, s'est développée dès son origine grâce à son accès aux voies d'eau. Il s'ensuit que certains des lieux d'établissement les plus anciens de l'île se trouvent sur l'axe reliant le Bout-de-l'Isle (aujourd'hui Senneville), à l'ouest, à la Pointe-aux-Trembles, à l'est. Parmi ceux-ci, la "pointe de l'île" (Pointe-aux-Trembles et Rivière-des-Prairies) est habitée dès le XVII^e siècle, Sault-au-Récollet (Ahuntsic), au centre et Sainte-Geneviève dès la première moitié du XVIII^e [Marsan, 1976, p. 55]. Vers 1830, ces paroisses ont pour cœur des villages bien constitués et organisés, reliés entre eux par le chemin de ceinture de l'île [Marsan, 1976, p. 57]. D'autres noyaux villageois se forment à Cartierville (centre), Pierrefonds ainsi qu'à l'Île-Bizard et évoluent en parallèle à la ville-centre de Montréal jusqu'au tournant du XX^e siècle, en raison de leur éloignement relatif.

Afin d'analyser le rythme d'urbanisation dans notre zone d'étude, nous avons observé la date de construction des bâtiments construits au nord de l'île de Montréal depuis l'an 1800 s'arrêtant à quatre périodes soit 1920, 1960, 1980 et 2009 (figure 4). Il est à noter que nous avons retenu le nord de l'île de Montréal (au nord de l'autoroute 40) comme zone d'observation de l'urbanisation principalement à cause des données qui ont été mises à notre disposition par la Ville de Montréal. Aussi, nous pouvons voir dans le graphique 1 le rythme de l'urbanisation par tranche de dix ans entre 1800 et 2009. Selon ces données, l'urbanisation du nord de l'île de Montréal s'accélère dès 1920 jusqu'aux années 1960, et la construction ralentie entre 1980 et 1990.

Figure 4 : Évolution de l'urbanisation dans le secteur nord de l'île de Montréal entre 1920 et 2009.



Graphique 1 : Évolution de l'urbanisation de 1800 à 2009 sur le secteur nord de l'île de Montréal.



Source de données : Ville de Montréal / Réalisé par Pamela Soto Abasolo, 2012

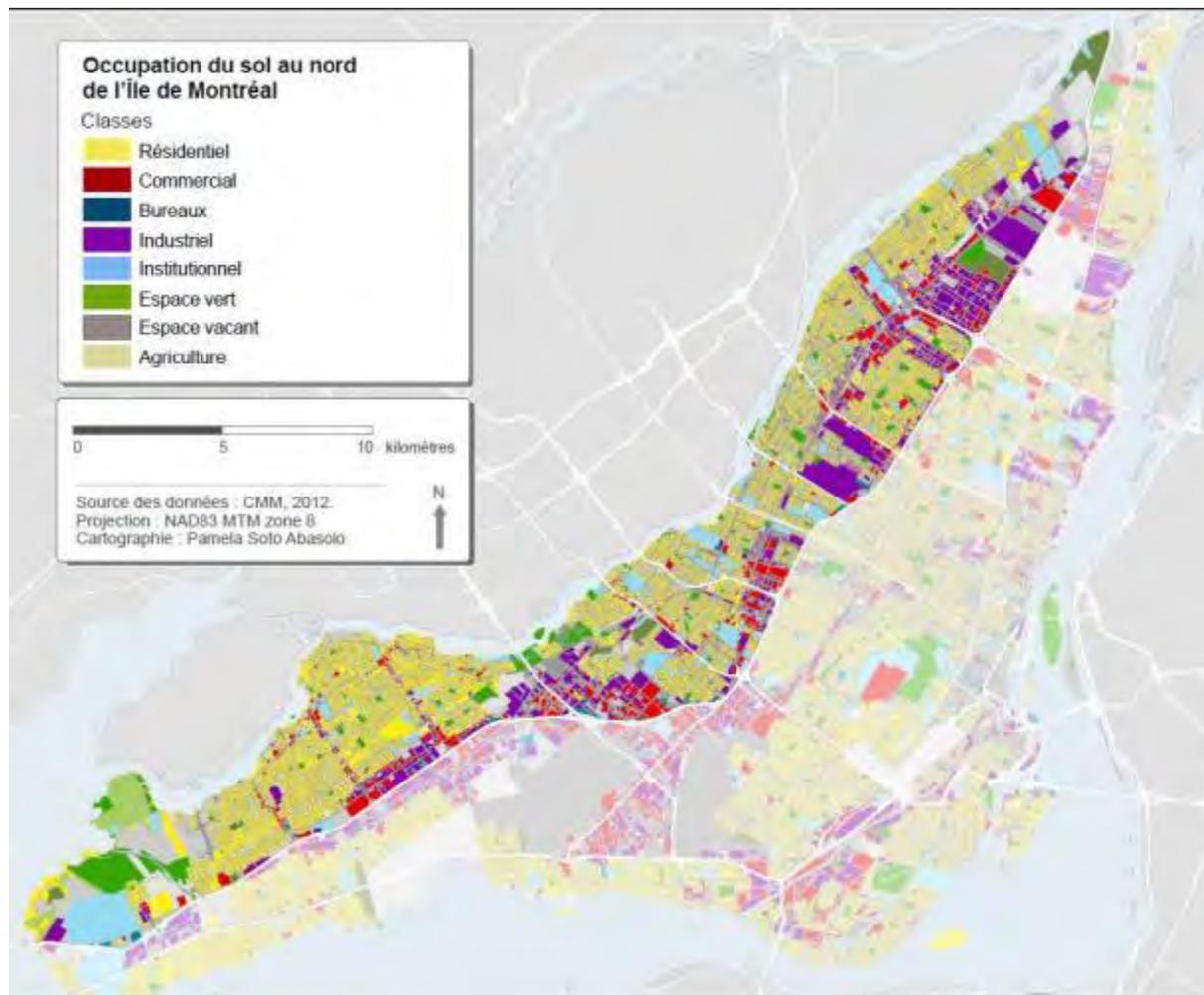
La série des cartes de la figure 4 illustre bien l'évolution de l'urbanisation de la zone d'étude. Pour la majeure partie de celle-ci, un premier essor du développement est causé par la création de lieux de villégiature le long de la rivière. Aux résidences secondaires cossues des environs du Sault-au-Récollet, prisées par la bourgeoisie montréalaise dès la première période, s'ajoutent de nombreux chalets d'été plus modestes à Pierrefonds, l'Île-Bizard, Rivière-des-Prairies, etc. Ces chalets sont souvent construits sur pilotis, et s'exposent à peu de dommages, d'autant plus qu'ils sont majoritairement inoccupés durant les périodes de crues saisonnières [Communication, juin 2011]. C'est aussi à cette époque que le secteur, bénéficiant de vastes espaces tranquilles, se voit occupé par de nombreux établissements à vocation institutionnelle, par exemple les hôpitaux Notre-Dame-de-la-Merci, Sacré-Cœur, les prisons de Bordeaux et Tanguay, ainsi que des couvents et monastères qui contribuent toujours à la valeur de son patrimoine architectural.

Après la seconde guerre mondiale, la promotion de l'accès à la propriété (par la SCHL, entre autres [Mercier, 2006, p. 214] et la démocratisation de l'automobile (68% des ménages montréalais possèdent une voiture en 1971, contre 28% en 1951) [Marsan, 1976, p. 323] propulsent la phase de développement la plus importante pour notre zone d'étude, qui culmine autour des années 1970 (graphique 1). Aux noyaux villageois déjà cités viennent se greffer des maisons unifamiliales caractéristiques des banlieues-dortoir de l'époque, plusieurs remplaçant peu à peu les chalets riverains. Les rives, toujours aussi prisées, se faisant de plus en plus rares, certains secteurs de notre zone d'étude, se voient aussi occupés à partir du milieu des années 1980 par des tours d'habitation, dont de nombreuses résidences pour personnes âgées, principalement dans les arrondissements de Rivière-des-Prairies, Ahuntsic-Cartierville, et Montréal-Nord.

La figure 5 montre l'occupation du sol de la zone d'étude en 2010. Le nord de l'île de Montréal est occupé aujourd'hui principalement par des secteurs résidentiels parsemés d'espaces verts et dans une moindre mesure, des secteurs institutionnels, commerciaux et industriels et de quelques terrains vacants.

Pour ce qui est de l'occupation des berges, il est à noter que la majeure partie de la rive à l'étude était déjà lotie et habitée avant l'entrée en vigueur des premiers règlements sur la protection des rives, à la fin des années 1970. Dans les secteurs intercalaires de Montréal-Nord et Rivière-des-Prairies qui ont connu un développement plus tardif, il convient de noter l'important effort public consenti afin de conserver une part importante du territoire riverain pour des parcs publics (près de 50% des rives à Montréal-Nord). De nombreuses constructions ont pourtant vu le jour malgré la réglementation, comme le démontre la figure 4, augmentant d'autant la population exposée au risque d'inondation. Certaines résidences secondaires restantes permettent encore aujourd'hui à leurs propriétaires de se reconstruire dans des zones de contraintes naturelles en bénéficiant de leurs droits acquis. Ailleurs, comme à Roxboro ou Pierrefonds, des conflits juridiques de longue haleine avec des propriétaires récalcitrants ont abouti sur des compromis freinant en partie le développement sur des terrains remblayés en infraction pour en convertir une partie en parc [Corriveau, 2011].

Figure 5 : Occupation du sol de la zone d'étude



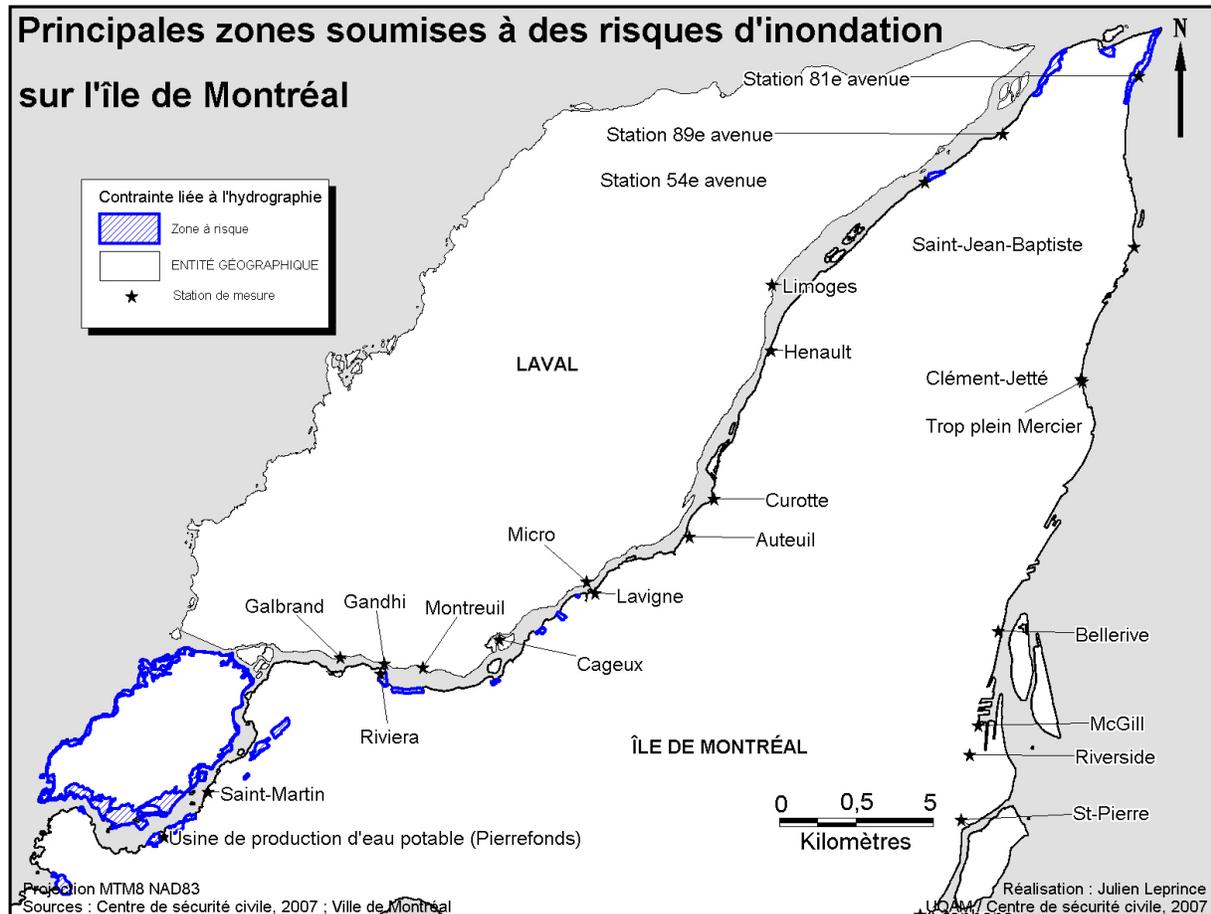
4.1.3. Historique des inondations

Sur l'île de Montréal, les risques d'inondation se concentrent principalement sur les rives de la RDP, puisqu'au sud, sur la rive du fleuve Saint-Laurent, les probabilités d'inondation sont moindres [Ville de Montréal, en ligne (a)]. La rivière est sujette à une augmentation de niveau et de débit au moment de la fonte des neiges, ce qui constitue la crue saisonnière du printemps. De plus, sa morphologie et son régime hydrologique la rendent particulièrement sensible aux phénomènes d'embâcle/débâcle durant la saison froide. Enfin, l'expérience récente indique que les inondations causées par l'accumulation de frasil tendent à devenir à la fois plus fréquentes et plus difficiles à prévoir [Allard, 2009]. Par ailleurs, étant donné le nombre important d'ouvrages de rétention dans le bassin versant de la RDP, on ne peut pas exclure la possibilité d'une rupture de barrage, qui, selon l'importance de l'ouvrage, pourrait entraîner une réaction en chaîne d'une ampleur difficile à estimer. Malgré le risque potentiel de débordement de la rivière des Prairies, peu d'informations claires et facilement accessibles sont disponibles présentement.

Dans un effort pour compiler l'historique des inondations à Montréal, le Centre de la Sécurité Civile (CSC) de la Ville de Montréal a mené une analyse en 2007 d'où découle une carte des zones à risque

d'inondations (figure 6). De plus, un document produit par le CSC a été mis à notre disposition⁴ où l'on observe un effort pour comprendre et répertorier les épisodes d'inondations printanières, par embâcle et par frasil entre 2002 et 2009. Mais au-delà de cette documentation, on dénote un manque de coordination à l'échelle de l'île de Montréal dans le répertoire des inondations.

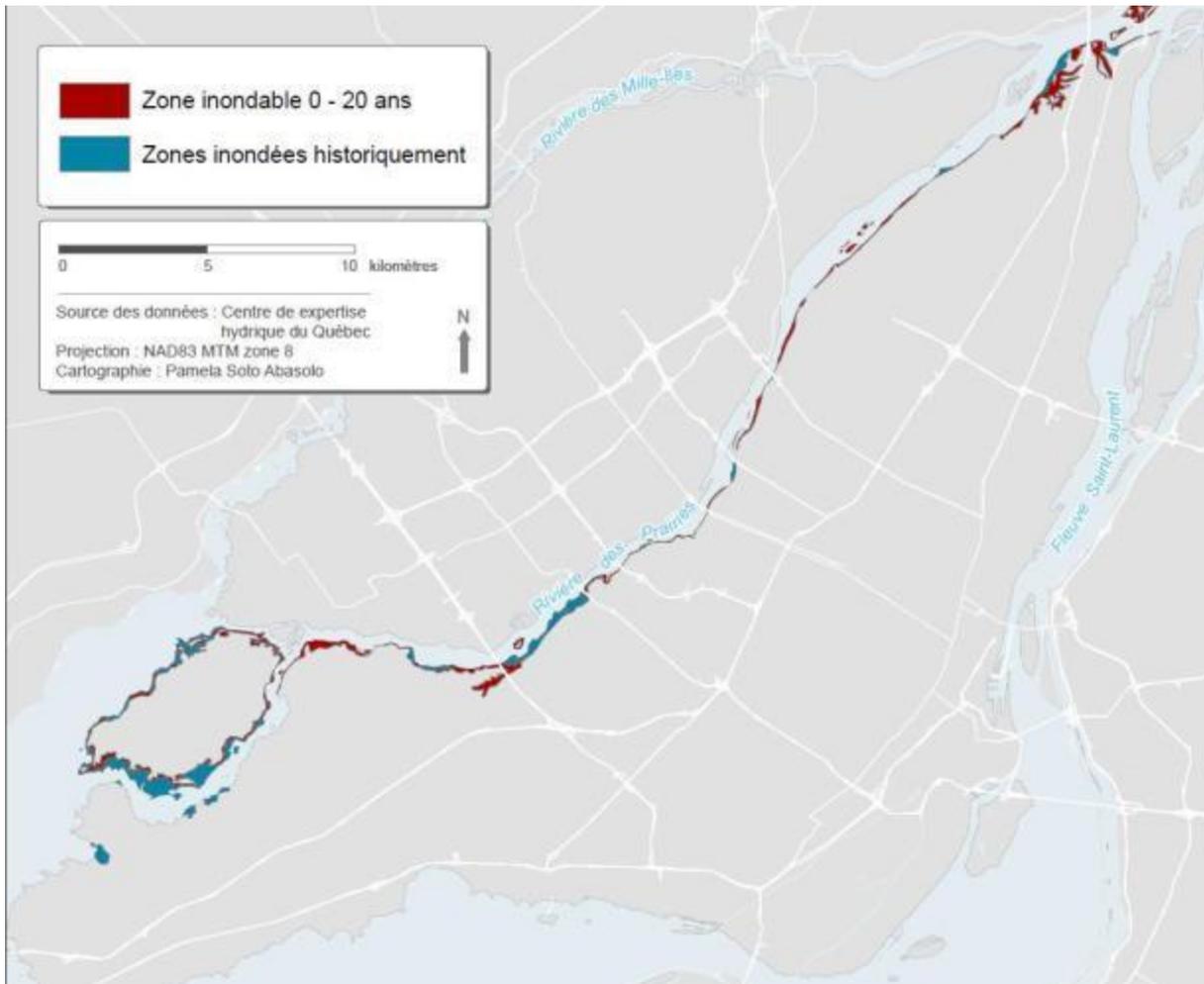
Figure 6 : Principales zones soumises à des risques d'inondations en 2007 sur l'île de Montréal.



Outre les efforts de surveillance faits à l'échelle municipale, le Centre d'Expertise Hydrique du Québec (CEHQ) produit les relevés de débit hydrique et aide les municipalités à établir leur zone inondable. Nous avons eu accès dans le cadre de cette recherche à la zone inondable officielle correspondant à la zone de risque d'inondation de 0 - 20 ans pour la rive montréalaise de la rivière des Prairies. La figure 6 montre cette zone inondable ainsi que la zone historiquement inondée dans ce secteur. Ces limites ont été produites par le ministère de la Sécurité publique et datent de 2001 et 2002 pour la zone inondable. Les données sur les zones inondées dans le passé proviennent d'événements ayant eu lieu entre 2004 et 2008.

⁴ Il est à noter que ce document est de nature confidentielle ce qui nous empêche de divulguer des informations précises sur la nature des données, des résultats et analyses.

Figure 7 : limites de la zone inondable et la zone inondée historiquement de la rive de Montréal de la rivière des prairies.



Comme il est possible de le voir sur la figure 7, la quasi-totalité de la rive montréalaise de la RDP est affectée par un risque d'inondation, déterminé soit à partir des simulations hydrologiques ou soit par des inondations qui ont déjà eu lieu sur le territoire. L'étendue de la zone inondable varie entre 10 mètres de la rive à certains secteurs jusqu'à plus de 300 mètres de la rive dans d'autres secteurs.

4.2. Modélisation des niveaux d'eau

Objectif 2 : *Modélisation de niveaux d'eau possiblement atteints lors de débordement de la Rivière-des-Prairies. Cette modélisation permettra de circonscrire de manière précise l'espace occupé par l'eau advenant un débordement et d'établir les zones les plus susceptibles d'être submergées. Le modèle hydraulique de la rivière sera utilisé graduellement avec des valeurs du niveau d'eau dans la rivière. Le modèle du terrain sera par la suite couplé aux résultats du modèle hydraulique pour délimiter l'espace possiblement submergé selon les niveaux d'eau. La précision vient des données d'élévation utilisées qui se situeront à une échelle beaucoup plus fine permettant davantage de détails que les cartes utilisées présentement pour délimiter ces débordements. Une analyse de données hydrologiques futures pouvant provoquer des probables débordements sera également effectuée dans la mesure où de telles données seraient disponibles.*

Contexte

Un des impacts le plus souvent cité et documenté des changements climatiques (CC) demeure sans nul doute le réchauffement global des températures sur l'ensemble de la planète. À titre d'exemple, la moyenne des températures observées entre 1961 et 2000 dans la partie nord de la planète était largement au-dessus des températures enregistrées durant le dernier millénaire [Ouranos, 2004]. Le climat dans l'hémisphère nord aurait donc augmenté de 0,6 °C, la décennie 1990 apparaissant la plus chaude et l'année 1998 la plus chaude, toujours selon Ouranos (2004). Les experts notent toutefois que ce réchauffement climatique devrait s'accompagner d'une modification des intensités des événements extrêmes, ainsi que de leurs périodes de retour. C'est ainsi que lors d'une étude réalisée en 2007 et 2010, Mailhot et al. (2007, 2010) ont montré à la suite d'une analyse des résultats obtenus avec le Modèle Régional Canadien du Climat (MRCC) que la fréquence de certaines pluies intenses pourrait se réduire de moitié entre les périodes 1961 à 1990 d'une part, et 2041 à 2070 d'autre part dans la région du Sud-Québec. Il est donc permis de penser qu'avec cette accentuation potentielle de la fréquence des pluies extrêmes et de leur intensification, le risque d'inondations de certaines zones devrait augmenter aussi bien au Québec que dans plusieurs endroits dans le monde.

Les CC sont responsables de l'augmentation du risque dû à un aléa plus fréquent et plus intense. De plus en plus d'études scientifiques montrent clairement un lien entre les CC et l'intensification des scénarios d'inondation dans les bassins des rivières. Entre autres exemples, citons le cas des chercheurs de l'University of West Ontario (UWO) qui ont évalué la vulnérabilité du bassin versant de la rivière Thames en Ontario. Ils sont arrivés à la conclusion qu'une relation existe bel et bien entre les CC et l'ampleur et la fréquence des inondations dans cette rivière [Simonovic et al. 2007]. Un autre exemple est celui d'une étude menée dans l'État de Washington par Curtis DeGasperi [King County, 2010] qui a montré que des inondations actuelles associées à des averses importantes surviennent de plus en plus fréquemment qu'avant 1960. Quoique préliminaires, les résultats obtenus dans cet état américain indiquent une tendance claire que des bouleversements à venir sont à craindre dans la gestion des événements extrêmes qui surviendront dans des rivières. Il est temps de commencer une réflexion sur des stratégies de gestion du milieu urbain qui puissent en grande partie faciliter la mise en place des mesures d'adaptation face à l'augmentation potentielle de la fréquence et de l'intensité des scénarios d'inondation.

Dans un effort collectif de protection du public contre cet aléa, les municipalités devraient disposer des outils capables de les préparer à mettre en place des mesures adéquates suite à la superposition de la carte des zones potentiellement inondées par les précipitations extrêmes dues aux CC, aux cartes de vulnérabilité globale de la ville. C'est en lien avec cette augmentation du risque dû à l'aléa mentionné qu'il a été décidé de travailler sur des scénarios des niveaux possiblement atteints dans la rivière. Le présent projet est pertinent car il permet de développer une cartographie des différentes typologies de vulnérabilité en fonction des multiples niveaux d'eau possiblement atteints dans la rivière située dans le secteur de la ville et qui constitue la principale source de l'aléa analysé en rapport avec l'incertitude des CC. La partie hydrologie-hydraulique de ce projet qui fait l'objet du présent rapport détaillé a donc trois objectifs spécifiques: (1) Réalisation d'un état des lieux des zones inondées historiquement pour la ville de Montréal, (2) Modélisation de niveaux d'eau possiblement atteints lors du débordement de la rivière des Prairies et (3) Cartographie des niveaux d'eau possiblement atteints.

Création du MNE comprenant la RDP et la partie nord de l'Île de Montréal

Les données bathymétriques de la RDP et topographiques pour les secteurs riverains sélectionnés le long de la rivière qui font partie de la présente étude proviennent du Ministère des Ressources naturelles et de la Faune [MRNF, 1997] du Québec. Ces informations ont été traitées à l'aide du logiciel MicroDem. "*MicroDem est un programme gratuit super-puissant de cartographie qui lit de nombreux formats DEM, de données vectorielles et images. Il permet de visualiser le tracé GPS sur une image satellite, par exemple les données NIMA (résolution 10 m). Ce programme de cartographie ou de repérage sur carte a été écrit par Peter Guth du département d'océanographie de l'école navale des*

Etats-Unis" [MicroDerm, 2012a]. Il permet de générer des modèles de vue en altitude numérique à partir de l'imagerie satellite à partir des cartes scannées. Sa base de données est en environnement GIS (Système d'Information Géographique) [MicroDem, 2012b]. "MicroDem peut télécharger automatiquement une topographie globale à partir des radars implantés sur les sites d'observation et fournir un canevas 3D pour l'imagerie utilisée, permettant ainsi de visualiser des rues, des rivières et des frontières à partir de l'Atlas National des États-Unis et de les disposer en superposition sur l'imagerie" [MicroDem, 2012a].

La précision des courbes de niveau et du MNE est bonne pour la qualité des résultats de cette étude.

Simulation des niveaux d'eau possiblement atteints en milieu urbain

Pour caractériser les limites de l'étendue des eaux lors des débordements possibles de la rivière, occasionnés par des événements exceptionnels qui ont été considérés, un choix de logiciel de simulation hydrodynamique a été opéré. Pour choisir, à terme, un logiciel pour effectuer cette modélisation, trois critères ont été déterminés : (1) méthode relativement facile à utiliser, (2) logiciel peu dispendieux, (3) méthode qui présente un niveau de précision suffisante. Deux logiciels ont été retenus, un premier, relativement simple à utiliser, gratuit, mais pour lequel les résultats sont moins précis : il s'agit de HEC-RAS, un modèle 1D. Le deuxième est le modèleur HydroSim (modèle 2D) dont les résultats sont plus précis, mais dont l'utilisation est limitée, à cause de son coût, de la précision et de la densité de données requises ainsi que de la formation suffisante exigée de la part des utilisateurs (5 jours de façon intensive).

Les simulations ont été faites d'abord avec HEC-RAS parce que c'est un modèle simple d'utilisation et capable de modéliser avec rapidité un large éventail de conditions d'écoulement, en gérant également différents types de données: données de géométrie, débits et conditions aux limites, conditions de calcul. [US ACE, 2001]. Il s'agit d'un logiciel disponible gratuitement et téléchargeable sur le site de US Army Corps of Engineers avec un manuel d'utilisation bien détaillé. Les données de géométrie sont des sections transversales qui ont été relevées dans la rivière et à quelques mètres au-delà des rives. Les débits et niveaux d'eau sont des données de base en relation avec l'hydrologie et les courbes de tarage de la région.

Pour des rivières présentant une certaine largeur (de l'ordre de quelques centaines de mètres, cas de la RDP), l'utilisation d'un modèle numérique 1D pour déterminer les conditions hydrodynamiques peut s'avérer insuffisante, si on vise des résultats plus précis. En effet une rivière large peut offrir dans certaines de ses sections des situations d'écoulement complexes de turbulence et de vorticités suffisantes (présence d'une composante verticale ou transversale non négligeable) pour justifier de recourir à une modélisation numérique 2D. Une décision a donc été prise de commencer les simulations avec le modèle 1D de les développer à l'aide d'HEC-RAS, et de les poursuivre avec un modèle 2D pour raffiner les résultats.

Le choix du modèle numérique 2D s'est porté sur le logiciel HydroSim parce qu'il est peu dispendieux et qu'il présente un niveau de précision suffisante. Ce choix s'est confirmé par la disponibilité des données 2D et l'existence d'une modélisation numérique de la RDP avec le logiciel HydroSim. Ce dernier a été développé par le Centre Eau, Terre et Environnement de l'Institut National de la Recherche Scientifique [Heniche, 2000]. "*C'est un modèle de calcul hydrodynamique qui résout les équations de Saint-Venant, bidimensionnelles horizontales, par la méthode des éléments finis*" [Dubos, 2001, p. II]. Le modèle de terrain ainsi que les données de base ont été fournis par le CEHQ.

Cartographie des niveaux d'eau possiblement atteints en milieu urbain

Les résultats fournis par HEC-RAS et HydroSim seront transposés sur des cartes géoréférencées des bâtis où sont également reprises les courbes de niveau. Des zones inondées seront alors déterminées par l'intersection entre le terrain et les niveaux d'eau générés par les conditions de simulation. Une procédure a été écrite pour adapter le modèle numérique HEC-RAS afin d'utiliser des données (de simulation ou d'autres types) non disponibles actuellement, mais qui le deviendraient pour évaluer le comportement du système dans un contexte en évolution.

A ces cartes d'inondation sera superposée la carte de vulnérabilité globale qui sera établie dans le projet. Cette superposition permettra d'évaluer les secteurs possiblement touchés selon le niveau d'eau atteint lors d'un débordement de la rivière des Prairies, et par le fait même les facteurs de vulnérabilité à ces différents niveaux.

4.2.1 Modélisation numérique

Cette partie traite de la modélisation numérique de la RDP suivant chacun de deux logiciels sélectionnés. Les différentes sections décrivent tour à tour l'implantation des sections géométriques (du maillage des sections de la rivière selon le cas), l'implantation des ouvrages civils, l'étude hydrologique, les paramètres hydrauliques à caler dans le modèle numérique, les conditions aux limites, les conditions initiales et les simulations numériques effectuées.

Hypothèses

Une série d'hypothèses sont considérées au niveau de la précision à adopter au niveau du modèle de terrain utilisé et de l'hydraulique au niveau de la centrale d'Hydro-Québec. D'une part, le niveau de précision des données fournies par le MRNF et celui de leur traitement avec MicroDem sont considérés suffisants dans ce projet. Les budgets alloués n'ont pas permis d'effectuer une validation sur le terrain de certains secteurs où les activités humaines pourraient avoir altéré les données de base. D'autre part, l'hydraulique de la centrale d'Hydro-Québec étant inconnue durant la période des simulations, nous avons généré un fonctionnement hydraulique dans la section de cet ouvrage capable de reproduire le niveau de gestion des plans d'eau en amont et en aval de cette section.

4.2.1.1 Modélisation avec Hec-Ras

Une première modélisation de la rivière avec HEC-RAS a été réalisée rapidement dans un environnement non géoréférencé (traitement des données issues du modèle numérique de terrain sur un fond non calé), pour régler les questions de continuité et convergence numérique liées à toute opération de simulation numérique. Une deuxième modélisation avec HEC-RAS a été entreprise sur une carte géoréférencée et calée sur le MNT de la RDP et alentours dont la projection des coordonnées est Transverse universelle de Mercator (UTM) projetées sur le NAD 83, zone 18. Les diverses étapes utilisées lors de cette modélisation numérique de la RDP sont décrites dans les sections suivantes.

4.2.1.1.1 Implantation des sections de la rivière et des ouvrages civils

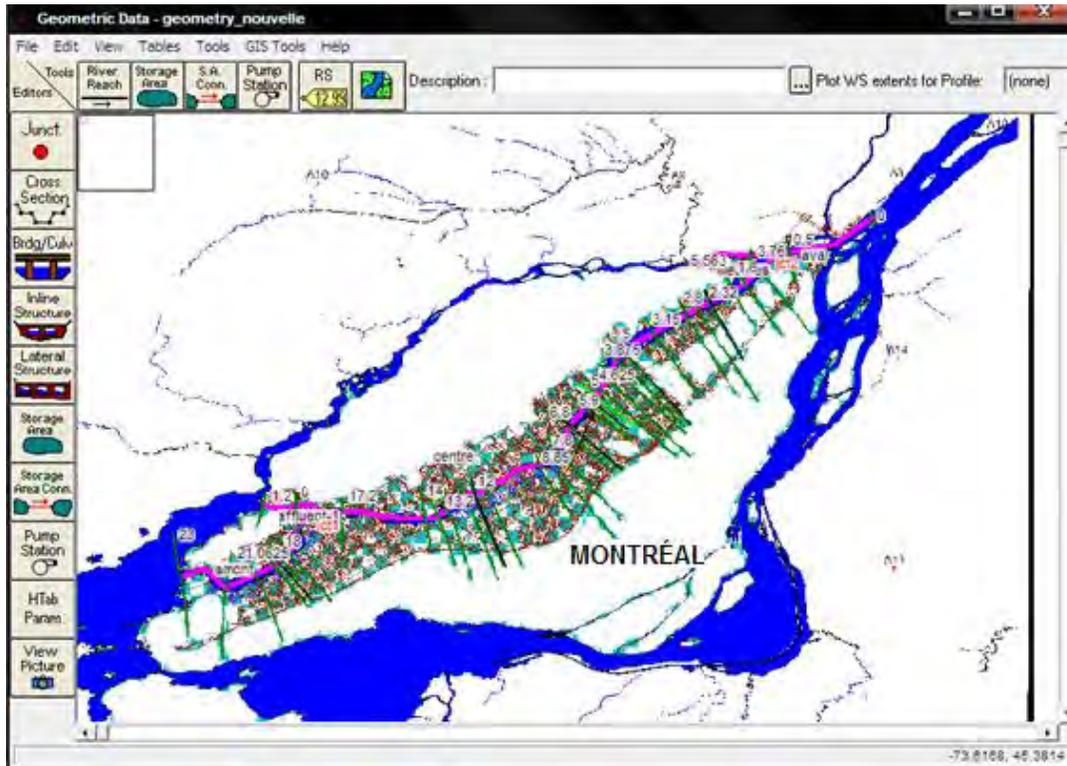
a) Sections de la rivière

Il n'y a pas en soi de règles pour le choix des sections transversales. Toutefois il faudra s'assurer que les sections présentant une quelconque particularité hydraulique (par exemple ouvrage civil) ou naturel (section critique) soient bien représentées. Nous avons cherché à implanter un grand nombre de sections dans notre modèle numérique où 36 sections transversales ont été définies. La modélisation du cours d'eau avec HEC-RAS se déroule de la manière suivante :

- Extraction des sections transversales qui a été effectuée de façon manuelle, à partir de *MicroDem*. Ceci présente un certain risque d'erreur qui pourrait être commise sur la précision de la bathymétrie de la RDP ainsi que sur des sections des affluents, car les résultats de *MicroDem* doivent être traités selon le format exigé dans HEC-RAS;
- Segmentation du cours d'eau par le modélisateur en différents tronçons. À chacun de ces tronçons est attribué un nom;
- Détermination de la géométrie des tronçons représentés par les coordonnées X, Y, Z;
- Positionnement des sections transversales avec la détermination des distances entre la section actuelle et la section transversale suivante. Le logiciel permet le positionnement des sections une fois que la distance est précisée par l'utilisateur. Ce qui a été fait dans notre cas (figure 8);

- Positionnement des berges gauche et droite de la section du cours d'eau en se basant sur le profil de la section transversale;
- Détermination des coefficients de contraction et expansion ainsi que des valeurs du coefficient de Manning Strickler de chaque portion de la section transversale en se basant sur la nature du sol de la région à savoir le lit majeur et le lit mineur de la rivière et en se référant au rapport du CEHQ (2009).

Figure 8 : Vue en plan des diverses sections transversales le long de la rivière des Prairies.



Réalisée par : Sonia Kadi, 2011

b) Ouvrages civils

Les ponts constituent le premier type d'ouvrages civils à implanter dans la rivière. En suivant le manuel de HEC-RAS, il fallait tout d'abord définir la section du pont, les sections amont et aval de ce pont. Une fois la section du pont définie, il fallait ensuite déterminer la géométrie de chacun de ces ponts. C'est à partir des données fournies par le ministère des Transports du Québec (MTQ) que les géométries de tous les ponts ont été définies. Les données indispensables pour la description de la géométrie d'un pont sont: la largeur du tablier, largeur des piliers, la longueur du pont et les pentes des talus amont et aval ainsi que la conception du tablier et l'implantation des piles au niveau de la section.

En ce qui concerne la description de la structure du barrage, centrale de la rivière des Prairies, propriété d'Hydro-Québec, il faut tout d'abord définir la section du barrage. Une fois cette dernière définie, la structure du barrage (à savoir la digue et les vannes de vidange) doit être recréée dans le modèle. Étant donné le manque d'informations disponibles, dû principalement à la sensibilité de l'ouvrage et à l'aspect confidentiel des données, un barrage-type avec déversoir a été conçu dans la section transversale du barrage actuel. Pour ce qui est de la gestion hydraulique du réservoir de ce barrage, nous avons utilisé les niveaux d'eau connus suite aux mesures (correspondant aux crues de 2 et 100 ans) sur les sites en amont et en aval du barrage, tels que présentés dans le document du

CEHQ (2009). Les coefficients de débit relatifs aux vannes de vidange ainsi que le nombre de vannes ouvertes dans le modèle HEC-RAS ont été établis de manière à correspondre aux niveaux d'eau en amont et en aval du barrage mesuré par le CEHQ. La différence entre le niveau en amont du barrage et celui après le barrage (obtenu après l'ajustement) constitue le niveau d'eau stocké dans le barrage. Il est difficile d'évaluer le degré de conséquence que ces estimations (par manque de données réelles) peuvent avoir sur les résultats qui ont été obtenus après les simulations effectuées.

4.2.1.1.2 Étude Hydrologique

L'étude hydrologique consiste à déterminer les zones potentiellement inondées en rapport avec neuf valeurs de débit de simulations numériques dont le choix est expliqué à la section IV.2.1.1.3. Les données hydrologiques indispensables pour la réalisation des simulations sont les scénarios des débits retenus.

D'une part, le choix de Q_2 vient du fait que la simulation du modèle numérique 2D de la RDP, obtenue avec *HydroSim*, indique déjà un rehaussement de niveau d'eau dans la rivière pouvant provoquer des faibles zones d'inondation à certains endroits sur la rive sud du cours d'eau. D'autre part, les données colligées à certaines stations hydrométriques du CEHQ montrent que des valeurs de débit allant jusqu'à 5 700 m³/s ont été atteintes, voir même dépassées (notamment à la station hydrométrique installée à Viau #02OA072). Le débit $Q_{100} + 468$ m³/s (le débit de 468 m³/s représente 2 fois l'incrément adossée de 234 m³/s entre les débits de la crue de 20 ans et 100 ans) atteint la valeur de 5420 m³/s qui est assez proche des valeurs observées en 1974.

Les valeurs de débits dans le lac de Deux-Montagnes qui sont utilisées à l'entrée de la RDP et les valeurs du niveau d'eau à l'embouchure de la RDP sont celles fournies par le CEHQ (2009) et ont été utilisées dans les simulations numériques avec Hec-Ras comme condition aux limites amont et aval de la rivière. Les données de base ou conditions initiales extraites du rapport sont illustrées au Tableau 2. La condition à la limite aval doit être définie.

Tableau 2 : Les débits de crue 2 ans et 100 ans au niveau des biefs (scénarios de base/ Débits initiaux)

Nom de la rivière	Nom du bief	Q 2 (m3/s)	Q100 (m3/s)
Affluent 1	Affluent du bras nord de l'Île-Bizard	1117	1630
Des-Prairies	Amont	1210	1914
Des-Prairies	Centre	2327	3544
Des-Prairies	Aval	3137	5052

Réalisé par : Sonia Kadi et Musandji Fuamba, 2012

Les valeurs du niveau d'eau à l'embouchure de la rivière des Prairies pour les crues de base de récurrence 2 ans et 100 ans ont respectivement les valeurs 7,66 m et 9,42m [CEHQ, 2009]. Une fois les conditions aux limites ainsi que les débits initiaux définis, l'étape suivante est l'attribution des valeurs au coefficient de rugosité pour le lit mineur et majeur de la rivière. Cette dernière est basée sur les données fournies dans le CEHQ (2009). Les coefficients de Manning correspondant au lit, aux berges et à la plaine inondable varient de 0,018 à 0,1.

4.2.1.1.3 Calage du modèle numérique

Avant de procéder aux simulations, il fallait calibrer le modèle numérique HEC-RAS pour qu'il soit représentatif de la réalité. Les coefficients de Manning constituent un paramètre pour caler le modèle. Lors de l'étude élaborée par le CEHQ, les campagnes de mesures (22 avril 2002, 1er mai 2002 et 27 novembre 2003) ont été retenues pour le calage. Le calage du modèle HEC-RAS est basé sur la pluie du 22 avril 2002, étant donné que cet événement est considéré comme une pluie critique (tableau 3).

Tableau 3 : Débits et niveaux d'eau des 3 campagnes de mesures

	22-04-2002	01-05-2002	27-11-2003
Secteur de la rivière des Mille îles (valeur ponctuelle)			
Q (m3/s)	2356	2110	1923
H(m)	7,34	7,08	6,74
Secteur aval du barrage (valeur ponctuelle)			
Q (m3/s)	2356	2110	1923
H (m)	9,32	9,14	8,99
Secteur amont barrage (valeur ponctuelle)			
Q (m3/s)	2356	2110	1923
H(m)	17,15	17,17	17,15
Secteur des rapides du Cheval Blanc (valeur ponctuelle)			
Q (m3/s)	2356	2110	1923
H(m)	19,73	19,44	19,15
Secteur du bras nord de l'île Bizard (valeur ponctuelle)			
Q (m3/s)	2356	2110	1923
H(m)	21,52	21,23	21,01
Secteur du bras sud de l'île Bizard (valeur ponctuelle)			
Q (m3/s)	2356	2110	1923
H(m)	21,42	21,17	20,88

Réalisé par : Sonia Kadi et Musandji Fuamba, 2012

Les écoulements sont supposés permanents pendant la durée des simulations, c'est-à-dire que le débit d'eau dans la rivière reste constant durant le temps de calcul. Les conditions initiales de l'écoulement ainsi que les conditions aux limites amont et aval de la rivière ont été déterminées.

Choix des débits de simulation numérique

L'analyse de valeurs mesurées de débit à la station hydrométrique 02OA072 placée au niveau de la centrale hydroélectrique RDP montre que le débit Q2 ans (2327 m3/s) est dépassé 20 fois en 46 années (tableau 4). Une analyse analogue de valeurs mesurées de débit à la station hydrométrique 02OA038 placée au niveau du pont Viau situé à 4 kilomètres de la centrale hydroélectrique RDP montre que le débit Q100 ans (3544 m3/s) est dépassé 18 fois en 19 années (tableau 5). Les 2/3 des 18 valeurs de dépassement sont situées entre Q100 ans et Q100 ans + 2000 m3/s. Les débits cibles sont donc : Q2 ans, Q100 ans et Q100 ans + 2000 m3/s. Avec une incrémentation de $X=234$ m3/s, on ajoute 6 autres valeurs de débit Q2 ans + X, Q2 ans + 2X, Q2 ans + 3X, Q100 ans + 2X, Q100 ans + 1000 m3/s et Q100 ans + 1500 m3/s, pour couvrir le maximum des scénarios probables d'inondation entre les débits cibles. Au total, 9 scénarios de simulation numérique ont été retenus pour la cartographie : P1 à P9. Les conditions aux limites amont et aval de la RDP ainsi que dans quelques sections particulières sont montrées au tableau 6.

Une vérification est faite régulièrement pour s'assurer que le débit dans une section se trouvant à la sortie d'une jonction (nœud joignant deux tronçons) est égal à la somme de tous les débits d'entrée (applicable seulement dans le cas de l'écoulement permanent).

Tableau 4 : Valeurs mesurées de débit à la station hydrométrique 02OA072

Année	Débit atteint
1951	3440 m3/s
1952	2400 m3/s
1953	2520 m3/s
1954	2350 m3/s
1955	2860 m3/s
1960	2960 m3/s
1971	2630 m3/s
1972	2870 m3/s
1973	2690 m3/s
1974	3170 m3/s
1975	2530 m3/s
1976	3270 m3/s
1978	2750 m3/s
1979	2760 m3/s
1980	2390 m3/s
1981	2520 m3/s
1983	2650 m3/s
1985	2500 m3/s
1991	2600 m3/s
1993	2550 m3/s

Tableau 5 : Valeurs mesurées de débit à la station hydrométrique 02OA038

Année	Débit atteint
1963	4230 m3/s
1964	3730 m3/s
1965	3670 m3/s
1966	5410 m3/s
1967	5410 m3/s
1968	4650 m3/s
1969	5130 m3/s
1970	4990 m3/s
1971	5700 m3/s
1972	6330 m3/s
1973	5700 m3/s
1974	8110 m3/s
1975	5790 m3/s
1976	8190 m3/s
1977	5060 m3/s
1978	4500 m3/s
1979	6690 m3/s
1980	5330 m3/s

Tableau 6 : Scénarios des simulations numériques

Identification de la station	Distance de la section limite amont	Profil	Q Total (m3/s)	W.S. Elev (m)	
Limite amont/entrée de la RDP	0	QT 2 ans	1210	23.13	
		Q2 ans+234	1444	23.35	
		Q2 ans+468	1678	23.55	
		Q2 ans+702	1912	23.78	
		QT100ans+468	2382	24.41	
		Q T100 ans	1914	24.06	
		Q T100 ans+1000	2914	24.79	
		Q T100 ans+1500	3414	25.09	
		Q T100 ans+2000	3914	25.38	
Pont Viau	17	QT 2 ans	2327	20.35	
		Q2 ans+234	2561	20.51	
		Q2 ans+468	2795	20.65	
		Q2 ans+702	3029	20.8	
		QT100ans+468	4012	21.37	
		Q T100 ans	3544	21.1	
		Q T100 ans+1000	4544	21.61	
		Q T100 ans+1500	5044	21.83	
		Q T100 ans+2000	5544	22.02	
Amont du barrage	18.5	QT 2 ans	2327	19.41	
		Q2 ans+234	2561	19.51	
		Q2 ans+468	2795	19.6	
		Q2 ans+702	3029	19.68	
		QT100ans+468	4012	20.12	
		Q T100 ans	3544	19.86	
		Q T100 ans+1000	4544	20.25	
		section amont barrage	Q T100 ans+1500	5044	20.29
		Q T100 ans+2000	5544	20.45	
Aval du barrage	23	QT 2 ans	2327	11.29	
		Q2 ans+234	2561	13.06	
		Q2 ans+468	2795	13.21	
		Q2 ans+702	3029	13.36	
		QT100ans+468	4012	13.91	
		Q T100 ans	3544	13.66	
		Q T100 ans+1000	4544	14.18	
		Q T100 ans+1500	5044	14.41	
		Q T100 ans+2000	5544	14.63	
Aval de l'embouchure de la	45	QT 2 ans	3137	11.54	
		Q2 ans+234	3371	11.66	
		Q2 ans+468	3605	11.77	
		Q2 ans+702	3839	11.88	
		QT100ans+468	5420	12.48	

Rivière-des-Mille-Îles	Q T100 ans	4952	12.3
	Q T100 ans+1000	5952	12.69
	Q T100 ans+1500	6452	12.84
	Q T100 ans+2000	6952	12.98

Réalisé par : Sonia Kadi et Musandji Fuamba, 2012

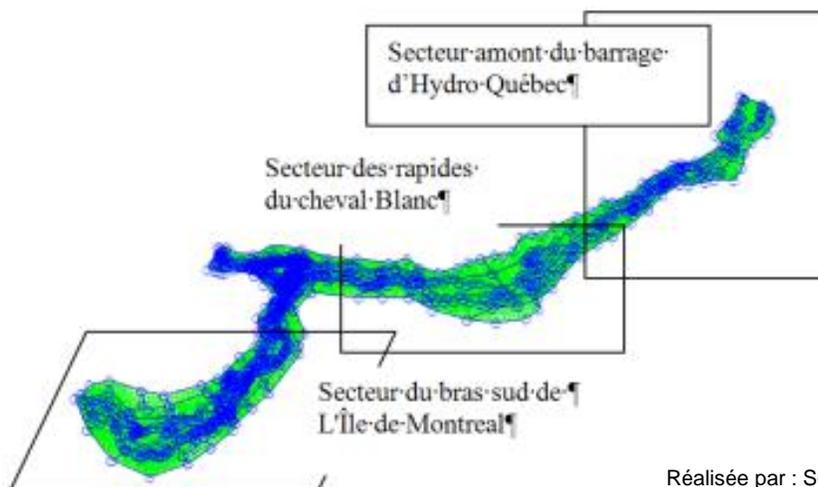
4.2.1.2 Modélisation avec HydroSim

Le modèleur *HydroSim* est un logiciel 2D permettant la résolution des équations de Saint-Venant sur un maillage en éléments finis [Heniche, 2000]. À titre de rappel, un des justificatifs pour le choix de ce logiciel est que le MNT de la rivière à l'étude est déjà intégré au modèle [CEHQ, 2009]. Une répartition des valeurs du coefficient de rugosité dans la zone du projet a été établie, permettant ainsi de bien représenter la réalité du terrain.

4.2.1.2.1 Topographie et maillage hydrodynamique

La topographie utilisée dans ce projet est celle implantée dans le modèle par le CEHQ dont l'objet était la détermination des cotes de crues de la RDP. En effet, dans un modèle en 2D, la topographie de la rivière est définie par un réseau de mailles. A chaque nœud une altitude a été donnée, ensuite les mailles s'accrochent les unes aux autres formant ainsi le maillage [Marant, 2009]. Dans le cas de la présente rivière, la géométrie se présente sous forme de maillage subdivisé en deux tronçons, définis par rapport à la position du barrage d'Hydro-Québec : topographie amont du barrage et topographie aval du barrage. Un maillage hydrodynamique est associé à chaque tronçon de la topographie. Ce maillage constitue un ensemble de mailles en triangulation qui joue le rôle de support des résolutions numériques de l'équation du Saint Venant. Le maillage topographique et le maillage hydrodynamique doivent être assemblés en vue de faciliter la modélisation numérique de la rivière. La figure 9 montre cet assemblage formé du maillage topographique (vert) associé au maillage hydrodynamique (bleu) sur la partie amont du barrage.

Figure 9: Maillage topographique (vert) associé au maillage hydrodynamique (bleu) de la partie amont du barrage d'Hydro-Québec sur la RDP.

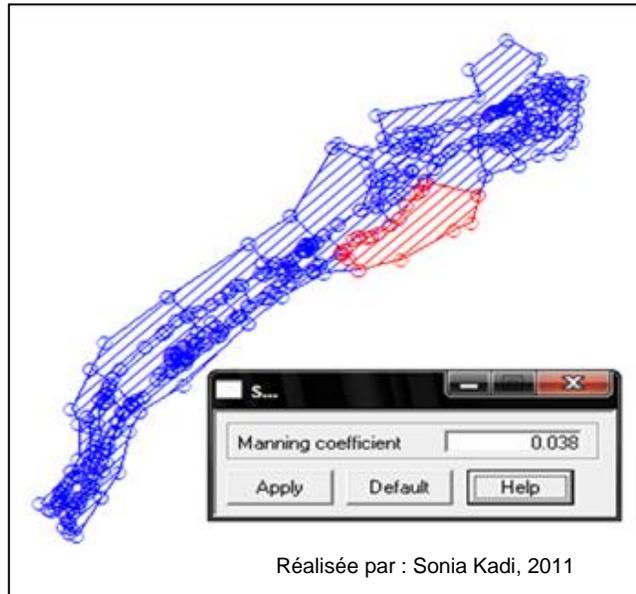


Réalisée par : Sonia Kadi, 2011

4.2.1.2.2 Répartition des coefficients de frottement

Une fois la topographie assemblée sur le maillage hydrodynamique, il est indispensable (comme c'est le cas lors de la modélisation avec *Hec-Ras*) de définir les coefficients de frottement relatifs aux deux secteurs amont et aval (figure 10). Ces coefficients sont déterminés suite à des sorties de terrain ainsi que des analyses granulométriques des différents échantillons représentatifs de la région d'étude réalisés par les membres de l'équipe du CEHQ (2009). Une répartition des coefficients de rugosité a ensuite été faite. La Figure 10 présente cette répartition des coefficients de Manning pour la région située en aval du barrage d'Hydro-Québec. En effet, la partition comporte des structures en polygones hachurés, et une valeur de Manning est associée à chaque zone

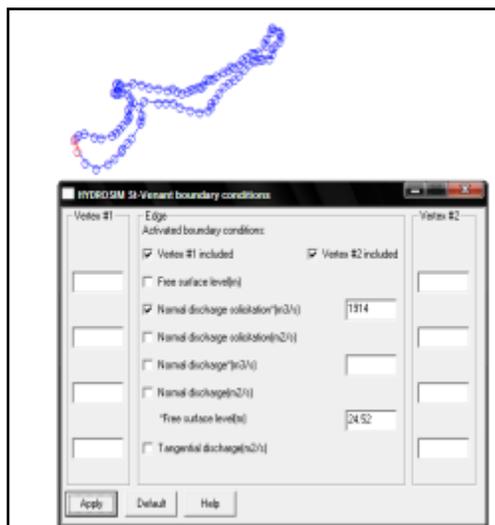
Figure 10 : Répartition des coefficients de rugosité (secteur aval du barrage)



4.2.1.2.3 Répartition des conditions aux limites

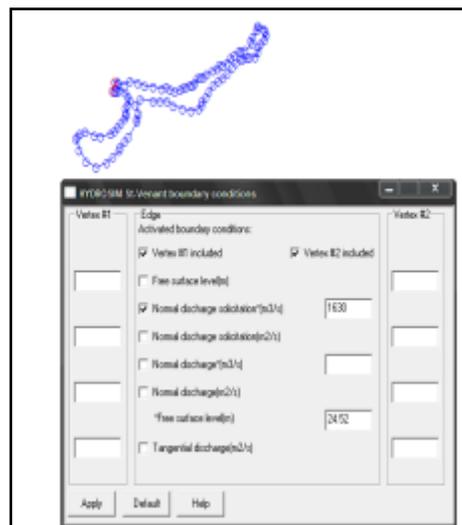
De même que dans HEC-RAS, la définition des conditions aux limites amont et aval est une des étapes indispensables pour l'accomplissement de la modélisation. En effet, il fallait élaborer deux répartition de conditions aux limites : une répartition de conditions aux limites amont du barrage et une répartition de conditions aux limites en aval du barrage. En effet, au niveau de chaque partition, il fallait dans un premier temps, identifier la limite hydraulique (en rouge) et puis attribuer à chacune d'elles les données indispensables (débit ou niveau d'eau ou débit et niveau). Les deux répartition sont détaillées aux figures 11 et 12 :

Figure 11 : Partition de conditions limites amont (entrée de la rivière), pour Q T100 ans



Réalisée par : Sonia Kadi, 2011

Figure 12 : Partition de conditions limites amont (affluent du bras nord de l'Île-Bizard) pour QT 100 ans



Réalisée par : Sonia Kadi, 2011

La définition des conditions aux limites en amont du barrage est effectuée soit par l'attribution des couples (débit, niveau), c'est le cas pour la section en amont et pour l'affluent du secteur nord de l'Île-Bizard, soit par l'attribution d'un niveau d'eau dans la section aval du maillage amont. À l'instar des conditions aux limites amont, les conditions aval sont décrites au moyen du couple (débit, niveau) pour exprimer la condition à l'entrée de la rivière-des-Mille-Îles. Enfin, les conditions à l'embouchure de la rivière sont définies par le niveau d'eau correspondant au niveau du fleuve Saint-Laurent à la base de la crue de 2 ans et de celle de 100 ans. Les valeurs des niveaux correspondants sont celles fournies par le CEHQ (2006).

4.2.1.2.4 Simulation

Comme déjà mentionné, le modèleur *HydroSim* permet la résolution des équations bidimensionnelles d'hydraulique sur un maillage hydrodynamique. De ce fait, la simulation exige la connaissance préalable de la topographie, du maillage hydrodynamique qui lui correspond, la partition du frottement correspondant, la détermination de la partition des conditions aux limites ainsi que le schéma de résolution.

À l'instar des simulations effectuées avec le logiciel Hec-Ras, 9 scénarios de simulation numérique ont été retenus pour la cartographie: P1 à P9. Les débits visés restent donc les mêmes : Q2 ans, Q2 ans + 234 m³/s, Q2 ans + 468 m³/s, Q2 ans + 702 m³/s, Q100 ans, Q100 ans + 468 m³/s, Q100 ans + 1000 m³/s, Q100 ans + 1500 m³/s et Q100 ans + 2000 m³/s.

4.2.2 Analyse et discussion des résultats

Cette sous-section décrit les résultats fournis suite à l'utilisation des logiciels HEC-RAS et HydroSim pour simuler numériquement le comportement hydrodynamique de la RDP. Les deux prochains points décrivent les résultats et leur discussion.

4.2.2.1 Résultats obtenus des simulations numériques

4.2.2.1.1 Résultats obtenus avec HEC-RAS

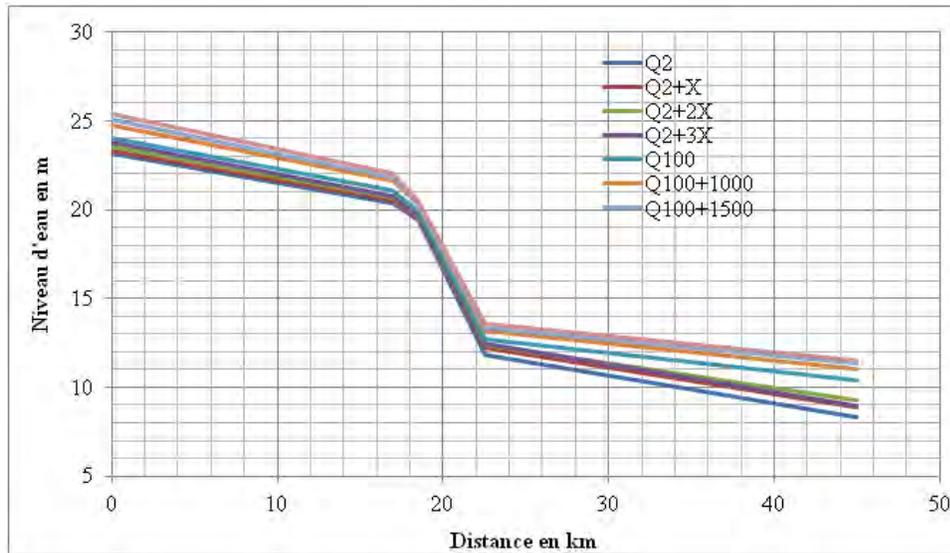
Le format de sortie des résultats générés par HEC-RAS est montré à la figure 13 où sont indiqués les niveaux d'eau dans les sections transversales de chaque tronçon de la rivière. Cette figure reprend les résultats des sections suivantes : limite amont (Station 23), Viau (Station 8.85), amont barrage HQ (Station 7.8), aval barrage HQ (Station 4.625) et aval rivière-des-Mille-Îles (Station 0.5).

Figure 13 : Niveaux d'eau pour différents scénarios de simulation

River	Reach	River Sta	Profile	Q Total (m ³ /s)	W.S. Elev (m)
des_prairies	amont	23	QT 2 ans	1210.00	23.13
des_prairies	amont	23	P1: Q2 ans+234 m	1444.00	23.35
des_prairies	amont	23	P2: Q2 ans+468 m	1678.00	23.55
des_prairies	amont	23	: Q2 ans+702m3/s	1912.00	23.78
des_prairies	amont	23	P5: QT100ans+468	2382.00	24.41
des_prairies	amont	23	Q T100 ans	1914.00	24.06
des_prairies	amont	23	Q T100 ans+1000	2914.00	24.79
des_prairies	amont	23	Q T100 ans+1500	3414.00	25.09
des_prairies	amont	23	Q T100 ans+2000	3914.00	25.38
des_prairies	centre	8.85	QT 2 ans	2327.00	20.35
des_prairies	centre	8.85	P1: Q2 ans+234 m	2561.00	20.51
des_prairies	centre	8.85	P2: Q2 ans+468 m	2795.00	20.65
des_prairies	centre	8.85	: Q2 ans+702m3/s	3029.00	20.80
des_prairies	centre	8.85	P5: QT100ans+468	4012.00	21.37
des_prairies	centre	8.85	Q T100 ans	3544.00	21.10
des_prairies	centre	8.85	Q T100 ans+1000	4544.00	21.61
des_prairies	centre	8.85	Q T100 ans+1500	5044.00	21.83
des_prairies	centre	8.85	Q T100 ans+2000	5544.00	22.02
des_prairies	centre	7.8	QT 2 ans	2327.00	19.41
des_prairies	centre	7.8	P1: Q2 ans+234 m	2561.00	19.51
des_prairies	centre	7.8	P2: Q2 ans+468 m	2795.00	19.60
des_prairies	centre	7.8	: Q2 ans+702m3/s	3029.00	19.68
des_prairies	centre	7.8	P5: QT100ans+468	4012.00	20.12
des_prairies	centre	7.8	Q T100 ans	3544.00	19.86
des_prairies	centre	7.8	Q T100 ans+1000	4544.00	20.25
des_prairies	centre	7.8	Q T100 ans+1500	5044.00	20.29
des_prairies	centre	7.8	Q T100 ans+2000	5544.00	20.45
des_prairies	centre	4.625	QT 2 ans	2327.00	11.85
des_prairies	centre	4.625	P1: Q2 ans+234 m	2561.00	12.23
des_prairies	centre	4.625	P2: Q2 ans+468 m	2795.00	12.35
des_prairies	centre	4.625	: Q2 ans+702m3/s	3029.00	12.47
des_prairies	centre	4.625	P5: QT100ans+468	4012.00	12.94
des_prairies	centre	4.625	Q T100 ans	3544.00	12.73
des_prairies	centre	4.625	Q T100 ans+1000	4544.00	13.17
des_prairies	centre	4.625	Q T100 ans+1500	5044.00	13.37
des_prairies	centre	4.625	Q T100 ans+2000	5544.00	13.56
des_prairies	aval	0.5	QT 2 ans	3137.00	8.29
des_prairies	aval	0.5	P1: Q2 ans+234 m	3371.00	8.90
des_prairies	aval	0.5	P2: Q2 ans+468 m	3605.00	9.25
des_prairies	aval	0.5	: Q2 ans+702m3/s	3839.00	8.99
des_prairies	aval	0.5	P5: QT100ans+468	5420.00	10.53
des_prairies	aval	0.5	Q T100 ans	4952.00	10.37
des_prairies	aval	0.5	Q T100 ans+1000	5952.00	11.05
des_prairies	aval	0.5	Q T100 ans+1500	6452.00	11.32
des_prairies	aval	0.5	Q T100 ans+2000	6952.00	11.51

Comme on le voit sur la figure 13, le niveau d'eau varie considérablement de l'amont vers l'aval de la RDP, entre 14,84 m et 13,87 m, respectivement pour la simulation avec le débit Q2ans et Q100ans + 2000 m³/s. Les différentes variations du niveau sont représentées au graphique 2. La chute de niveau que l'on observe au kilomètre 17 (environ 8 m) représente la différence de niveau d'eau retenue par le barrage d'Hydro-Québec. L'ensemble de résultats obtenus avec HEC-RAS est repris en Annexe A.

Graphique 2 : Variation du niveau d'eau pour différents scénarios de simulation

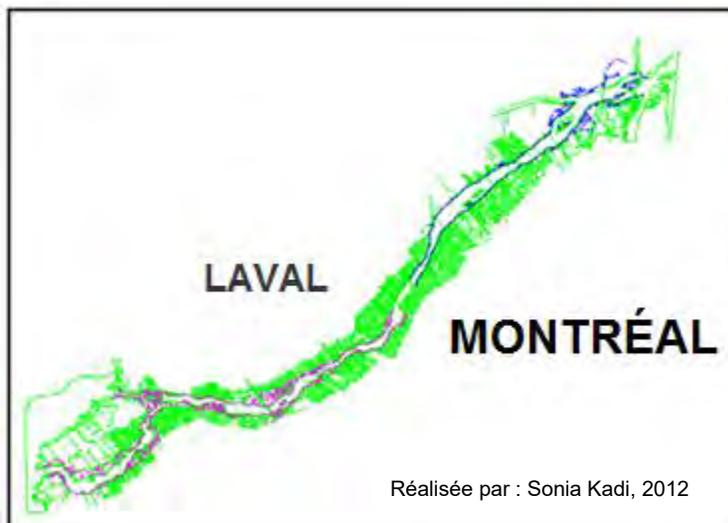


Réalisé par : Sonia Kadi, 2011

4.2.2.1.2 Résultats obtenus avec Hydrosim

Les résultats fournis par Hydrosim sont présentés sous forme de lignes colorées représentant les limites d'inondation directement reportées sur la carte du bâti le long de la RDP. La figure 14 montre les résultats obtenus des limites d'inondation des secteurs amont et aval du barrage HQ, après convergence du modèle numérique de la rivière pour la simulation Q100 ans + 2000 m³/s. Cette convergence dépend de l'importance du maillage configuré et de la précision souhaitée. L'ensemble de résultats obtenus avec Hydrosim est repris en Annexe B et C.

Figure 14 : Limites d'inondation (en violet – amont du barrage et bleu – aval du barrage) pour la simulation Q100 ans + 2000 m³/s.



Réalisée par : Sonia Kadi, 2012

Les résultats issus de deux modèles (Hec-Ras et Modeleur-HydroSim) ne peuvent pas être présentés de la même manière, étant donné que les deux logiciels ne présentent pas les résultats dans le même format (les niveaux d'eau simulés sont représentés par des valeurs numériques dans le cas de Hec Ras, alors qu'ils sont représentés par des courbes ou limites d'inondation dans l'autre cas). Dans les paragraphes qui suivent, les résultats obtenus par des deux modèles sont projetés dans un même format (AutoCad) pour pouvoir les comparer.

4.2.2.2 Tracé des cartes d'inondation

Les résultats des simulations élaborées avec les deux modèles numériques ont été superposés sur la carte de l'Île-Montréal pour déterminer les limites d'inondation probables. En effet les niveaux (plans) d'eau dans les sections transversales de la RDP sont reliés dans le but de former la ligne d'eau générée à partir de chaque scénario hydrodynamique défini par un débit donné. La limite d'inondation est déterminée par l'intersection de cette ligne d'eau et du terrain naturel pour lequel l'hypsométrie a été densifiée le long du cours d'eau. La génération de l'hypsométrie densifiée requiert deux grandes étapes : (1) la vérification initiale et la consolidation de la géoréférence et (2) l'interpolation des courbes de niveaux et l'édition cartographique.

4.2.2.2.1 Vérification initiale et consolidation de la géoréférence

Cette étape est effectuée en trois phases: (1) changement de projection, (2) validation de la géoréférence et (3) changement de projection de l'hypsométrie. La première étape concerne le changement de projection du fichier de périmètre de l'Île de Montréal de sa géoréférence originale (latitude, longitude) vers la projection cartographique UTM zone 18. La deuxième étape permet la validation de la géoréférence et de l'assignation altimétrique aux courbes de niveaux originales de 5 mètres d'équidistance en format ESRI shapefile. La troisième étape a pour but le changement de projection du fichier de courbes de niveaux (hypsométrie) de sa géoréférence originale (MTM zone 8) vers la projection cartographique UTM zone 18. Le fichier comprenant l'hypsométrie et le périmètre de l'Île de Montréal est alors importé afin de bien repérer les zones de chevauchement des courbes de niveaux originales entre la couverture des zones terrestres riveraines et la RDP. On constate que la courbe de niveau originale est le résultat brut d'un traitement numérique automatisé avec de nombreuses aberrations d'interpolation dont entre autres des vecteurs de courbes qui rejoignent les rives avec des îles ou qui chevauchent le terrain et l'eau.

4.2.2.2.2 Interpolation des courbes de niveaux et édition cartographique

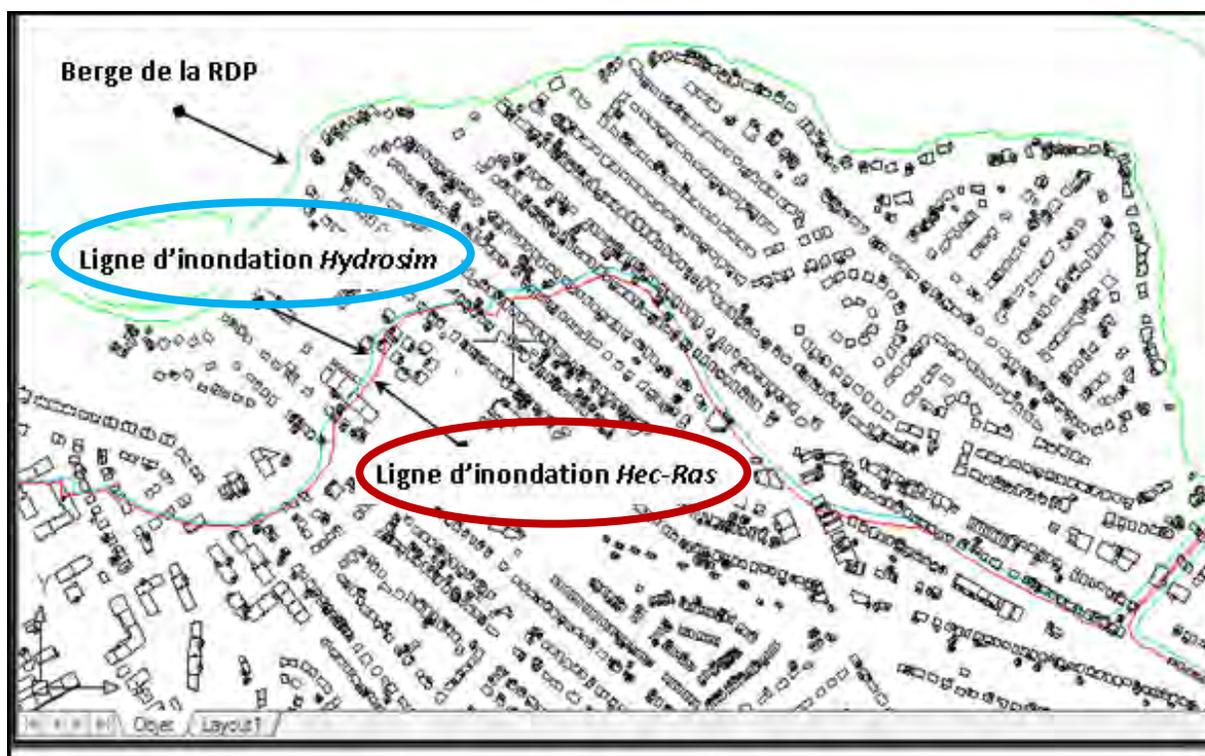
Idéalement, un important travail d'édition de la courbe originale et d'intégration d'autres données altimétriques complémentaires devrait être fait à ce stade avant de procéder à la suite des opérations. Compte tenu des limites de temps et des incertitudes inhérentes aux courbes originales, nous avons choisi d'apporter une correction au produit final en suivant la procédure ci-après :

- Segmentation des courbes de niveaux sous la forme de vertex (positions 3D) à intervalle régulier qui serviront de base à la triangulation du terrain;
- Modélisation du terrain par triangulation (Triangulated Irregular Network - TIN) et génération des courbes de niveaux interpolées à un mètre d'équidistance le long des axes du modèle triangulé;
- Édition préliminaire de l'hypsométrie densifiée afin de couper les principaux segments qui chevauchent les berges et l'eau ou les berges et les îles. Vérification des erreurs grossières validation de la cohérence altimétrique entre l'hypsométrie densifiée et les courbes de niveaux originales;
- Chargement du fichier de bâti afin de poursuivre la validation et la détection d'incohérences. On constate que les limitations des courbes originales sont occasionnellement incompatibles avec les informations détaillées. En effet, certains lotissements présenteraient des dénivelées de près de 5 mètres sur un même lot. Il y a possiblement eu d'importants travaux de terrassement entre la date de génération des courbes de niveaux et celles du bâti sur les rives.

4.2.2.3 Lignes d'inondation

Le tracé des courbes d'inondation consiste à relier toutes les lignes d'inondation qui ont été tracées dans un environnement AutoCad. Une illustration de ces lignes est montrée à la figure 15 qui reprend les résultats de la simulation numérique Q100 ans + 2000 m3/s. On peut remarquer une certaine différence entre la ligne obtenue avec les résultats de HEC-RAS et avec ceux d'Hydrosim. L'ensemble de cartes d'inondation est repris en Annexe C.

Figure 15 : Lignes d'inondation (bleu et rouge) générées avec les résultats de la simulation numérique Q100 ans + 2000 m3/s.



Réalisée par : Sonia Kadi, 2012

4.2.2.3 Discussions de résultats obtenus

La discussion des résultats porte sur les valeurs de niveau d'eau obtenues et sur les cartes d'inondation tracées en fonction des scénarios choisis de simulation numérique. Le budget alloué au projet ainsi que le temps ne nous ont pas permis d'effectuer une campagne de terrain pour valider les données du modèle numérique de terrain utilisé. Même les tests de sensibilité n'auraient pas pu venir compenser l'absence de travaux terrain, étant donné que la précision planimétrique des courbes topographiques utilisées était inconnue. Ces tests auraient tout simplement exagéré ou minimisé l'effet d'inondation, sans réellement indiquer la zone tampon à considérer pour l'ensemble des résultats obtenus. Seul donc un relevé du couloir étendu sur quelques centaines de mètres le long de la RDP aurait permis de préciser certains détails sur l'hypsométrie des berges de la rivière, opération qui s'avère essentielle à la fois pour la détermination des conditions hydrodynamiques dans la rivière que pour la précision des courbes de niveau à tracer. En effet, avec une vérité-terrain fournie par des relevés bien ciblés, on peut déterminer la valeur de la précision planimétrique, et par conséquent limiter l'ampleur de la campagne-terrain nécessaire. De ce qui précède, il s'avère donc que les résultats obtenus dans cette étude devraient être interprétés avec précaution.

4.2.2.3.1 Résultats obtenus sur les niveaux d'eau dans la rivière

La comparaison des résultats obtenus entre HEC-RAS et HydroSim montre des écarts de valeurs de niveau d'eau pouvant atteindre jusqu'à 2,51 mètres, les valeurs de Hec-Ras étant les plus importantes. Le Tableau 7 montre le détail des différences pour certaines sections transversales de la RDP. La modélisation de la rugosité dans les deux modèles pourrait en partie expliquer cette différence. En effet le coefficient de frottement est un des paramètres à forte influence sur le niveau d'eau simulé. Une différence entre ces valeurs pourra influencer les niveaux simulés par les deux modèles. La répartition des coefficients de frottement dans le cas de HydroSim est complexe, car elle exige de prévoir plusieurs valeurs de rugosité dans la zone bidimensionnelle modélisée. Alors que le logiciel HEC-RAS prend en compte seulement trois valeurs du coefficient de Manning dans une section transversale unidimensionnelle: une valeur pour chacune de deux berges et une valeur dans le lit de la rivière. La modélisation avec le logiciel unidimensionnelle Hec-Ras peut apparaître pertinente pour une évaluation préliminaire des niveaux possiblement atteints dans la rivière tels que générés par les profils choisis. Il reste toutefois que le recours à une modélisation bidimensionnelle telle que celle obtenue avec HydroSim est indiqué si on vise à atteindre un degré de précision suffisante. Une plus grande précision dans la détermination de la zone potentiellement inondable a un impact sur la résolution de l'analyse de vulnérabilité et pourrait davantage orienter et convaincre les acteurs de l'adaptation, entre autres sur leur choix de solutions à mettre en place (un zonage différent par exemple ou des techniques et matériaux de construction mieux adaptés aux inondations).

Tableau 7 : Différence de niveau d'eau entre les modèles Hec-Ras et HydroSim pour certaines sections transversales de la RDP

Station	Identification de la station	Distance par rapport à l'amont (km)	Profil de simulation	Q Total (m ³ /s)	Niveau d'eau (HydroSim) (m)	Niveau d'eau (Hec-Ras) (m)	Différence de niveau entre les deux modèles (m)
23	amont	0	QT 2 ans	1210	23	23.13	0.13
23			Q2 ans+234 m	1444	23.10	23.35	0.25
23			Q2 ans+468 m	1678	23.21	23.55	0.34
23			Q2 ans+702m ³ /s	1912	23.33	23.78	0.45
23			QT100ans+468	2382	23.80	24.41	0.61
23			Q T100 ans	1914	23.51	24.06	0.55
23			Q T100 ans+1000	2914	24.10	24.79	0.69
23			Q T100 ans+1500	3414	24.49	25.09	0.6
23			Q T100 ans+2000	3914	24.58	25.38	0.8
8.85	section Viau	17	QT 2 ans	2327	18.05	20.35	2.3
8.85			Q2 ans+234 m	2561	18.17	20.51	2.34
8.85			Q2 ans+468 m	2795	18.29	20.65	2.36
8.85			Q2 ans+702m ³ /s	3029	18.38	20.8	2.42
8.85			QT100ans+468	4012	20.65	21.37	0.72
8.85			Q T100 ans	3544	20.0	21.1	1.1
8.85			Q T100 ans+1000	4544	21.28	21.61	0.33
8.85			Q T100 ans+1500	5044	21.48	21.83	0.35

8.85			Q T100 ans+2000	5544	21.56	22.02	0.46
7.8	section amont barrage	18.5	QT 2 ans	2327	17.3	19.41	2.11
7.8			Q2 ans+234 m	2561	17.35	19.51	2.16
7.8			Q2 ans+468 m	2795	17.42	19.6	2.18
7.8			Q2 ans+702m3/s	3029	17.51	19.68	2.17
7.8			QT100ans+468	4012	18.66	20.12	1.46
7.8			Q T100 ans	3544	18.51	19.86	1.35
7.8			Q T100 ans+1000	4544	19.2	20.25	1.05
7.8			section amont barrage	18.5	Q T100 ans+1500	5044	19.51
7.8	Q T100 ans+2000	5544			19.83	20.45	0.62
4.625	section aval barrage	22.5	QT 2 ans	2327	10.05	11.85	1.8
4.625			Q2 ans+234 m	2561	10.12	12.23	2.11
4.625			Q2 ans+468 m	2795	10.20	12.35	2.15
4.625			Q2 ans+702m3/s	3029	10.33	12.47	2.14
4.625			QT100ans+468	4012	10.46	12.94	2.48
4.625			Q T100 ans	3544	10.51	12.73	2.22
4.625			Q T100 ans+1000	4544	10.69	13.17	2.48
4.625			Q T100 ans+1500	5044	10.86	13.37	2.51
4.625			Q T100 ans+2000	5544	11.1	13.56	2.46
0.5			section en aval de l'embouchure des milles iles	45	QT 2 ans	3137	7.65
0.5	Q2 ans+234 m	3371			7.9	8.90	1
0.5	Q2 ans+468 m	3605			8.1	9.25	1.15
0.5	Q2 ans+702m3/s	3839			8.33	8.99	0.66
0.5	QT100ans+468	5420			9.87	10.53	0.66
0.5	Q T100 ans	4952			9.42	10.37	0.95
0.5	Q T100 ans+1000	5952			10.39	11.05	0.66
0.5	Q T100 ans+1500	6452			10.88	11.32	0.44
0.5	Q T100 ans+2000	6952			11.37	11.51	0.14

Réalisé par : Sonia Kadi, 2012

4.2.2.3.2 Résultats obtenus sur les cartes d'inondation

La différence observée entre les résultats fournis par les deux modèles sur le niveau d'eau dans les sections transversales se reflète également sur les lignes d'inondation. En effet la ligne d'inondation tracée avec les résultats de HEC-RAS est plus étendue que celle de Hydrosim, comme on peut le voir à la figure 14. Toutefois, cet écart ne semble pas avoir une grande influence sur le nombre d'infrastructures et résidences touchées par le tracé de la ligne d'inondation avec les résultats de deux modèles, à notre échelle de travail.

4.2.3 Conclusion et recommandations

La garantie d'obtenir des résultats valables et précis lorsqu'on modélise les conditions de rehaussement d'un cours d'eau aux aléas des conditions climatiques nécessite une bonne connaissance du terrain, la disponibilité des données hydrologiques fiables, la possibilité de recourir à des relevés hypsométriques ponctuels destinés à valider le modèle numérique du terrain à l'étude et la capacité de choisir le modèle hydraulique approprié pour prédire les conditions hydrodynamiques attendues dans le cours d'eau.

La modélisation de la RDP dans le cadre de ce projet a été élaborée avec un logiciel 1D (HEC-RAS), et un modèle 2D (Modeleur-HydroSim). Les niveaux d'eau obtenus des simulations réalisées à l'aide de ces modèles ont permis de tracer les lignes d'inondation possiblement atteintes lors de neuf scénarios choisis comme événements critiques pouvant solliciter la rivière. Des écarts ont été observés entre les résultats fournis par les deux modèles utilisés. Il s'avère toutefois que ces écarts n'ont pas de grande influence sur le nombre d'infrastructures et résidences touchées dans la zone inondable générée. Pour améliorer la qualité des résultats obtenus, nous formulons les recommandations techniques suivantes à l'issue de cette étude, pour les projets futurs de même nature :

- Prévoir une campagne de relevés hypsométriques dans un couloir le long de la rivière à l'étude;
- Avoir l'occasion de travailler sur des scénarios de simulation qui tiennent compte de la probabilité d'occurrence des événements extrêmes. Le CEHQ devra donc rendre disponibles les données hydrologiques à utiliser dans le cadre du climat futur;
- Avoir la possibilité d'obtenir, de la part des municipalités et des propriétaires privés et gouvernementaux d'infrastructures en lien avec la gestion du cours d'eau à l'étude, toute documentation relative à ces ouvrages;
- Déterminer l'incertitude (ou précision) liée à l'utilisation des modèles hydrauliques unidimensionnels, de manière à en tenir compte lors de l'interprétation des résultats devant servir au tracé des zones inondables. Des tests de sensibilité permettraient de vérifier si l'incertitude ou la résolution viennent modifier les résultats de manière importante. Toutefois, il faudrait s'assurer que les courbes topographiques utilisées présentent une précision planimétrique suffisante pour pouvoir se passer des relevés terrain ;
- Comparer les résultats obtenus en utilisant Hec-GeoRas et Hec-Ras.

4.3. Analyse de la vulnérabilité

Objectif 3 : *Analyse de la vulnérabilité des secteurs en zones inondées maximales par des indices synthétiques. Cette analyse de la vulnérabilité pourrait servir, comme le suggèrent Kelly et Adger, de "point de départ pour trouver des moyens efficaces de promouvoir des mesures correctives susceptibles de limiter les impacts, en appuyant des stratégies d'atténuation et en facilitant l'adaptation" [Kelly et Adger, 2000, p.325].*

4.3.1 Sensibilité

À la lumière de l'analyse de la littérature nous avons procédé à l'évaluation de la sensibilité de la communauté riveraine de la rivière des Prairies relativement aux inondations à l'aide de deux méthodes : (1) la sensibilité sociale et (2) la sensibilité territoriale. Dans cette section du rapport, nous allons décrire, en premier lieu, les indicateurs et les données nécessaires à l'analyse de la sensibilité pour ensuite, présenter les méthodes et résultats des indices de sensibilité sociale et territoriale.

4.3.1.1. Indicateurs de la sensibilité

Une analyse exhaustive de la littérature dans le domaine des vulnérabilités sociétale et territoriale aux aléas révèle l'importance d'établir des listes d'indicateurs. Si les recherches se font généralement dans des contextes variés et à des échelles distinctes, l'utilisation d'indicateurs spécifiques est généralisée. Plusieurs méthodes ont été développées en Europe et en Amérique du Nord [Susan Cutter (2000, 2003, 2008 ; Larrue et Camphuis (2010)), et l'utilisation d'indicateurs précis est généralement appliquée. Les méthodes récentes d'évaluation de la vulnérabilité utilisent ainsi une sélection d'indicateurs quantitatifs afin d'être en mesure de comparer différents secteurs d'une communauté [Birkman, 2007, p. 21]. De nombreux indicateurs ont donc été sélectionnés afin de cerner la vulnérabilité, que ce soit dans les pays développés ou dans les pays en voie de développement. Dans le *Cadre d'action de Hyogo pour 2005-2015 pour des nations et des collectivités résilientes aux catastrophes*, on souligne le besoin de

«Mettre au point des ensembles d'indicateurs des risques de catastrophe et de la vulnérabilité aux échelons national et infranational qui permettront aux décideurs d'évaluer les conséquences des catastrophes aux plans social, économique et environnemental, et en diffuser les résultats aux décideurs, au grand public et aux populations menacées» [Conseil de l'Europe, 2005, p. 14]

Ces éléments illustrent l'importance de réfléchir aux indicateurs afin d'établir une liste pertinente pour l'analyse de la vulnérabilité des communautés de la rivière des Prairies. Ces indicateurs nous permettent de décrire de manière réaliste, les éléments sociaux et territoriaux qui ont un impact sur la vulnérabilité des communautés face aux aléas dans l'objectif de mettre en place des mesures d'adaptation pertinentes.

Sélection d'indicateurs en plusieurs étapes

La disponibilité des données joue un rôle important dans le choix d'indicateurs de la vulnérabilité, et aussi dans le choix de l'approche méthodologique. Par exemple, la disponibilité des données sociales issues des recensements de la population ouvre la porte à une gamme d'analyses statistiques et multicritères très intéressantes. D'autre part, les informations sur le territoire, comme l'occupation du sol, les réseaux de transports et la localisation d'infrastructures critiques sont de grande importance dans l'analyse de la vulnérabilité de la zone d'étude et elles peuvent être traitées à l'aide des systèmes d'information géographiques. Dans un cas où la disponibilité des données serait insuffisante, voire inexistante, une collectivité peut compiler ces informations selon ses propres besoins. Cependant, la compilation des données sociales et géographiques implique souvent la mobilisation de ressources humaines et économiques importantes, ce qui peut constituer un obstacle à la volonté des communautés à évaluer leur vulnérabilité à travers une approche statistique ou cartographique.

Un des objectifs de notre étude est de recenser l'information « cartographiable » nécessaire à l'analyse de la vulnérabilité sociale et territoriale des communautés aux inondations. Pour ce faire, nous avons compilé à travers la littérature les indicateurs retenus par divers auteurs pour l'analyse de la sensibilité et de la vulnérabilité aux aléas. À cette liste d'indicateurs, nous en avons ajouté d'autres qui sont le résultat de notre propre réflexion et des recommandations faites par les membres du comité de suivi de cette recherche. L'ensemble de ces indicateurs est décrit en détail au tableau 8.

Nous avons sélectionné 10 thèmes qui regroupent tant des indicateurs de sensibilité directe que ceux de sensibilité indirecte. L'objectif est de dégager un profil réaliste de la sensibilité sociétale et territoriale de la zone à l'étude. Ainsi, certaines infrastructures et réseaux illustrent la sensibilité dite indirecte, qui est très importante à considérer en raison de ses possibles effets dominos. Par exemple, avec les scénarios de montée des eaux, il est possible de constater quels hôpitaux seront touchés par les inondations et les conséquences sur l'accessibilité aux soins ou l'évacuation des patients.

Tableau 8 : Liste préliminaire d'indicateurs

Thème	Indicateurs	Source	Justification
Population / Ménages	Nombre d'habitants	Larrue et Camphuis, 2010	Permet une évaluation rapide de la population exposée sur la zone
	Densité de population	Cardona, 2006; Pelling, 2006; Cutter et al., 2003	La densité peut jouer en faveur ou en défaveur de la gestion du risque. En effet, dans des zones à faible densité et étalées, les secours rencontrent plus de difficultés à accéder aux victimes alors qu'une densité forte signifie que sur un petit territoire l'impact de l'inondation sera plus important
	Évolution de la croissance de la population	Larrue et Camphuis, 2010	Indication sur l'attention actuelle et future à porter à la zone grâce à la tendance actuelle
	Population de plus de 65 ans (<75 ans)	Cutter and Finch, 2008; Dwyer et al., 2004; Cutter et al., 2003; Thouret et D'Ercole, 1996; Équipe de recherche	Part de la population à faible autonomie, reconnue comme plus vulnérable. La tendance actuelle est de tenir compte davantage des 75 ans et plus lorsqu'on parle de perte d'autonomie.
	Population de moins de 5 ans (<18 ans)	Cutter and Finch, 2008; Dwyer et al., 2004; Cutter et al., 2003; Morrow, 1999; Thouret et D'Ercole, 1996; Équipe de recherche	Part de la population à faible autonomie, reconnue comme plus vulnérable / Permet de déterminer à l'avance le nombre d'enfants qui pourraient exiger des services-soins-besoins spéciaux après un désastre
	Pourcentage de femmes	Cutter et al., 2003; Blaikie et al., 1994; Thouret et D'Ercole, 1996; Dwyer et al., 2004; Cutter and Finch, 2008	Part de la population reconnue comme plus vulnérable pour des raisons économiques et généralement de responsabilité familiale
	Taux de propriété/location du logement	Dwyer et al., 2004; Cutter et al. 2003; Heinz Center, 2000	Le fait d'être locataires suggère moins de ressources financières que les propriétaires. Dans les cas extrêmes, les locataires manquent d'options d'abri suffisantes quand le logement devient inhabitable ou trop coûteux pour se permettre. Et vice-versa. Les locataires sont souvent négligés quant à l'accès aux informations sur l'aide financière pendant la crise et le rétablissement.
	Propriété d'automobile	Dwyer et al., 2004	Donne un aperçu d'un certain type de biens impactés lors d'un événement. Donne un aperçu de nombre de personnes qui seraient affectées dans les déplacements quotidiens par la fermeture des rues
	Pourcentage d'immigrants	Cutter et al. 2003	Dans une faible mesure, car cela dépend de beaucoup d'autres facteurs, les immigrants récents peuvent ne pas connaître la situation locale ni les ressources disponibles, ou ils peuvent ne pas savoir comment agir.
	Pourcentage de ménages nombreux	Cutter et al. 2003; Dwyer et al., 2004; Mendes, 2009	Des ménages nombreux (5 pers. et plus) pourraient avoir plus de difficultés à se reloger en cas d'évacuation. Que ce soit pour trouver une place pour les accueillir parmi leurs proches ou en termes monétaires. Cette donnée a des implications sur le plan économique en rapport avec les ressources disponibles.

Thème	Indicateurs	Source	Justification
Revenu/activités économiques	Revenu par ménage	Dwyer et al., 2004; Cutter et al., 2003; Équipe de recherche	Indique la capacité des ménages à absorber économiquement l'impact de l'aléa et à recouvrer une situation économique stable. Peut être normalisé pour l'intégrer à la vulnérabilité sociale ou peut être décomposé en catégories pour produire deux indicateurs séparés (par exemple : ménages aisés - plus de 70 000\$; ménages économiquement faible - moins de 30 000\$)
	Revenu par personne	Cutter et al. 2003; Équipe de recherche	Indique la capacité des personnes à absorber économiquement l'impact de l'aléa et à recouvrer une situation économique stable. Le revenu personnel ne nous informe pas à propos de combien de personnes composent les ménages et ceux qui peuvent donc apporter dans la reconstruction.
	Ménages fiscaux non imposables	Larrue et Camphuis, 2010	Le postulat est que les ménages économiquement les plus faibles seraient plus sensibles aux catastrophes
	Pourcentage de familles monoparentales	Larrue et Camphuis, 2010; Thouret et D'Ercole, 1996; Dwyer et al., 2004; Équipe de recherche	Permet une indication de la vulnérabilité économique et sociale des ménages pendant et après la crise. La mère (majorité des cas) ou le père doit gérer la crise et la logistique de l'évacuation, mais aussi doit supporter économiquement seul les dépenses liées aux dégâts.
	Pourcentage de demandeurs d'emploi	Dwyer et al., 2004; Larrue et Camphuis, 2010	Permet une indication de la vulnérabilité économique des individus pendant et après la crise
	Allocataires de revenu minimum	Larrue et Camphuis, 2010	
	Taux d'endettement / Épargne	Dwyer et al., 2004	Un taux d'endettement élevé d'un ménage suggère que sa marge de manœuvre est faible pour absorber économiquement l'impact d'une crise. À l'inverse, un niveau élevé d'épargne d'un ménage suggère qu'il a quelques ressources financières disponibles et prêtes à être utilisées en temps de crise.
	Ménages à faible revenu	Cutter et al. 2003; Dunning, 2011	Le postulat est que les ménages économiquement plus faibles seraient plus sensibles aux catastrophes. Un manque de ressources viendrait compliquer l'évacuation. Les ménages à faible revenu habiterait dans des zones plus à risque, dans des logements plus vieux et nécessitant plus de réparations.
	Locataires et propriétaires consacrant plus de 30% de leur revenu à se loger	Équipe de recherche	À coupler au revenu du ménage. Le postulat est que les ménages qui consacrent plus de 30% de leur revenu à se loger, n'ont pas beaucoup de flexibilité pour absorber économiquement l'impact d'une crise.
	Nombre de bâtiments commerciaux et industriels	Cutter et al. 2003	La valeur, la qualité et la densité de bâtiments commerciaux et industriels fournissent un indicateur de l'état de santé économique d'une communauté et des pertes potentielles en cas de catastrophe
	Nombre d'entreprises	Cutter et al. 2003	Fournit un indicateur de l'état de santé économique d'une communauté et des pertes potentielles en cas de catastrophe
	Nombre d'entrepôts	Cutter et al. 2003	
	Nombre d'hôtels	Équipe de recherche; Cutter et al. 2010	Fournit un indicateur de l'état de santé économique (activité touristique) d'une communauté et des pertes potentielles en cas de catastrophe. Fournit un indicateur quant au nombre de touristes à évacuer en cas de crise. Fournit un indicateur de la capacité d'hébergement d'une région pour les personnes évacuées

Thème	Indicateurs	Source	Justification
Logement	Nombre de logements	Larrue et Camphuis, 2010	Permet une indication de la population présente sur la zone en particulier durant la nuit, du nombre de résidences potentiellement endommagées et sur l'usage du sol général de la zone
	Nombre d'assurances logement	Dwyer et al., 2004; Équipe de recherche	L'assurance devient un facteur significatif dans la capacité d'une personne de payer des réparations ou reconstruire après une catastrophe. Fournit un indicateur quant à des bâtiments (lorsque les conditions d'assurance impose des moyens pour réduire le risque) et des personnes moins vulnérables.
	Nombre de permis de construire déposés	Larrue et Camphuis, 2010	Permet d'indiquer l'évolution du marché immobilier et par conséquent l'attractivité ou la pression foncière sur la zone
	Logements ayant besoin de réparations majeures	Cutter et al. 2003; Équipe de recherche	Offre un aperçu de l'état du parc immobilier dans la zone considérée. La façon de collecter cette donnée est importante, par exemple, dans le recensement canadien, cette donnée est subjective, elle est évaluée par chaque locataire selon ses connaissances en la matière (sic !)
	Âge des bâtiments	Équipe de recherche	Permet de retracer les normes (codes) de construction en vigueur lors de la construction des bâtiments
	Valeur de logements	Équipe de recherche	Permet une évaluation rapide de pertes potentielles. Du point de vue de la valeur économique, les logements qui sont évalués très chers impliquent plus de pertes potentielles. Inversement, il est possible que des secteurs bien évalués comportent aussi des logements mieux construits et plus résistants.
Thème	Indicateurs	Source	Justification
Éducation	Taux d'illettrisme	Schneiderbauer and Ehrlich in Birkmann, 2006; Équipe de recherche	Pourrait engendrer un revenu plus faible. Indique une possible faiblesse dans la compréhension de documents (plan d'évacuation, consignes, etc.)
	Part de la population ne comprenant ni le Français ni l'Anglais	Dwyer et al., 2004	Illustre la part de la population pouvant avoir des difficultés à comprendre des messages de prévention ou de secours ainsi que le besoin d'iconographie dans la communication du risque
	Part de la population ne possédant aucun diplôme	Dunning, 2011; Équipe de recherche	La concentration des personnes peu scolarisées peut être un indicateur de faible revenu
Thème	Indicateurs	Source	Justification
Santé	Part de la population couverte par une assurance maladie	Dwyer et al., 2004; Équipe de recherche	L'assurance devient un facteur significatif dans la capacité d'une personne de revenir à une situation normale. Évite un transfert temporaire de "poste budgétaire" entre santé et logement.
	Nombre de pensionnaires des établissements hospitaliers et de santé	Larrue et Camphuis, 2010; Dwyer et al., 2004	Détermine la part de personnes physiquement vulnérables sur la zone, en considérant que celles-ci peuvent manquer d'autonomie lors d'une évacuation
	Taux d'obésité	Thouret et D'Ercole, 1996; Schneiderbauer and Ehrlich in Birkmann, 2006	Donne un aperçu du nombre de personnes déjà plus fragiles avant même un sinistre, et qui peut-être nécessiteront plus d'attention et/ou de soins en cas d'évacuation
	Taux de maladies chroniques		
	Taux d'handicapés		

Thème	Indicateurs	Source	Justification
Emploi	Nombre d'emplois dans la zone	Larrue et Camphuis, 2010	Offre un aperçu du nombre d'emplois par secteur à risque
	Nombre d'établissements économiques	Larrue et Camphuis, 2010; Cutter et al., 2003	Indique le poids économique de la zone pour la ville ou l'agglomération
	Nombre d'emplois par entreprise	Larrue et Camphuis, 2010; Cutter et al., 2003	Fournit un indicateur de l'état de santé économique d'une communauté et des pertes potentielles en cas de catastrophe
	Chiffre d'affaires par secteur pour les entreprises		
	Taxes par entreprise	Larrue et Camphuis, 2010	Fournit un indicateur des pertes potentielles pour la ville en cas de catastrophe
	Part d'emplois "clés" exposés au risque d'inondation (diversité d'emploi)	Larrue et Camphuis, 2010	Détermine la vulnérabilité de secteurs clés à l'échelle régionale et la dépendance de l'économie à ceux-ci
	Proportion de personnes sans occupation (Taux d'inactivité)	Équipe de recherche	Démontre la concentration de la pauvreté, de la dépendance envers l'aide fiscale et des problèmes dans la capacité d'adaptation.
Thème	Indicateurs	Source	Justification
Valeur du sol	Valeur du sol	D'Ercole et Metzger, 2009	Vulnérabilité économique. Offre un aperçu des pertes économiques potentielles
	Valeur de logements	Équipe de recherche; Dunning, 2011	
Thème	Indicateurs	Source	Justification
Urbain	Nombre d'étages moyens des bâtiments	Schneiderbauer and Ehrlich in Birkmann, 2006; Équipe de recherche	Donne un aperçu des besoins nécessaires (échelle, nacelles, etc.) pour évacuer
	Présence ou absence de sous-sol	Larrue et Camphuis, 2010; Équipe de recherche	Donne un aperçu des dommages possibles (selon le type d'aléas)
	Nombre de ménages par bâtiment résidentiel	Schneiderbauer and Ehrlich in Birkmann, 2006	Permet une évaluation rapide de la population exposée sur la zone
	Nombre de maisons mobiles	Cutter et al, 2000	Donne un aperçu de ce type de bâtiment, plus fragile aux aléas, dans la zone
	Terrain environnant (pente...)	Schneiderbauer and Ehrlich in Birkmann, 2006; Équipe de recherche	Une meilleure connaissance permet de mieux évaluer l'aléa (intensité, occurrence, etc.) et les moyens à mettre en place en cas d'évacuation. Un terrain plus accidenté rend plus difficile l'évacuation.
	Altitude	Schneiderbauer and Ehrlich in Birkmann, 2006; Équipe de recherche	Une meilleure connaissance permet de mieux évaluer l'aléa (intensité, occurrence, etc.) et les moyens en mettre en place en cas d'évacuation. Un terrain plus accidenté rend plus difficile l'évacuation.

Thème	Indicateurs	Source	Justification
Milieu naturel	Dégradation des sols tonnes/an	Schneiderbauer and Ehrlich in Birkmann, 2006	Une meilleure connaissance du milieu naturel permet de mieux évaluer l'aléa (intensité, occurrence, etc.) et les moyens à mettre en place en cas d'évacuation. Un terrain plus accidenté/fragilisé rend plus difficile l'évacuation.
	Érosion		
	Taux de déforestation		
	Terre arable disponible	Kok et al. in Birkmann, 2006	
	Couverture de végétation naturelle		
	Taux de perte d'habitats naturels		
	Fragmentation des zones naturelles	Greiving, 2006	
	Perméabilité du sol (mm/h)	Équipe de recherche	
	Présence de milieux humides		
Aire des sites contaminés			
Thème	Indicateurs	Source	Justification
Infrastructures	Stations épuration	Larrue et Camphuis, 2010; D'Ercole et Metzger, 2009; Chardon et Thouret, 1994; Pigeon, 2008; Équipe de recherche	Permet d'avoir un aperçu du nombre et/ou de la localisation des infrastructures. Permet de déterminer le pourcentage de la population de la zone affectée par la mise hors service de ces bâtiments/infrastructures et équipements clés. Fournit un indicateur des pertes potentielles en cas de catastrophe
	Réseau routier		
	Réseau électrique		
	Réseau de gaz		
	Approvisionnement alimentaire et pharmacies		
	Stations d'essence		
	Zones ou lieux de conservations historique et patrimoniale		
	Logements sociaux		
	Loisirs (parcs et centres de loisir et culture)		
	Dépotoir ou entreposage de déchets (écocentre)		
	Réseau de télécommunications		
	Services de pompier et de police		
	Hôpitaux et centre de santé		
	Résidences pour personnes âgées		
	Établissements d'éducation		
	Garderies et centre de la petite enfance		
	Industries chimiques (dangereuses)		
	Prisons		
	Transport en commun (arrêt et ligne d'autobus, métro, train)		
	Transport actif - voies cyclables		
Ponts			
Débit des principaux axes de transport			

Les indicateurs socio-économiques impliquent généralement la population, le logement, le revenu des ménages, l'éducation, la santé. Parmi ces indicateurs, certains comme l'âge, le genre, la race et le statut socioéconomique (indicateurs décrivant la pauvreté, par exemple) sont généralement acceptés dans les recherches, notamment aux États-Unis [Cutter et al 2003, p. 245]. Malgré cet accord apparent sur les facteurs ayant une influence sur la vulnérabilité, il est important de « contextualiser » les indicateurs afin de les ajuster aux situations spécifiques des communautés [Birkman, 2007, p. 21]. À titre d'exemple, dans le cas de la présente étude, certains indicateurs montrés par le tableau 8 ne s'appliquent pas à la réalité montréalaise ou au cas des inondations. Il s'agit notamment de la variable « nombre d'assurances logement », car au Québec, dans le cas des inondations, c'est l'État qui se porte garant des dédommagements en cas de catastrophe. Il est nonobstant important de souligner que ces indemnités sont limitées et offertes dans des cas de sinistre majeur seulement. Aussi, la variable « part de la population couverte par une assurance maladie » ne s'applique pas au Québec, où l'ensemble de la population possède une assurance maladie universelle.

Par ailleurs, il est important de remarquer que la « contextualisation » des indicateurs doit également suivre le contexte géographique de l'étude de cas. Par exemple, l'évaluation de la vulnérabilité en milieu rural doit tenir compte des activités liées à l'exploitation des ressources comme l'agriculture et de la densité de la population. En effet, l'activité agricole, située souvent sur les bords des rives, peut être très affectée par une inondation majeure et une faible densité des habitations peut rendre les opérations de sauvetage complexes. En milieu rural, il est alors recommandé de prendre en compte les activités économiques critiques, voire la dépendance des communautés à un type d'activité ainsi que d'observer le degré de dispersion de la population à travers le territoire. En somme, sans égard au milieu dans lequel on se trouve, une réflexion approfondie est nécessaire afin de cibler les éléments, de la société et du territoire, qui sont les plus susceptibles d'avoir une influence sur la vulnérabilité du milieu.

À partir de la liste d'indicateurs préliminaire, nous avons procédé à compiler, auprès des institutions d'enseignement, gouvernementales et privées, les données nécessaires servant à représenter géographiquement les aspects déterminants de l'analyse de la vulnérabilité aux inondations. Certaines données comme la localisation des institutions d'enseignement, des garderies, des centres de la petite enfance et des logements pour personnes âgées ont été recueillies manuellement par la géoréférence des adresses postales inscrites dans des annuaires officiels ministériels. Bien que la compilation manuelle des variables puisse entraîner des erreurs dans la base des données et un manque de précision lié à la géoréférence des codes postaux, ces problèmes sont jugés minimes comparativement à l'apport de ces variables dans l'enrichissement de l'analyse de la vulnérabilité. D'autres indicateurs ont été éliminés, car les données nécessaires n'étaient pas disponibles et leur compilation manuelle aurait exigé des efforts qui dépassent le mandat de cette recherche. L'annexe D montre la source des diverses données recueillies. Toutes les données ont été mises à notre disposition gratuitement par les différents organismes contactés et par l'Université de Montréal qui acquiert des licences d'utilisation de nombreuses bases des données géographiques et statistiques aux fins de recherche de la communauté universitaire.

L'analyse de la littérature, la réflexion des membres de l'équipe de recherche et la disponibilité des données nous ont permis de faire un tri préliminaire de ces indicateurs pour en retenir 59, dont 18 indicateurs sociaux (caractéristiques sociodémographiques) et 41 indicateurs territoriaux (localisation d'infrastructures importantes) montrés en détail aux tableaux 9 et 10 respectivement.

Tableau 9 : Indicateurs de la sensibilité sociale

Thème	Indicateur
Population	Nombre d'habitants (Total de la population par AD)
	Densité de population (Population par Km2)
	Évolution de la population en ZI (Population 2006 - Population 2001)
	Pourcentage de la population de 65 ans et plus (75 ans et plus)
	Pourcentage de la population de 14 ans et moins
	Pourcentage de femmes
	Pourcentage de familles avec 3 enfants et plus
	Pourcentage de familles monoparentales
Emploi et revenu	Pourcentage de demandeurs d'emploi (Taux de chômage)
	Fréquence de faible revenu des familles monoparentales
	Fréquence de faible revenu des familles économiques
Logement	Taux de location (% de location sur l'ensemble des logements privés)
	Locataires consacrant plus de 30% de leur revenu au loyer
	Propriétaires dont plus de 30% du revenu est destiné au logement
Immigration	Pourcentage d'immigrants récents (depuis 2001)
	Part de la population ne comprenant ni le français ni l'anglais
Éducation	Part de la population de 25 ans et plus possédant seulement un diplôme de niveau secondaire
	Part de la population de 25 ans et plus ne possédant aucun diplôme

Réalisé par : Pamela Soto Abasolo, 2012

Tableau 10 : Indicateurs de la sensibilité territoriale

Thème	Indicateur
Population	Localisation des logements pour personnes âgées
	Localisation des logements sociaux
	Localisation des prisons
	Localisation des services de santé
	Personnes handicapées sur total population (Taux par territoire de CLSC)
	Localisation des garderies et CPE
	Localisation des écoles primaires et secondaires
Logement	Localisation des bâtiments (résidentiel)
	Âge des bâtiments
	Localisation des nouveaux bâtiments (différence rôle foncier 2004- 2010)
	Localisation des maisons mobiles
Économie et activités	Localisation des bâtiments (commercial et industriel)
	Localisation d'entrepôts
	Localisation d'hôtels
	Localisation des musées et des centres communautaires de loisirs et de sports
Environnemental	Localisation des sites contaminés
Infrastructures d'intérêt	Localisation d'épiceries
	Localisation des pharmacies
	Localisation des stations d'essence

Infrastructures critiques	Localisation des casernes de pompiers
	localisation des stations de police
	Localisation des industries de transformation et/ou d'entreposage de matières potentiellement dangereuses
	Localisation des stations d'épuration et des usines de filtration
	Localisation des stations de transmission d'électricité
	Réseau routier
	Localisation des secteurs d'accès aux ponts
Indicateurs recommandés	Présence ou absence de sous-sol
	Nombre d'employés (par AD ou par bâtiment)
	Pourcentage de surface imperméabilisée
	Localisation des dépotoirs ou entreposage de déchets
	Réseau de distribution d'électricité
	Réseau de télécommunications
	Réseau de gaz (distribution et transport)
	Occupation du sol
	Mises en chantier (données précises)
	Surfaces imperméabilisées
	Nombre d'entreprises / diversité d'entreprises
	Maladies chroniques
	Débit des rues principales
	Enquête O-D - mobilité
Localisation de stations de métro	

Réalisé par : Pamela Soto Abasolo, 2012

Disponibilité et qualité des indicateurs

Lors de l'étape de compilation des données, nous nous sommes rapidement aperçus de la diversité d'échelles dans lesquelles les données sont diffusées (secteur de recensement, aire de diffusion, territoires des CLSC, arrondissements, etc.). Cette asymétrie d'échelles constitue sans doute un défi majeur à l'analyse globale de la sensibilité du milieu aux inondations. D'une part, les données démographiques du recensement de la population de Statistiques Canada sont disponibles par aire de diffusion (AD) soit la plus petite unité géographique de diffusion de l'information. D'autre part, les données territoriales sont produites et émises par diverses agences gouvernementales, organismes privés et publics. L'éparpillement de la compilation de l'information fait en sorte que les échelles des données sont différentes. De plus, les données cartographiques sont nécessairement représentées par des entités géographiques distinctes (point, ligne et polygone), ce qui ajoute de la complexité à l'analyse du point de vue technique.

Concernant la disponibilité des données, nous avons eu accès à diverses bases de données et à des données géographiques concernant la population et le territoire. Au sujet de la qualité des données, quelques appréciations doivent être soulevées. Nous avons retenu l'aire de diffusion (AD) de Statistique Canada comme échelle d'analyse de la sensibilité sociale car il s'agit d'une petite unité géographique qui regroupe entre 400 et 700 habitants ce qui nous permet d'avoir une certaine précision. Cependant, il est à noter que l'utilisation des AD comporte quelques limites comme la difficulté à comparer les données avec les recensements précédents à cause des divers changements dans les limites physiques des AD. Aussi, par souci de confidentialité, à l'échelle de l'AD, les chiffres du

recensement sont arrondis à un multiple de cinq, ce qui a un certain impact sur la précision de notre analyse de la vulnérabilité⁵. Malgré ces contraintes, puisque les inondations agissent à une échelle très localisée sur le territoire, l'AD s'affiche comme la meilleure échelle disponible de diffusion des données pour notre cas d'étude.

Nous avons constaté l'absence ou la difficulté d'accès de certaines données territoriales. Il s'agit notamment des données sur l'aspect économique de la zone d'étude (données sur les entreprises et l'emploi) qui ne sont pas disponibles à une échelle satisfaisante et avec un degré de précision qui nous aurait permis de tirer des conclusions justes. À titre d'exemple, Statistiques Canada peut fournir des données sur le nombre d'emplois par AD par l'entremise de leur service personnalisé moyennant des frais qui peuvent atteindre plusieurs milliers de dollars. Malheureusement, la marge d'erreur de ces données est élevée et ne nous a pas permis, dans le cadre de notre cas d'étude, d'arriver à des conclusions intéressantes. La Ville de Montréal a, pour sa part, compilée jusqu'en 2000 des données sur l'emploi dans le Recensement des établissements et de l'emploi de Montréal (REEM) base des données à laquelle la municipalité n'a pas donné suite et dont les résultats sont aujourd'hui désuets. Les données sur l'emploi des communautés sont de grande importance puisqu'elles sont un indicateur puissant de la «*population de jour*» des secteurs. En effet, une partie de la population résidente de la zone d'étude quitte chaque jour son domicile pour le travail et les études, parmi d'autres activités, alors que d'autres populations intègrent la zone d'étude à risque d'inondation, pour y travailler. Dans l'éventualité d'une inondation, la perturbation des activités de travail dans le secteur touché est tout aussi importante à prendre en considération que l'inondation de lieux de résidence.

Un indicateur intéressant de la «*population de jour*» est offert par l'analyse de l'Enquête origine-destination commandée par l'agence métropolitaine de transport (AMT). Cette enquête offre un aperçu des déplacements de la population dans la grande région de Montréal. Malgré la grande qualité de cette base des données, son utilisation est très complexe et par sa nature même, l'enquête demeure une estimation des déplacements de la population. Notre échelle d'étude étant très fine, nous estimons qu'il serait préférable d'avoir des données précises sur la distribution d'emplois et des activités sur le territoire au lieu d'utiliser des approximations statistiques de l'enquête origine-destination de l'AMT.

D'autres données que nous jugeons de grande importance dans l'analyse de la sensibilité sont celles liées à la santé de la population. Ainsi, la faible quantité de données auxquelles nous avons eu accès concernant la santé (statistiques des personnes en situation de handicap) est compilée par territoire de CLSC qui couvre de superficies très grandes ce qui rend l'utilisation de ces statistiques difficilement conciliable avec la précision spatiale des AD. Nous avons aussi constaté avec surprise qu'il n'existe pas de répertoire complet et accessible des industries de traitement ou entreposage de matières potentiellement dangereuses sur l'île de Montréal. Cette même carence a été observée pour les centres de la petite enfance qui ne sont pas répertoriés de manière centralisée, mais qui doivent être localisés en contactant chaque bureau coordonnateur de la garde en milieu familial. De plus, de nombreux bureaux coordonnateurs ont refusé de nous fournir la liste des garderies en milieu familial sous leur tutelle aux fins de notre recherche.

Malgré ces quelques problèmes d'uniformité dans les données recueillies, la quantité et la diversité des données sont suffisantes pour mener une analyse du milieu qui permet d'arriver à des résultats pertinents. Bien que d'une part, la grande quantité d'information que nous possédons rende le choix méthodologique complexe, elle assure également que la description du territoire comporte suffisamment d'éléments pour expliquer le plus fidèlement possible la sensibilité de la zone d'étude aux inondations.

⁵ Statistique Canada, 2009. Normes et lignes directrices relatives à la confidentialité et à la qualité des données (Version publique) : Pratiques relatives à la confidentialité. Disponible en ligne : <http://www12.statcan.ca/census-recensement/2006/ref/notes/DQ-QD/Practices-Pratiques-fra.cfm>

Recommandations

Dans notre quête pour construire une base des données exhaustive d'indicateurs qui décrivent la sensibilité sociale et territoriale, nous avons pu constater certaines lacunes dans la disponibilité des données. De plus, il y a peu de coordination à l'échelle provinciale dans l'acquisition et la diffusion des données géographiques. Il est donc recommandé, autant à l'échelle municipale qu'à l'échelle provinciale, que des efforts soient faits dans la création et l'actualisation de nouvelles bases de données, de même que dans l'enrichissement des outils de diffusion d'information géospatiale à l'ensemble de la population. Notons que la Ville de Montréal a avancé dans cette voie par l'intégration de certaines données spatiales et certaines informations statistiques dans son «*Portail des données ouvertes*»⁶. Pour sa part, le gouvernement du Québec diffuse certaines données géographiques par le biais du Ministère des Ressources naturelles et de la Faune dans leur «*Géoboutique Québec*»⁷. D'autres ministères et organismes publics comme le Ministère de la Santé et des services sociaux et l'Institut de la statistique du Québec offrent également des Atlas sur des sujets spécifiques et des statistiques sur la population. D'autres données peuvent être construites à partir des répertoires de services (écoles, hôpitaux, logement social) en les localisant par le codage des adresses.

Nous avons constaté, que même si de nombreuses données existent, la décentralisation de leur compilation et diffusion rend l'accès et le partage de ces données difficile (garderies en milieu familial par exemple). Bien que des efforts aient été faits de la part des administrations de la Ville de Montréal et du gouvernement du Québec pour mettre en place des «*portails*» de diffusion des données, force est de constater que les listes des données offertes ne sont pas exhaustives et que beaucoup de travail reste à faire pour la centralisation de l'offre des données.

Pour ce qui est de l'analyse de la sensibilité de la communauté face aux inondations, nous recommandons d'améliorer l'offre de statistiques à une échelle plus fine que celle des territoires de CLSC pour les indicateurs de santé (handicapés, maladies chroniques). Il est de toute évidence, que, par souci de confidentialité, des données concernant la santé de la population devraient être utilisées avec précaution afin de ne pas laisser transparaître la localisation des personnes souffrant d'un handicap ou d'une maladie par exemple. Dans notre cas, ces données seraient croisées à une panoplie d'autres indicateurs de la sensibilité sociale, ce qui assure la confidentialité des données. Aussi, il serait de grande utilité de voir la mise en place d'un répertoire exhaustif des industries potentiellement dangereuses (risques technologiques) pour pousser dans la compréhension des impacts indirects d'une inondation qui peut entraîner par exemple des fuites de certaines matières dangereuses en cas d'inondation d'un bâtiment les entreposant. De plus, par leur grande importance dans la recherche, et ce, dans divers domaines, des données sur la distribution des emplois devraient être compilées de manière systématique et rendues disponibles aux fins de recherche.

4.3.1.2. Méthode de la sensibilité sociale et résultats

Afin d'évaluer la sensibilité sociale, nous avons testé deux méthodes distinctes qui peuvent être utilisées selon les objectifs et les capacités des municipalités. Elles sont intéressantes sur le plan des résultats obtenus et permettent de dresser des tableaux réels de la vulnérabilité des territoires. Nous avons d'une part appliqué «*l'Indice de sensibilité sociale (ISS)*», basé sur une approche essentiellement statistique qui semble être très répandue dans la littérature récente dans la recherche concernant la vulnérabilité. D'autre part, nous avons développé une méthode d'analyse plus itérative, intégrant, par le biais d'un atelier de travail, les avis de spécialistes locaux. Si cette approche peut présenter un certain degré de subjectivité, elle n'en demeure pas moins rigoureuse. Nous avons qualifié cette méthode d'analyse d'«*Indice de sensibilité sociale par addition d'indicateurs pondérés (ISSAIP)*».

⁶ Voir le Portail des données ouvertes mis en place par la Ville de Montréal en 2011 en ligne : <http://donnees.ville.montreal.qc.ca/>

⁷ Géoboutique Québec offre un certain nombre de couches cartographiques de base gratuites et certaines bases des données payantes. (Voir également le site «*Le Québec géographique*») En ligne : <http://geoboutique.mrnf.gouv.qc.ca/edel/pages/recherche/critereRechercheEdel.faces>

4.3.1.2.1. Indice de la sensibilité sociale (ISS)

L'indice de sensibilité sociale est une adaptation de l'indice de vulnérabilité sociale (SoVI) développée par Cutter et al. en 2003. Cette méthode consiste principalement à mener une méthode statistique appelée «*analyse des composantes principales*» (ACP). Dans cette recherche, Cutter et ses collaborateurs évaluent la vulnérabilité sociale aux aléas naturels de l'environnement. D'autres auteurs [Tate et Cutter, 2010 ; Cutter et Finch, 2008; Fekete, 2009 ; Mendes, 2009 ; Wood et al. 2010, Holand et al. 2011], ont également utilisé cette méthode dans le cadre de recherches concernant l'évaluation d'impacts des risques naturels telles les inondations de cours d'eau et côtières. De plus, le Ministère des Services sociaux et de la Santé du Québec (MSSS) a eu recours à l'ACP en 2003 pour développer un indice de «*défavorisation matérielle et sociale* » à l'aide de données démographiques [Pampalon et Raymond, 2003]. Nous avons choisi cette méthode car l'ACP s'est imposée dans le domaine de l'analyse de la vulnérabilité comme une méthode pertinente pour la compréhension et la simplification des systèmes sociaux complexes. Elle permet d'illustrer la vulnérabilité ou la sensibilité de la population face aux catastrophes naturelles à partir des données sur les caractéristiques sociales, économiques et structurelles du territoire.

Les données et la zone d'étude.

Les données nécessaires au calcul de l'ISS ont été extraites du recensement de la population 2006 de Statistiques Canada par aire de diffusion (AD). Les indicateurs sociaux utilisés pour la réalisation de l'ACP ont été préalablement normalisés par la méthode des *variables centrées réduites* (*Zscore*⁸). Il est important de noter que l'ACP ne peut pas se faire en la présence des valeurs zéro ou invalides. La matrice des données a été minutieusement étudiée afin de remplacer les valeurs manquantes et zéros par une valeur valide et plus grande que zéro (la moyenne de la variable par exemple). Le tableau 11 montre les indicateurs retenus pour la réalisation de l'ISS.

Tableau 11 : Liste d'indicateurs retenus pour l'ISS.

Indicateur
Nombre d'habitants (Total de la population par AD)
Évolution de la population en ZI (Population 2006 — Population 2001)
Pourcentage de la population de 75 ans et plus
Pourcentage de la population de 14 ans et moins
Pourcentage de familles avec 3 enfants et plus
Pourcentage de familles monoparentales
Pourcentage de demandeurs d'emploi (taux de chômage)
Fréquence du faible revenu des familles économiques après impôts
Taux de location
Pourcentage d'immigrants récents (depuis 2001)
Part de la population ne comprenant ni le français ni l'anglais
Part de la population des 25 ans et plus ne possédant aucun diplôme

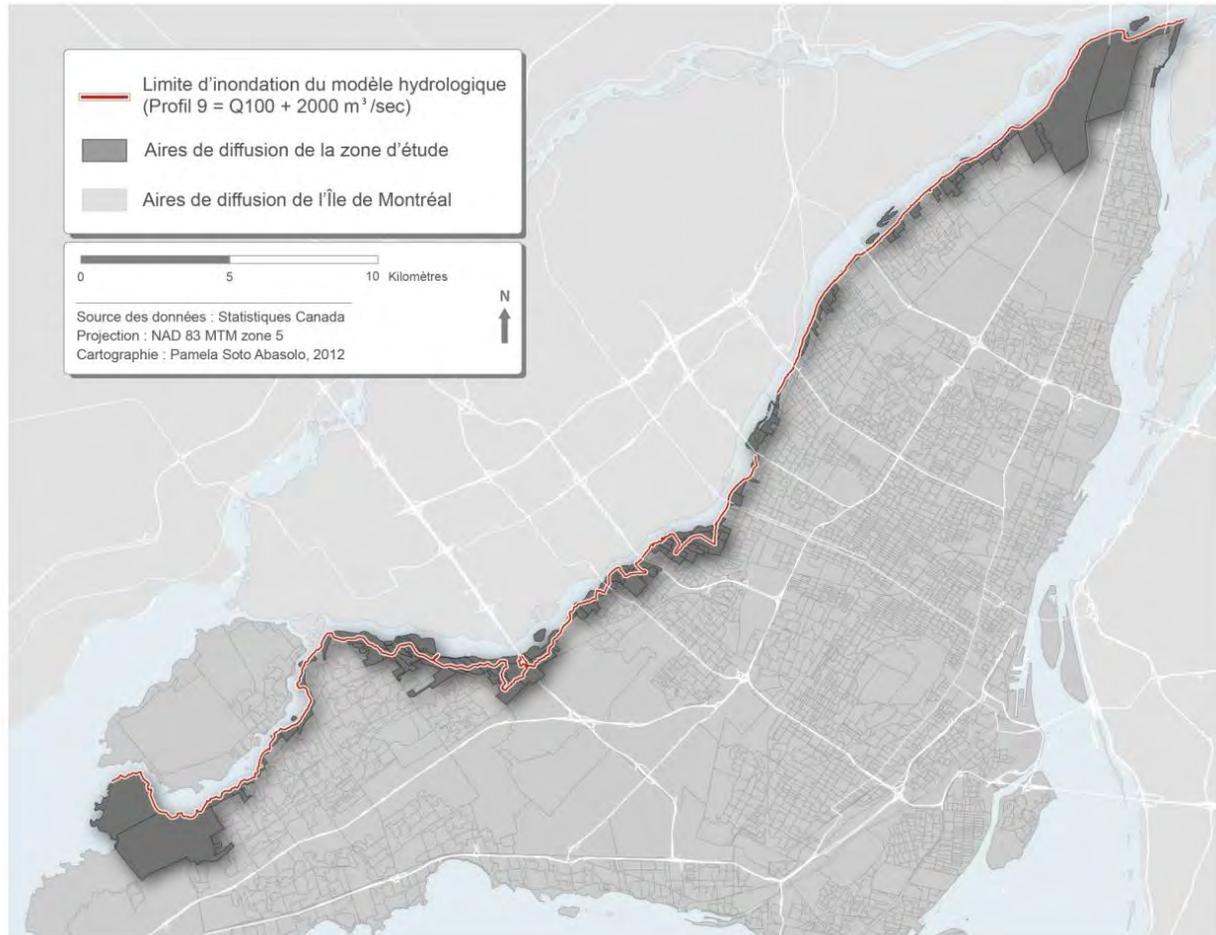
Réalisé par : Pamela Soto Abasolo, 2012

L'aire de diffusion s'affiche comme l'échelle la plus adaptée à notre cas d'étude. En effet, l'AD est la plus petite échelle dont les données du recensement de la population sont disponibles et elle est suffisamment précise pour capter la concentration de la sensibilité à l'intérieur de la zone exposée aux

⁸ Les variables centrées réduites (*Zscore*) visent à normaliser des variables présentées en unités différentes (pourcentage, nombre, dollars, etc.) en une même échelle. Les variables normalisées ont une moyenne égale à 0 et un écart type égal à 1
Zscore : $(X_i - \text{moyenne}) / \text{écart type}$

inondations. Alors, nous avons concentré notre analyse dans les AD qui touchent et qui sont contenues à l'intérieur de la zone d'exposition, soit la limite d'inondation décrite par le profil n° 9 de la simulation hydrologique⁹. La figure 16 montre la zone d'étude. La zone d'étude est couverte par 94 AD qui s'étendent sur 34,68 km².

Figure 16 : Zone d'étude. Aires de diffusion touchées par le profil d'inondation du modèle hydrologique (Profil 9 = Q100 + 2000 m³ / s)



Le calcul de l'ISS

L'ACP peut être calculé à l'aide de divers logiciels de modélisation et statistiques (MatLab, R, SPSS, etc.). Nous avons utilisé le logiciel SPSS 17.0 pour sa simplicité d'utilisation.

Comme nous l'avons mentionné, l'ISS consiste à réaliser une ACP, méthode statistique qui vise principalement à exposer "*un sommaire des patrons de corrélation entre les variables*" [Durand, 2005, p. 1]. En effet, l'ACP est un type d'analyse factorielle qui permet "*d'expliquer ou rendre compte de la variance observée dans la masse de données initiales en se limitant à un nombre réduit de composantes, définies comme étant des transformations mathématiques pures et simples des variables initiales*" [Baillargeon, 2003, p. 3].

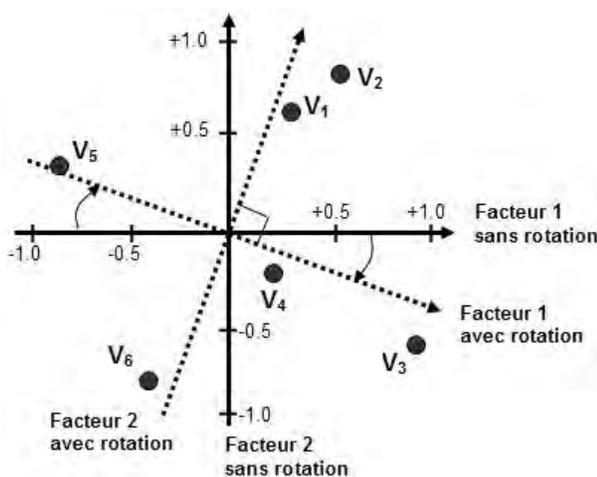
⁹ Voir la partie "Choix de débits des simulations numériques" de la section IV.2.1.1.3 Calage du modèle numérique.

L'ACP est donc une analyse statistique qui cherche à mettre en relation les variables de la masse des données initiales, soit, les douze variables montrées dans le tableau 9. Les composantes sont le résultat de cette mise en relation des variables initiales. L'objectif de cette méthode est donc de réduire le nombre des données à traiter tout en diminuant la redondance dans l'information expliquée par les variables [Cutter et al. 2003 ; Baillargeon, 2003].

Il s'agit alors d'appliquer l'ACP à tous les indicateurs retenus (tableau 9) afin de ressortir un certain nombre de composantes non corrélées entre elles (orthogonales). Les composantes qui sont extraites de l'ACP sont "*pivotées [...] de manière à simplifier la structure obtenue*" [Baillargeon, 2003 : 15]. Nous avons appliqué une rotation orthogonale (Varimax) qui cherche simplifier l'interprétation et la lecture des résultats. La figure 17 illustre le fonctionnement de la rotation orthogonale¹⁰.

L'ACP extrait autant de composantes que d'indicateurs d'entrée (11 indicateurs dans notre cas). Comme le montre le tableau 12, l'ensemble des 11 composantes explique le 100 % de la variance cumulée. Cependant, l'objectif principal de l'ACP étant la réduction du volume des données, il est nécessaire de limiter le nombre des composantes à celles jugées les plus importantes. Dans notre cas d'étude, nous avons utilisé le critère de Kaiser pour déterminer le nombre des composantes à retenir, soient celles qui ont une *valeur propre (Eigenvalue)* plus grande que 1. Nous avons donc retenu les 4 premières composantes qui expliquent 74,76 % de la variance de la masse initiale de données.

Figure 17 : Schéma du fonctionnement de la rotation orthogonale (Varimax) dans l'analyse en composantes principales (ACP).



Source : USherbrooke en ligne.

Tableau 12 : Variance totale expliquée par l'ACP

Composante	Valeurs propres initiales		
	Total (Eigenvalue)	% de la variance	% de la variance cumulée
1	2,73	24,85	24,85
2	2,42	22,00	46,85
3	1,82	16,56	63,41
4	1,23	11,35	74,76
5	,83	7,51	82,27
6	,70	6,37	88,63
7	,43	3,94	92,57
8	,34	3,06	95,63
9	,23	2,07	97,70
10	,16	1,47	99,17
11	,09	,83	100,00

Réalisé par : Pamela Soto Abasolo, 2012

¹⁰ Université de Sherbrooke. « Analyse en composantes principales ». En ligne. <http://pages.usherbrooke.ca/spss/pages/interdependance/analyse-en-composantes-principales.php> (consultée le 27 mars 2012)

Afin d'évaluer la signifiante de l'ACP, le test de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) "est un indice d'adéquation de la solution factorielle [...] qui indique jusqu'à quel point l'ensemble de variables retenu est un ensemble cohérent" [Durand, 2005 :10]. Le KMO varie entre 0 et 1, où un KMO inférieur à 0,5 est inacceptable, un KMO de plus de 0,9 est merveilleux (idem) et un KMO entre 0,6 et 0,8 est acceptable [Fekete, 2009 : 395]. Dans notre cas, le modèle a un KMO de 0,63 ce qui indique que les relations entre les indicateurs retenus sont satisfaisantes.

Chaque composante est liée aux différentes variables de manière plus ou moins importante. En effet, les composantes résultantes de l'ACP regroupent les indicateurs initiaux et ces mises en relation doivent être interprétées afin de comprendre l'information que chaque composante nous offre. Cette interprétation se fait à partir de la matrice des composantes après rotation par l'observation des valeurs supérieures à 0,5 (tableau 13).

Tableau 13 : Matrice des composantes après rotation

	Composante			
	1	2	3	4
Population totale			,966	
Variation de la population 2001-2006			,941	
Population de 0 à 14 ans		,770		
Population de plus de 75 ans	,756			
Familles avec 3 enfants et plus		,753		
Familles monoparentales		,688		
Familles économiques à faible revenu				,558
Taux de location	,745			
Pop. qui ne parle aucune langue officielle				,777
Taux d'immigration récente (depuis 2001)				,854
Pop. de plus de 25 ans sans aucun diplôme	,783			

Réalisé par : Pamela Soto Abasolo, 2012

Ainsi, la composante 1 par exemple, est fortement corrélée avec la population de 75 ans et plus, le taux de location et la population de 25 ans et plus n'ayant aucun diplôme. D'autre part, la composante 3 est corrélée avec les indicateurs population totale et variation de la population. C'est à partir de ces observations que nous avons pu interpréter le contenu des composantes et les renommer (tableau 14).

Tableau 14 : Matrice synthèse de l'interprétation des composantes

Composante	Variables les plus corrélées	Nom de la composante
1	- Population de plus de 75 ans - Taux de location - Pop. de plus de 25 ans sans aucun diplôme	Aînés, location et faible scolarisation
2	- Population de 0 à 14 ans - Familles avec 3 enfants et plus - Familles monoparentales	Familles et population jeune
3	- Population totale - Variation de la population 2001-2006	Concentration et la croissance démographique
4	- Familles économiques à faible revenu - Pop. qui ne parle aucune langue officielle - Taux d'immigration récente (depuis 2001)	Pauvreté et immigration

Réalisé par : Pamela Soto Abasolo, 2012

Dans la matrice des données résultant de l'ACP, les composantes sont des nouvelles variables (4 dans notre cas) qui combinent l'ensemble des données initiales et ce, pour chaque unité géographique (AD). Suivant la procédure menée par Cutter et al. (2003), nous avons additionné les valeurs des composantes pour chaque AD afin d'arriver à une valeur unique qui représente la sensibilité sociale de chaque secteur (ISS).

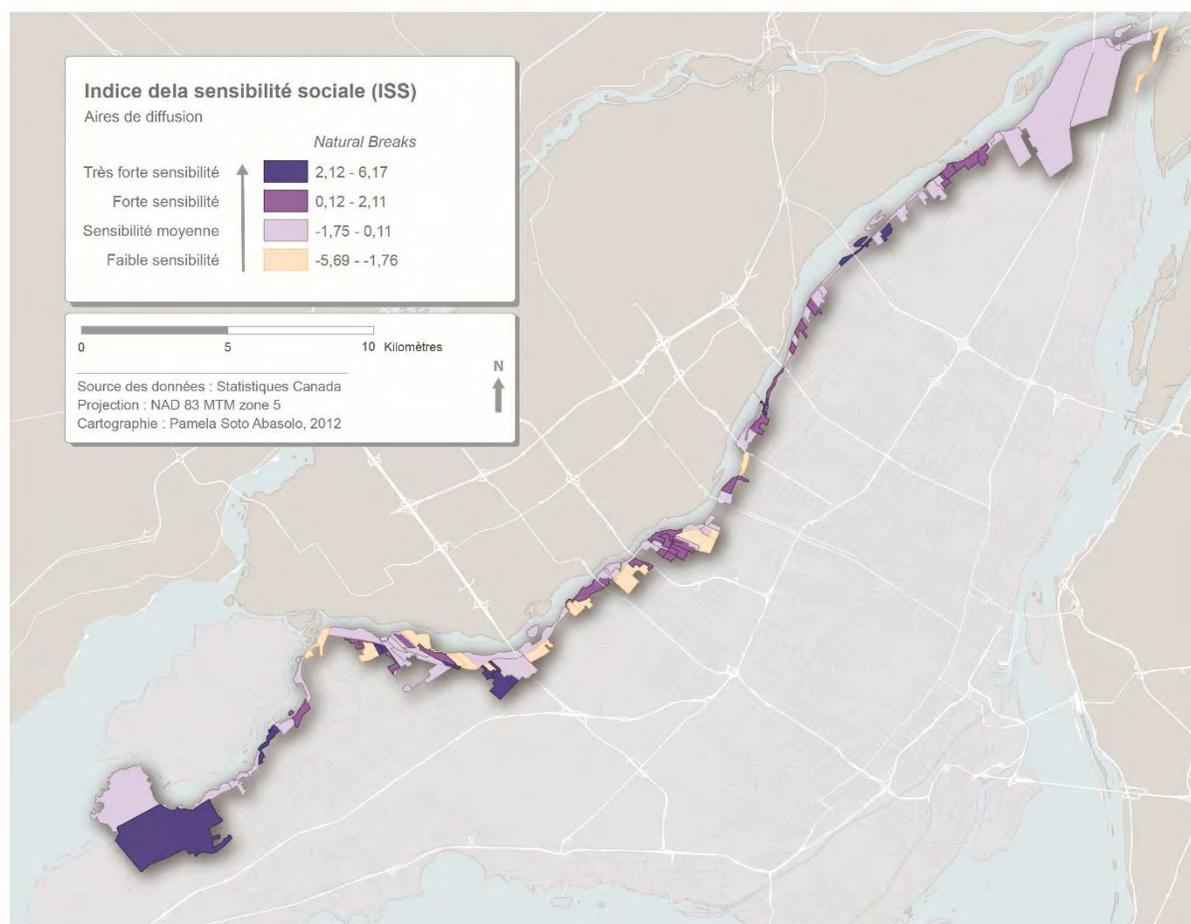
$$\text{ISS} = \Sigma (\text{Composante})$$

Formule 1

Le résultat de cette démarche correspond à une valeur unique qui désigne, à partir des variables initiales, le degré de sensibilité de la population de chaque AD. Étant donné que tous les indicateurs ont été normalisés avant le calcul de l'indice, les valeurs des indicateurs et de l'indice total sont parfois négatives et parfois positives. Une valeur négative de l'ISS pour une AD indique que, dans ce secteur, la sensibilité de la population est moins forte relativement à l'ensemble de la zone d'étude. Au contraire, les valeurs positives de l'ISS montrent qu'il y a, dans ces secteurs, une plus grande représentativité des indicateurs qui décrivent la sensibilité.

La cartographie des résultats de l'analyse permet d'observer spatialement la distribution de la sensibilité à travers de l'aire d'étude. La figure 18 montre les résultats.

Figure 18 : Résultat de l'indice de la sensibilité sociale (ISS).



Discussion des résultats de l'ISS

Comme il est possible de le voir sur la carte précédente, quelques secteurs éparpillés le long de la rive présentent une *très forte sensibilité* selon l'ISS mais il ne semble pas y avoir une concentration très forte de la sensibilité dans un endroit spécifique. Contrairement, la *faible sensibilité* semble être davantage concentrée dans l'ouest de l'île. La *forte sensibilité* pour sa part semble être concentrée au centre de la rive et à l'est de celle-ci. Le tableau 15 montre la fréquence des AD à l'intérieur des intervalles de l'ISS.

Tableau 15 : Nombre et pourcentage des AD à l'intérieur des intervalles de l'ISS.

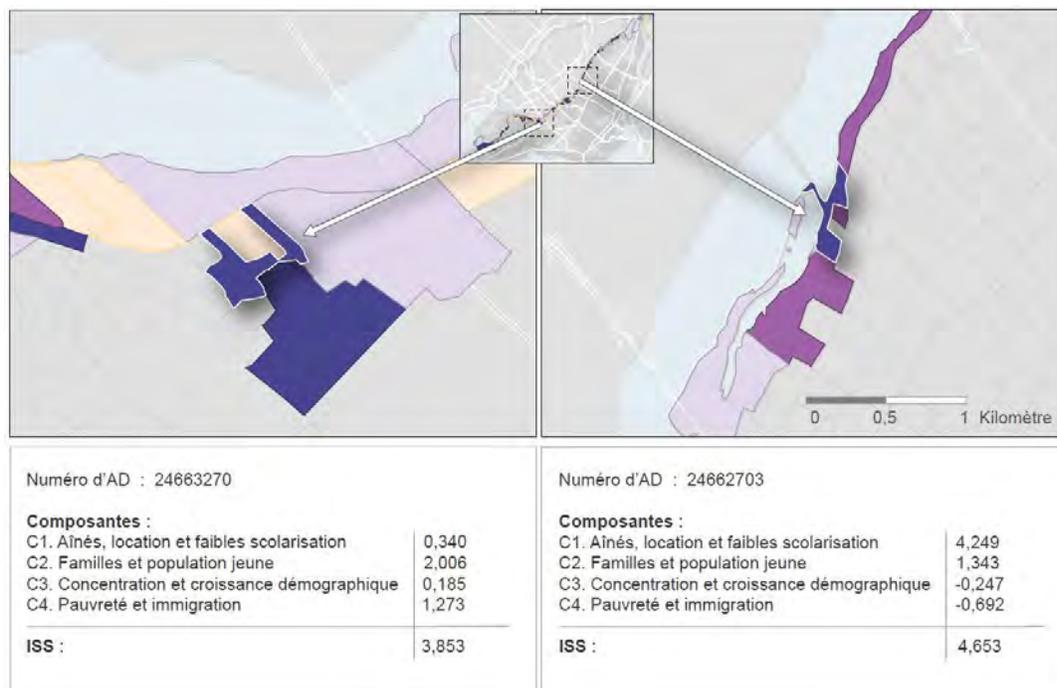
Intervalle de l'ISS	ISS (intervalles – Natural breaks)	Nombre d'AD	Pourcentage d'AD
Faible sensibilité	-5,69 - -1,76	15	15,96 %
Sensibilité moyenne	-1,75 - 0,11	41	43,62 %
Forte sensibilité	0,12 - 2,11	27	28,72 %
Très forte sensible	2,12 - 6,17	11	11,70 %
	Total	94	100 %

Réalisé par : Pamela Soto Abasolo, 2012

Près de la moitié des 94 AD qui couvrent le territoire d'étude se trouvent dans l'intervalle de la sensibilité moyenne (43,62 %) alors que la forte sensibilité et la très forte sensibilité sociale correspondent à 40 % des AD.

Afin de mieux comprendre l'ISS, notamment en ce qui concerne l'influence des composantes sur l'indice, la figure 19 montre deux exemples d'AD qui présentent une très forte sensibilité et les valeurs respectives de chaque composante.

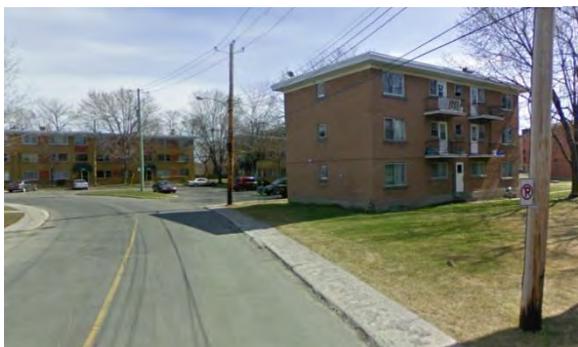
Figure 19 : Exemples des composantes des AD ayant un ISS à très forte sensibilité.



Réalisée par : Pamela Soto Abasolo, 2012

Dans les premiers des cas, l'AD a été jugé comme à *très forte sensibilité* avec un ISS égal à 3,853. Lorsqu'on observe les composantes, nous nous apercevons que cette *très forte sensibilité* est expliquée par une concentration des familles et de population jeune (composante n°2) ainsi qu'une concentration relativement forte de pauvreté et d'immigrants (composante n°4). Cette AD se trouve sur l'arrondissement Pierrefonds-Roxboro et se situe entre le boulevard Gouin et les voies du chemin de fer. Le secteur est principalement résidentiel à densité moyenne avec des maisons unifamiliales jumelées et des blocs d'appartements à loyer modique (Figure 20). Cette observation du contexte réel du territoire nous permet de valider l'importance des composantes 2 et 4. En effet, l'abondance des maisons unifamiliales est un indicateur de la présence de familles avec des enfants et la présence des appartements à loyer modique indique la présence des populations moins nanties et d'immigration récente.

Figure 20 : Parc d'appartements à loyer modique « Parc Cloverdale ».



Source : Google Street View.

Figure 21 : Aperçu des résidences pour personnes âgées à Montréal-Nord.



Source : Google Street View.

Dans le cas numéro deux, l'AD a un ISS égal à 4,653 qui s'explique principalement par la forte concentration d'ainés, de logements locatifs et un faible taux de scolarisation (composante n°1). Cette AD se situe dans l'arrondissement Montréal-Nord sur le boulevard Gouin, face au barrage d'Hydro-Québec. Le secteur présente une très forte concentration de résidences pour personnes âgées (Figure 21). Cette surreprésentation d'ainés sur le territoire explique l'importance de la composante n°1 dans le calcul de l'ISS dans l'AD.

Conclusion

Il est évident que l'ISS, comme tout autre modèle, est une simplification de la réalité et que l'échelle de disponibilité des données dicte le degré de généralisation territoriale des résultats. Malgré cela, la rigueur et l'esprit critique avec lesquels nous avons choisi les variables d'étude, ainsi que la fine échelle de diffusion des données (AD) disponible au Canada, assurent la pertinence et la portée de la méthode.

L'ISS s'affiche comme une méthode quantitative objective [Yeletaysi, 2009, p. 383] même si le choix de variables d'entrée du modèle est inévitablement subjectif. Aussi, l'information représentée par les composantes doit être interprétée, ce qui peut ajouter de la subjectivité aux résultats. Cependant, nous avons démontré que les résultats de l'ISS permettent effectivement de mettre en relief les secteurs qui comportent des caractéristiques qui influencent la sensibilité de la population (concentration de la pauvreté et concentration de personnes âgées par exemple).

L'ISS est une méthode répandue dans le domaine de l'analyse de la vulnérabilité, et ce, notamment car il s'agit d'une méthode rigoureuse qui peut être réalisée à partir des données de recensement facilement disponibles au Canada et ailleurs dans le monde. Les résultats de la méthode sont très

utiles pour offrir un aperçu général des disparités à travers le territoire et pour permettre aux gestionnaires et décideurs de cibler les secteurs prioritaires d'action pour la mise en place de mesures d'adaptation.

4.3.1.2.2. Indice de la sensibilité sociale par addition d'indicateurs pondérés (ISSAIP)

Une seconde méthode proposée pour l'analyse de la sensibilité sociale est ici présentée. Il s'agit d'un indice qui met en relation les indicateurs sociaux de la vulnérabilité par une méthode simple d'agrégation pondérée. Dans la littérature, nous avons identifié certains auteurs dans le domaine de la gestion des risques qui ont utilisé des méthodes semblables pour calculer la sensibilité ou la capacité d'adaptation des communautés [Fedeski et Gwilliam, 2007 ; Ebert et al. 2009 ; Simpson, 2006]

Les données et la zone d'étude.

Tout comme la méthode de l'ISS, l'ISSAIP nécessite une liste d'indicateurs initiaux choisis à partir d'une revue de littérature et d'une réflexion à propos des variables qui décrivent la sensibilité des communautés. Les indicateurs retenus dans le cadre de cette recherche sont issus du recensement de la population de Statistiques Canada de 2006 à l'échelle de l'AD. Ils décrivent les caractéristiques socioéconomiques et démographiques de la population comme l'âge, la pauvreté, l'éducation et l'immigration. Les indicateurs retenus pour la réalisation de l'ISSAIP sont présentés par le tableau 16.

Tableau 16 : Indicateurs de l'ISSAIP

Indicateur
Nombre d'habitants (Total de la population par AD)
Pourcentage de la population de 75 ans et plus
Pourcentage de la population de 14 ans et moins
Pourcentage de familles avec 3 enfants et plus
Pourcentage de familles monoparentales
Pourcentage de demandeurs d'emploi (taux de chômage)
Fréquence du faible revenu des familles monoparentales après impôts
Fréquence du faible revenu des familles économiques après impôts
Taux de location
Pourcentage d'immigrants récents (depuis 2001)
Part de la population ne comprenant ni le français ni l'anglais
Part de la population des 25 ans et plus ne possédant aucun diplôme

Réalisé par : Pamela Soto Abasolo, 2012

Pour la réalisation de cet indice, nous avons eu recours à une approche itérative par la consultation des spécialistes locaux sur la pertinence des indicateurs et également sur le choix des poids de ces derniers. La liste d'indicateurs du tableau 15, découle de cette réflexion collective. La section 4.3.1.2.4 de ce rapport explique en détail le fonctionnement et les résultats de l'atelier de travail.

En ce qui concerne la zone d'étude, nous avons utilisé la même zone retenue pour la réalisation de l'ISS. Il s'agit de 94 AD qui couvrent la rive de la rivière des Prairies (voir figure 15 dans la section précédente).

Le calcul de l'ISSAIP

Tout comme l'ISS, l'ISSAIP a été calculé avec le logiciel SPSS 17 et cartographié à l'aide du logiciel ArcMap 10.

La première étape de l'évaluation de l'ISSAIP correspond à étudier la matrice de corrélation des variables retenues. En effet, certaines variables sociales peuvent être trop corrélées, ce qui risque de faire comptabiliser deux fois le même phénomène dans l'indice. Les variables qui présentent une corrélation supérieure à 0,8 doivent faire l'objet d'une attention particulière pour n'en garder que les plus représentatives de la sensibilité. Par exemple, l'indicateur "*familles avec trois enfants ou plus*" est très corrélé ($r=0,85$) avec l'indicateur "*familles de plus de cinq personnes*". En effet, l'on pourrait s'attendre à ce que les familles de cinq membres et plus soient, dans la plupart des cas, composées d'au moins 3 enfants. Nous avons alors décidé de ne retenir que l'indicateur "*familles avec trois enfants ou plus*". L'ISSAIP vise donc à quantifier la sensibilité sociale à partir d'indicateurs qui décrivent des réalités diverses et distinctes.

Nous avons accordé à chaque indicateur un poids en fonction de son influence relative sur la sensibilité sociale aux inondations du secteur d'étude. L'échelle des poids varie entre 1 et 4, 1 étant un indicateur avec une *faible influence* sur la sensibilité sociale et 4 étant un indicateur avec une *très forte influence* sur la sensibilité.

Les poids des indicateurs ont été définis à partir d'une discussion entre experts (gestionnaire, chercheur, opérateur) dans le secteur de la gestion des risques et de l'aménagement du territoire. Cette discussion s'est déroulée lors d'un atelier d'une journée de travail organisé par notre équipe de recherche en septembre 2011 auquel 13 intervenants des milieux gouvernemental, municipal et universitaire ont participé. Lors de cet atelier de travail, l'impact de chaque indicateur sur la sensibilité sociale a été minutieusement examiné et argumenté. À titre d'exemple, nous avons déterminé que la concentration de population de plus de 75 ans a une *très forte influence* sur la sensibilité du secteur d'étude, alors que celle des jeunes de moins de 14 ans a une *forte influence*. Cette différence dans l'appréciation de la sensibilité de ces deux groupes d'âge de la population est expliquée par le fait que les enfants sont sous la tutelle d'au moins un adulte qui veille sur leur sécurité alors que, dans le cas des personnes âgées, l'accompagnement pour surmonter une période de crise n'est pas assuré. Le tableau 17 montre les poids accordés à chaque indicateur lors de l'atelier de travail. Les poids ont été établis par le consensus des participants de l'atelier.

Tableau 17 : Poids des indicateurs de l'ISSAIP

Indicateur	Poids
Nombre d'habitants (Total de la population par AD)	4
Pourcentage de la population de 75 ans et plus	4
Pourcentage de la population de 14 ans et moins	1
Pourcentage de familles avec 3 enfants et plus	2
Pourcentage de familles monoparentales	3
Pourcentage de demandeurs d'emploi (taux de chômage)	1
Fréquence du faible revenu des familles monoparentales après impôts	3
Fréquence du faible revenu des familles économiques après impôts	2
Taux de location	2
Pourcentage d'immigrants récents (depuis 2001)	2
Part de la population ne comprenant ni le français ni l'anglais	3
Part de la population des 25 ans et plus ne possédant aucun diplôme	2

L'ISSAIP se calcule par la somme des indicateurs pondérés. Tous les indicateurs ont été préalablement normalisés à l'aide de la méthode des variables centrées réduites (Zscore).

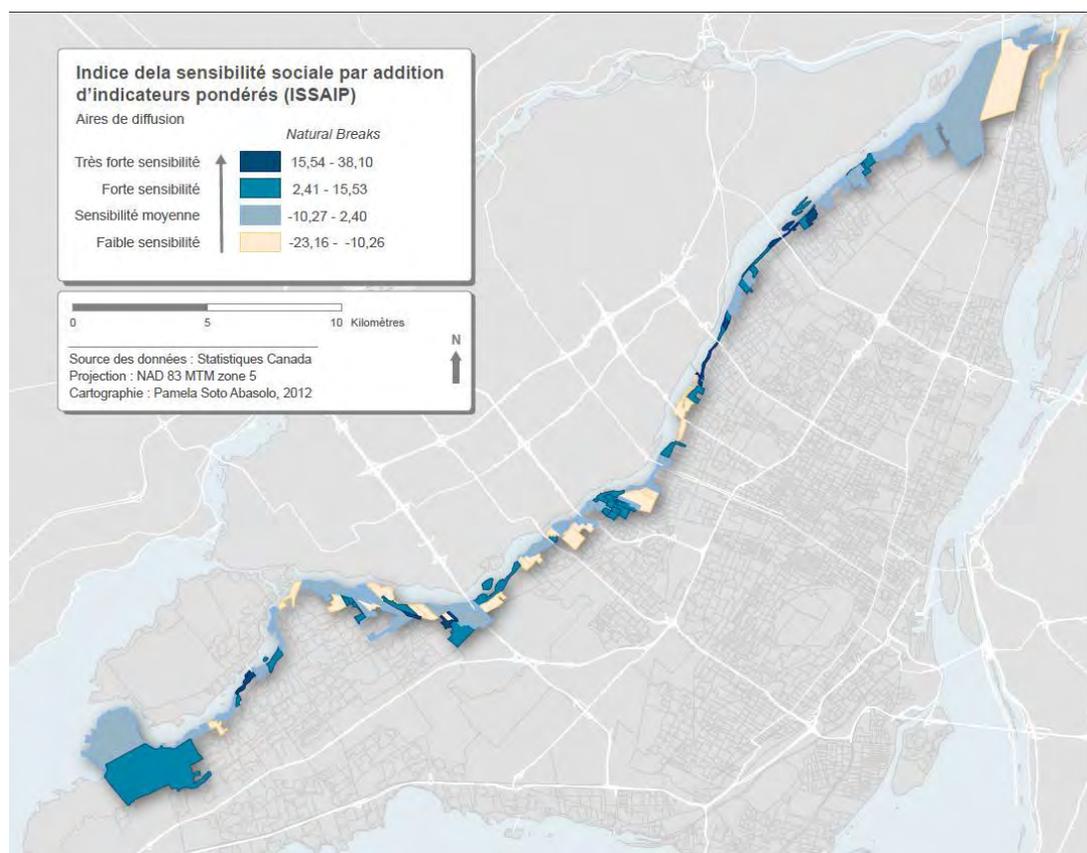
$$\text{ISSAIP} = \sum (\text{indicateur } x * \text{poids } x)$$

Formule 2

Le résultat de l'ISSAIP correspond à une valeur unique que désigne, à partir des indicateurs initiaux et des poids accordés, le degré de sensibilité de la population de chaque AD. Étant donné que tous les indicateurs ont été normalisés avant le calcul de l'indice, les valeurs des indicateurs et de l'indice total sont parfois négatives et parfois positives. Une valeur négative de l'ISSAIP pour une AD indique que, dans ce secteur, la sensibilité de la population est moins forte relativement à l'ensemble de la zone d'étude. Au contraire, les valeurs positives de l'ISSAIP montrent qu'il y a, dans ces secteurs, une plus grande représentativité des indicateurs qui décrivent la sensibilité.

La cartographie des résultats de l'analyse permet d'observer spatialement la distribution de la sensibilité à travers de l'aire d'étude. La figure 22 montre les résultats de l'ISSAIP pour le secteur de la rivière des Prairies.

Figure 22 : Résultats de l'indice de la sensibilité sociale par addition d'indicateurs pondérés (ISSAIP)



Discussion des résultats de l'ISSAIP

Selon l'ISSAIP, la *très forte sensibilité* se trouve surtout concentrée à l'est de l'île même si l'on observe trois AD qui présentent ce degré de sensibilité au centre et à l'ouest de la rive de la rivière des Prairies. Contrairement, la *faible sensibilité* se concentre davantage au centre-ouest de la rive alors que l'on trouve un groupe d'AD à *forte sensibilité* au centre de la rive à proximité du centre de détention de Montréal (Bordeaux). La *sensibilité moyenne* pour sa part, semble être répartie de manière égale à travers la rive. Le tableau 18 montre en chiffres la distribution des degrés de sensibilité à l'intérieur de chaque intervalle de la sensibilité.

Tableau 18 : Nombre et pourcentage des AD à l'intérieur des intervalles de l'ISSAIP.

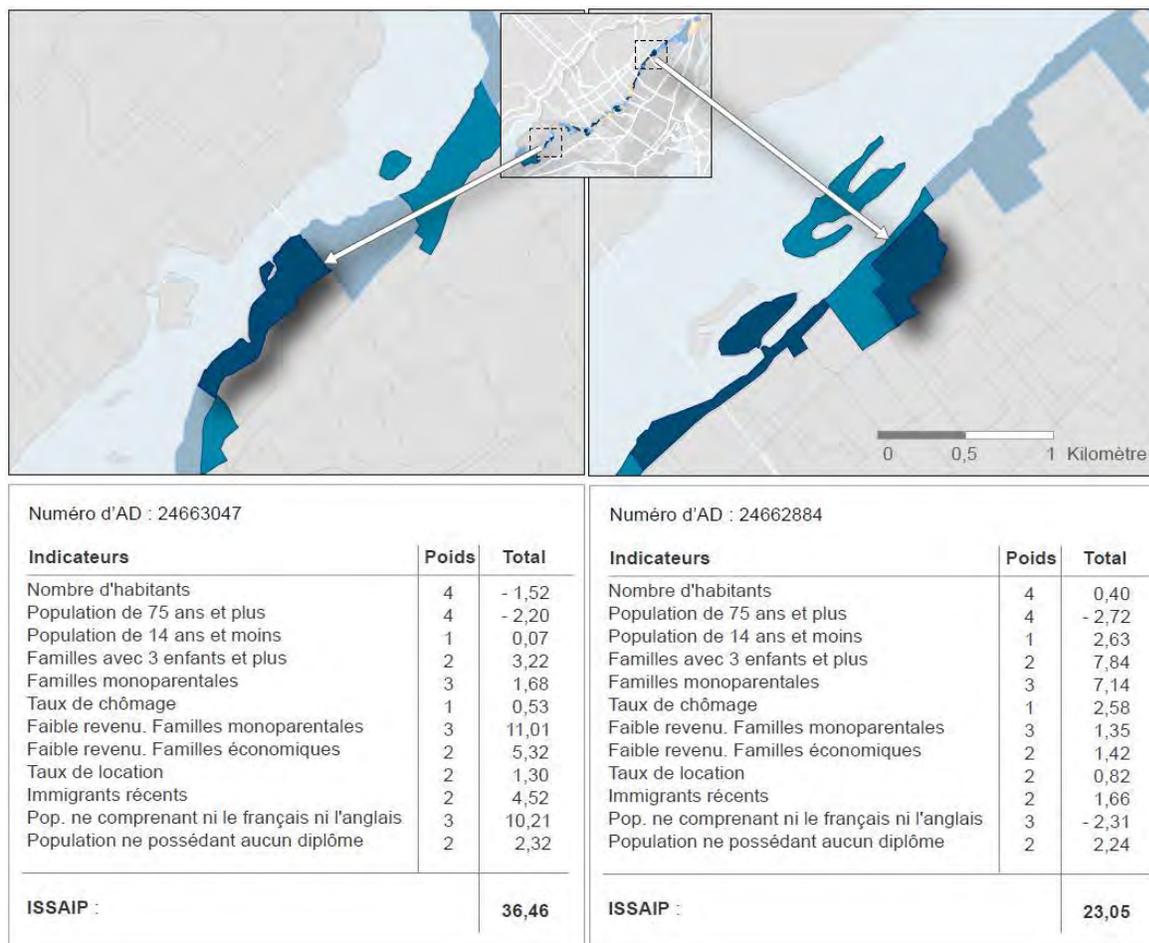
Intervalle de l'ISSAIP	ISSAIP (intervalles – Natural breaks)	Nombre d'AD	Pourcentage d'AD
Faible sensibilité	-23,16 - -10,27	20	21,28 %
Sensibilité moyenne	-10,26 - 2,40	28	29,79 %
Forte sensibilité	2,41 - 15,53	37	39,36 %
Très forte sensible	15,54 - 38,10	9	9,57 %
Total		94	100 %

Réalisée par : Pamela Soto Abasolo, 2012

L'ISSAIP montre que 21,28 % du territoire de notre cas d'étude affiche une faible sensibilité alors que près de 10 % de celui-ci montre une très forte sensibilité. La forte sensibilité est particulièrement importante dans l'indice puisqu'elle représente 40 % des AD qui couvrent le territoire d'étude.

La figure 23 présente deux exemples des AD à *très forte sensibilité* selon l'ISSAIP. Elle présente également les divers indicateurs pris en compte dans le calcul de l'indice afin de voir lesquels parmi eux ont le plus d'influence sur les résultats finaux de l'ISSAIP.

Figure 23 : Exemples des composantes des AD ayant un ISSAIP à très forte sensibilité.



Réalisée par : Pamela Soto Abasolo, 2012

Dans le premier des exemples, l'AD présente un ISSAIP de 36,46 qui est expliqué principalement par le faible revenu des familles (monoparentales et économiques) et la concentration d'immigrants récents dont un certain nombre ne comprend aucune des langues officielles du Canada (français ou anglais). Il est évident que le poids accordé à ces indicateurs a une influence sur les résultats. En effet, nous avons accordé un poids de 3 (forte influence sur la sensibilité) au faible revenu chez les familles monoparentales et au manque de compétences linguistiques de base, soient les deux indicateurs qui présentent la plus forte valeur totale dans le calcul de l'ISSAIP. Cette AD se situe à l'extrême ouest de la rive dans l'arrondissement Île-Bizard-Sainte-Genève. Le secteur est occupé en partie par un ancien noyau de villégiature développé avant les années 1920 (Sainte-Genève). Le cadre bâti est mixte et à moyenne densité, où des maisons unifamiliales détachées et jumelées ainsi que de multiplex à logements se côtoient. À l'est de l'AD, il y a une forte concentration de multiplex modestes (figure 24).

Figure 24 : Multiplex dans le district Sainte-Genève à l'ouest de Montréal.



Source : Google Street View.

Figure 25 : Habitation à loyer modique dans l'arrondissement Rivière-des-Prairies-Pointe-aux-Trembles.



Source : Google Street View.

Dans le deuxième exemple de la figure 25, l'ISSAIP de 23,05 est principalement expliqué par la présence importante des familles avec 3 enfants et plus et de familles monoparentales. Ces deux indicateurs ont été pondérés avec des poids de 2 (influence moyenne) et 3 (forte influence) respectivement. L'AD de cet exemple est occupée à l'est par des maisons unifamiliales détachées et à l'ouest par un complexe d'habitations à loyer modique (HLM). La présence des secteurs résidentiels unifamiliaux et de l'HLM sont indicateurs de la présence d'enfants dans le secteur. De plus, nous avons remarqué la présence d'une école primaire dans l'AD. Le complexe d'HLM, pour sa part, peut être un indicateur de concentration importante de familles monoparentales.

Conclusion

Les résultats de l'ISSAIP sont intéressants puisqu'ils font ressortir les secteurs où l'on trouve une concentration importante de la sensibilité et qui doivent faire l'objet d'une attention particulière. L'indice est facile à calculer et permet au lecteur des résultats de comprendre rapidement les indicateurs qui ont une plus grande influence sur l'indice. Nous avons confirmé que les résultats sont valides et s'expliquent par des éléments réels sur le territoire (concentration des familles nombreuses et des ménages monoparentaux par exemple).

L'ISSAIP est une méthode d'analyse qui permet d'avoir un tableau de la sensibilité sociale à travers le territoire en fonction de l'importance accordée à chaque indicateur social. Comme la méthode intègre des choix de pondération non purement statistiques, une certaine subjectivité est à noter dans l'indice,

autant dans le choix des variables que dans le choix de poids. Ces choix sont cependant réfléchis et justifiés d'autant plus que nous les considérons comme un avantage de la méthode, car ils peuvent varier d'une étude de cas à l'autre afin de s'adapter aux particularités locales. De plus, le processus itératif de réflexion autour du choix de variables et des poids s'est avéré un exercice de concertation enrichissante où la communication entre experts a permis d'élargir les connaissances des divers intervenants et d'améliorer, de manière générale, la compréhension des éléments déterminants dans l'évaluation de la sensibilité sociale aux risques.

4.3.1.2.3. Comparaison des deux méthodes sociales

L'ISS et l'ISSAIP s'affichent comme des méthodes pertinentes et dont les résultats sont valides. Comme nous l'avons mentionné, l'ISS, étant une méthode purement statistique, peut être difficile à réaliser et ses résultats peuvent être difficiles à interpréter. En revanche, l'ISSAIP est très facile à réaliser et à interpréter. De plus, l'ISSAIP ajoute à la réalisation de l'indice le besoin d'organiser des échanges entre experts pour le choix d'indicateurs et le choix de pondération qui s'avère une activité de grande importance dans la sensibilisation et l'apprentissage mutuel des acteurs.

En ce qui concerne les résultats des indices, le tableau 19 montre le nombre d'AD et ses pourcentages de représentativité par intervalle de la sensibilité.

Tableau 19 : Nombre et pourcentage des AD à l'intérieur des intervalles de l'ISS et l'ISSAIP.

Intervalle de la sensibilité	Nombre d'AD de l'ISS	% d'AD de l'ISS	Nombre d'AD de l'ISSAIP	% d'AD de l'ISSAIP
Faible sensibilité	15	15,96 %	20	21,28 %
Sensibilité moyenne	41	43,62 %	28	29,79 %
Forte sensibilité	27	28,72 %	37	39,36 %
Très forte sensible	11	11,70 %	9	9,57 %
Total	94	100 %	94	100 %

Réalisé par : Pamela Soto Abasolo, 2012

Pour ce qui est des intervalles extrêmes de *faible sensibilité* et *très forte sensibilité*, les deux indices accordent un nombre d'AD semblable à chaque intervalle. En effet, 16 % (15 AD) du territoire d'étude a une *faible sensibilité* selon l'ISS alors qu'il est de 21 % (20 AD) selon l'ISSAIP. D'autre part, la *très forte sensibilité* est représentée par 12 % (11 AD) du territoire selon l'ISS alors qu'il est de 10 % (9 AD) selon l'ISSAIP. Alors, la principale différence entre les deux indices en termes de la distribution de la sensibilité à l'intérieur des intervalles se trouve dans la *sensibilité moyenne* et la *forte sensibilité* qui sont inversement importantes selon l'indice.

Finalement, les résultats des deux méthodes montrent des distributions spatiales très semblables (figures 18 et 22). En effet, dans les deux cas, la *forte* et *très forte sensibilité* semble se concentrer davantage dans le centre et l'est de la rive de la rivière des Prairies alors que dans l'ouest de celle-ci on trouve un plus grand nombre d'AD jugées à *faible sensibilité*. Pour confirmer cette observation visuelle de la distribution géographique de la sensibilité, nous avons calculé le coefficient de corrélation de deux indices (ISS et ISSAIP). Le résultat montre que les deux indices sont très fortement corrélés ($r=0,9$). La forte corrélation des indices de la sensibilité sociale (ISS et ISSAIP) démontre que la distribution géographique de la sensibilité à partir d'indicateurs démographiques demeure manifestement la même sans égard à la méthode utilisée.

Ceci dit, les deux méthodes nous offrent de résultats pertinents, valides et très semblables. Le choix de la méthode à utiliser, pour une municipalité désirant identifier la sensibilité de ses communautés par

exemple, dépendra de ses préférences, ses ressources de temps et sa capacité à mobiliser des acteurs.

Dans notre cas d'étude, nous avons décidé d'utiliser les résultats d'ISSAIP pour la réalisation de l'indice de vulnérabilité présenté plus loin dans ce rapport. Cette décision est motivée par la grande importance que nous accordons aux résultats découlant de l'atelier de travail, au cours duquel nous avons compilé des avis, des conseils et des remarques inestimables qui se reflètent dans la justesse des résultats de l'ISSAIP. La section qui suit explique en détail le déroulement de cet atelier de travail.

4.3.1.2.4. Atelier

Il apparaît de plus en plus, dans la planification des risques, qu'il est essentiel d'intégrer les experts et professionnels locaux afin d'obtenir une analyse exhaustive et proche des réalités locales de la vulnérabilité. Nous avons fait le choix de développer une méthode multi-facettes, qui implique non seulement une analyse statistique stricte d'indicateurs, mais aussi une approche itérative qui intègre des chercheurs et professionnels externes à notre équipe. Ainsi, au-delà de l'objectif de cette recherche de développer une méthode d'analyse de la vulnérabilité, l'inclusion d'experts (tant chercheurs qu'opérateurs sur le terrain) est, à notre avis, de grande importance dans la création d'une véritable culture du risque qui permet d'instituer des communautés plus résilientes. Cette volonté d'adopter une approche de participation et d'apprentissage itérative a donc été concrétisée par l'organisation d'un atelier de travail plurisectoriel et multidisciplinaire en septembre 2011. L'objectif de l'atelier était d'une part d'intégrer les acteurs locaux dans le processus. D'autre part, l'hypothèse était que tant le choix des indicateurs que leur pondération nécessitaient des discussions. Dans les lignes qui suivent, le déroulement de l'atelier de travail est exposé ainsi que les résultats et les leçons apprises.

Déroulement de l'Atelier.

L'atelier de travail organisé dans le cadre de cette recherche a eu lieu le 15 septembre 2011 dans les locaux d'Ouranos où sept intervenants externes se sont joints à 4 membres de l'équipe de recherche pour discuter de la vulnérabilité sociale et territoriale dans le secteur de la rivière des Prairies. Le choix des participants de l'atelier a été guidé par le souci de réunir un riche éventail de disciplines et d'expertises dans cet exercice de réflexion et discussion. Ainsi, l'atelier s'est composé autant de chercheurs que de divers intervenants en gestion d'urgence et en planification travaillant pour des organismes publics à l'échelle municipale et provinciale. Il est à noter que nous avons pu compter sur la présence d'acteurs qui, œuvrant dans le secteur de la recherche à l'échelle internationale, ont apporté à l'atelier leur expérience sur les méthodes et enjeux à l'étranger.

Les participants, préalablement informés sur le contenu de la réunion (le matériel préparatoire leur avait été envoyé une semaine plus tôt), ont assisté à une présentation des diverses approches méthodologiques testées et retenues par l'équipe de recherche pour évaluer la sensibilité. Suite à une présentation générale de la recherche et des méthodes proposées, les participants ont été divisés en trois groupes, préalablement définis, pour discuter et déterminer les poids devant être accordés aux indicateurs de la sensibilité sociale. Les groupes de travail ont été choisis en fonction de l'expertise des acteurs et selon leur échelle d'action (internationale, municipale, provinciale, universitaire) afin de composer des groupes avec une diversité et complémentarité de visions. Un échange entre les équipes a suivi pour finalement arriver à un consensus sur la pondération des indicateurs. Le tableau 20 montre le résultat de cet exercice.

Tableau 20 : Pondération des indicateurs de l'analyse de la sensibilité sociale aux inondations dans le secteur de la rivière des Prairies déterminées par les groupes de l'atelier de travail.

Thème	Indicateur	Gr I	Gr II	Gr III	Final
Population	Nombre d'habitants (Total de la population par AD)	4	3	4	4
	Densité de population (Population par Km2)	0	3	0	0
	Évolution de la population en ZI (Population 2006 - Population 2001)	4	1	1	0
	Pourcentage de la population de 75 ans et plus	3	2	4	4
	Pourcentage de la population de 14 ans et moins	3	1	1	1
	Pourcentage de femmes	0	1	0	0
	Pourcentage de familles avec 3 enfants et plus	2	2	2	2
	Pourcentage de familles monoparentales	3	3	4	3
Emploi et revenu	Pourcentage de demandeurs d'emploi (Taux de chômage)	2	1	0	1
	Fréquence de faible revenu des familles monoparentales	3	3	0	3
	Fréquence de faible revenu des familles économiques	2	2	3	2
Logement	Taux de location (% de location sur l'ensemble des logements privés)	2	2	0	2
	Locataires consacrant plus de 30% de leur revenu au loyer	2	2	0	0
	Propriétaires dont plus de 30% du revenu est destiné au logement	2	2	0	0
Immigration	Pourcentage d'immigrants récents (depuis 2001)	2	2	1	2
	Part de la population ne comprenant ni le français ni l'anglais	4	2	3	3
Éducation	Part de la population de 25 ans et plus possédant seulement un diplôme de niveau secondaire	0	1	0	0
	Part de la population de 25 ans et plus ne possédant aucun diplôme	3	2	1	2

(0) Éliminé ; (1) Faible influence ; (2) Influence moyenne ; (3) Forte influence ; (4) Très forte influence

Réalisé par : Pamela Soto Abasolo, Nathalie Bleau, Isabelle Thomas et Guillaume D.-Dutil, 2012

Durant la discussion, les intervenants se sont entendus sur les indicateurs devant être éliminés de l'analyse alors que d'autres ont été proposés et d'autres ont été modifiés. À titre d'exemple, l'indicateur *pourcentage des femmes* a été éliminé avec l'accord de l'ensemble des participants, car il ne justifie pas le lien d'influence entre le nombre de femmes et la sensibilité du territoire. De plus, statistiquement

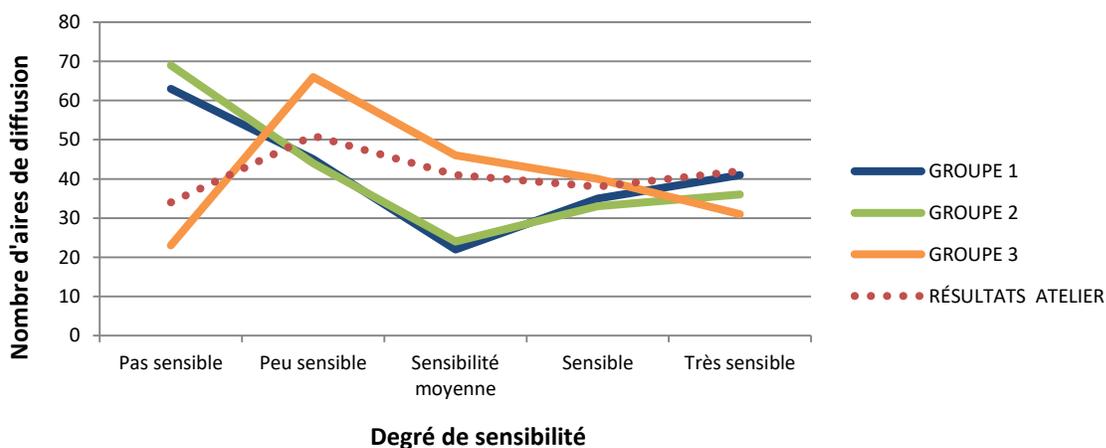
il s'agit d'un indicateur peu significatif puisque la distribution des femmes est très uniforme à travers la zone d'étude soit autour de 50% de la population dans chaque AD. D'autre part, l'indicateur *pourcentage de terres agricoles* comme activité économique critique dans le territoire a été proposé lors de l'atelier. Nous n'avons pas retenu cet indicateur dans le cadre de cette recherche puisque la zone d'étude retenue est presque entièrement urbanisée. Finalement, certaines variables ont été modifiées. Par exemple, le seuil de l'indicateur *pourcentage de la population âgée* dont le seuil est passé de 65 ans à 75 ans.

De manière générale, les participants à l'atelier avaient connaissance des bases des données disponibles au Canada et au Québec relatives à l'analyse social. De même, ils se sont montrés conscients des lacunes de la diffusion de l'information. Le besoin urgent de mettre en place une base des données sociales (données sur la santé et sur l'emploi par exemple) et territoriales (zones de risques technologiques par exemple) exhaustive et d'améliorer l'accès à celle-ci a fait consensus parmi les participants.

Il est important de souligner que lors des discussions autour des poids des indicateurs nous avons remarqué des points de vue très différents entre certains participants, ce qui a nourri des échanges étendus et riches en contenu. Le tableau 8 montre ces différences de perception sur l'influence de certains indicateurs sur la sensibilité de la population. À titre d'exemple, alors que pour une des équipes la densité de la population a été considérée comme ayant une forte influence sur la sensibilité sociale, pour les deux autres équipes cette variable a été jugée comme n'ayant aucune influence sur la sensibilité et a été alors éliminée. Pour les deux équipes qui ont rejeté la densité comme indicateur influent, leur décision tenait au fait qu'en considérant la densité et le nombre d'habitants, on calculait deux fois un même type d'indicateur, donc on lui allouait trop de poids. En revanche, toutes les équipes étaient d'accord sur la très forte influence des indicateurs *nombre d'habitants*, *pourcentage de la population de 75 ans et plus* et le *pourcentage des familles monoparentales* dans l'évaluation de la sensibilité sociale.

Les poids accordés aux indicateurs de divers groupes ont servi à calculer l'ISSAIP. Les résultats de l'ISSAIP pour chaque groupe de l'atelier de travail sont montrés dans le graphique 3.

Graphique 3 : Distribution des degrés de la sensibilité sociale par nombre d'aires de diffusion (206 AD au total) du secteur de la rivière des Prairies à Montréal à partir des résultats de l'indice ISSAIP des groupes de l'atelier de travail.



Réalisé par : Pamela Soto Abasolo, 2012

Le graphique 3 permet d'observer la distribution des aires de diffusion à travers les différents intervalles de la sensibilité de l'ISSAIP, et ce, pour chaque groupe de l'atelier. Les courbes du graphique qui représentent les groupes 1 et 2 présentent une même tendance de distribution accordant une absence de sensibilité à un plus grand nombre d'AD (entre 60 et 70 AD) alors que le nombre d'AD qui présente une sensibilité moyenne est moindre (un peu plus de 20 AD). Le groupe 3 présente une distribution très différente de la sensibilité accordant à un plus grand nombre de secteurs (AD) des niveaux de faible sensibilité (65 AD) et peu d'AD jugés non sensibles par l'ISSAIP (un peu plus de 20 AD). La part des AD sensibles et très sensibles demeure pratiquement la même dans les trois groupes notamment à cause de l'accord général concernant l'importance des indicateurs *nombre d'habitants, pourcentage de la population de 75 ans et plus et le pourcentage des familles monoparentales*. Le résultat final de l'atelier se situe dans un juste milieu et illustre le consensus entre les groupes de l'atelier.

L'atelier de travail nous a permis également de tester la méthode d'analyse de la sensibilité et de valider le modèle. La comparaison des résultats nous permet d'identifier si l'exercice d'implication de divers acteurs ayant des besoins et des demandes différentes a un impact majeur sur les résultats. À ce sujet, on observe que même si le choix des poids (et donc la vision de l'évaluateur) semble avoir un impact sur le degré de sensibilité faible et moyen de l'ISSAIP, les intervalles *sensible* et *très sensible* demeurent inchangés (voir graphique 2). Il est donc possible de conclure que certains traits de la population, décrits par les indicateurs de la sensibilité sociale, sont suffisamment déterminants pour s'imposer dans les résultats et faire ressortir les secteurs les plus sensibles. Les indicateurs *nombre d'habitants, personnes âgées et familles monoparentales* ont joué un rôle déterminant dans les résultats, car ils ont été jugés *influent* et *très influent* par l'ensemble des équipes de l'atelier pour la zone étudiée.

Au-delà de l'exercice de pondération d'indicateurs, l'atelier nous a permis de connaître la perception des divers intervenants sur les enjeux liés à la sensibilité des communautés à l'aléa inondation, autant localement que dans d'autres contextes. En effet, l'atelier de travail s'est avéré non seulement une opportunité pour identifier les besoins des participants en ce qui concerne la compréhension des enjeux, mais aussi sur la façon d'aborder les analyses de la sensibilité. En somme, cette expérience a été très utile, autant pour susciter l'intérêt aux enjeux liés à l'analyse de la sensibilité et à l'apprentissage réciproque que sur le plan méthodologique. Dans des projets futurs, il serait intéressant d'élargir cette approche participative par l'intégration d'ateliers de travail à diverses étapes de la réalisation de la recherche. Les ateliers feront partie de la méthode avec des objectifs ciblés et des participants seront sélectionnés selon ces objectifs spécifiques. Ce type de démarche permettra entre autres de rejoindre le plus grand nombre possible d'acteurs intéressés (domaines de l'aménagement, de la santé, etc.) ainsi que la population de la zone d'étude. L'introduction de simulations hydrologiques permet de susciter la prise de conscience de la sensibilité des communautés, de l'importance de la prévention et de l'intégration de l'incertitude liée aux changements climatiques dans les décisions. Ainsi, c'est non seulement par l'échange de connaissances, mais aussi par la prise de conscience que la planification participative et itérative fera avancer la recherche en sensibilité et adaptation.

4.3.1.3. Méthode de la sensibilité territoriale et résultats

Dans la recherche concernant la sensibilité et la vulnérabilité aux aléas, l'utilisation d'indicateurs sociaux qui décrivent la sensibilité de sa communauté est fort répandue [Cutter et coll., 2003; Dwyer et al., 2004; Boruff et Cutter, 2007; Brooks et al., 2005; Mendez et al., 2009]. En revanche, peu de recherches se concentrent sur l'évaluation de la sensibilité à partir des éléments territoriaux comme des infrastructures par exemple [D'Ercole et al., 2009; Ebert, 2009, Dwyer et al. 2004].

Les infrastructures relèvent d'une importance cruciale dans le développement et le fonctionnement du territoire et de la société. Appui des activités sociales, les infrastructures sont des lieux critiques qui doivent faire l'objet d'une attention particulière à l'heure de planifier la gestion des risques. Dans cette partie de notre recherche, nous allons nous concentrer sur l'évaluation de la sensibilité des communautés à partir de la localisation des infrastructures d'importance, autant pour la population locale que pour les utilisateurs des infrastructures à une plus grande échelle.

Dans l'analyse de la sensibilité territoriale, l'importance des systèmes d'information géographique (SIG) est indéniable. En effet, l'observation et analyse systématique des éléments sur le territoire sont

facilitées par les SIG qui permettent de comprendre les interactions entre les éléments observés et d'avoir une vue d'ensemble de la distribution des infrastructures.

Nous vous présentons dans cette section du rapport la méthode d'analyse de la sensibilité territoriale que nous avons retenue. Nous présenterons en détail les étapes de la réalisation de la méthode qui nous a permis de déterminer la sensibilité territoriale afin de s'assurer que la méthode demeure reproductible dans d'autres cas d'étude.

4.3.1.3.1. Indice de la sensibilité territoriale

Dans le cadre de cette recherche, nous nous sommes penchés sur l'évaluation de la sensibilité territoriale en nous inspirant d'une approche développée par Robert D'Ercole et Pascale Metzger (2009) qui tente de rendre compte «des éléments localisables susceptibles d'engendrer et de diffuser leur vulnérabilité à l'ensemble du territoire» [D'Ercole et al., 2009, p. 2]. Selon ces auteurs, «La vulnérabilité territoriale renvoie à l'idée qu'il existe, au sein de tout territoire, des éléments localisables susceptibles d'engendrer et de diffuser leur vulnérabilité à l'ensemble d'un territoire, provoquant des effets qui peuvent perturber, compromettre, voire interrompre son fonctionnement et son développement» [D'Ercole et al., 2009, p. 2]. D'Ercole et Metzger appliquent cette méthodologie au cas de Quito, capitale de l'Équateur, où ils évaluent, pour tout type d'aléa naturel s'appliquant, une analyse spatiale d'identification des secteurs de concentration de la sensibilité.

Il s'agit alors de répertorier les «enjeux majeurs» du territoire, soient les infrastructures qui sont susceptibles d'être affectées par une inondation. Nous avons répertorié 24 indicateurs regroupés à l'intérieur de six catégories (population, logement, économie et activités, environnement, infrastructures d'intérêt et infrastructures critiques) (tableau 21). Comme nous l'avons discuté dans la section de description des indicateurs de la sensibilité de ce rapport, nous avons compilé les données nécessaires à l'analyse de la sensibilité territoriale auprès de diverses agences privées et publiques agissant à diverses échelles. À cette étape, nous avons dû écarter certains indicateurs soit par manque de données (la présence ou l'absence des sous-sols par exemple) soit par inadéquation au cas d'étude faisant l'objet de cette recherche (présence ou absence de lieux d'enfouissement de déchets et surface agricole par exemple) (tableau 22).

Tableau 21 : Indicateurs retenus pour l'analyse de l'indice de la sensibilité territoriale

Thèmes	Indicateurs
Population	Localisation des logements pour personnes âgées
	Localisation des logements sociaux
	Localisation des prisons
	Localisation des services de santé
	Localisation des garderies et CPE
	Localisation des écoles primaires et secondaires
Logement	Localisation des bâtiments résidentiels
	Localisation des nouveaux bâtiments (différence entre le rôle foncier de 2004 et de 2010)
	Localisation des maisons mobiles
Économie et activités	Localisation des bâtiments (commercial et industriel)
	Localisation d'entrepôts
	Localisation d'hôtels et motels
	Localisation des bibliothèques, des centres communautaires de loisirs et de sports
Environnement	Localisation des sites contaminés
Infrastructures d'intérêt	Localisation d'épiceries
	Localisation des pharmacies
	Localisation des stations d'essence

Infrastructures critiques	Localisation des casernes de pompiers
	Localisation des stations de police
	Localisation des industries de transformation et/ou d'entreposage de matières potentiellement dangereuses
	Localisation des stations d'épuration et des usines de filtration
	Localisation des stations de transmission d'électricité
	Réseau routier
	Localisation des secteurs d'accès aux ponts (100 m)

Réalisé par : Pamela Soto Abasolo, Nathalie Bleau, Isabelle Thomas et Guillaume D.-Dutil, 2012

Tableau 22 : Indicateurs et données recommandés dans l'analyse de la sensibilité territoriale dans d'autres études de cas

Thèmes	Indicateurs
Indicateurs recommandés	Présence ou absence de sous-sol
	Nombre d'employés (par AD ou par bâtiment)
	Pourcentage de surface imperméabilisée
	Localisation des dépotoirs ou entreposage de déchets
	Réseau de distribution d'électricité
	Réseau de télécommunications
	Réseau de gaz
	Occupation du sol
	Mises en chantier (données précises)
	Surface agricole
	Nombre d'entreprises/diversité d'entreprises
	Maladies chroniques
	Débit des rues principales
	Enquête O-D - mobilité
	Localisation de stations de métro

Réalisé par : Pamela Soto Abasolo, 2012

L'indice de sensibilité territoriale (IST) est calculé à partir d'un système d'information géographique qui s'affiche comme un outil puissant pour la compilation, la visualisation et la compréhension des dynamiques de distribution des éléments à travers le territoire. Dans notre étude, nous avons utilisé le logiciel ArcMap 10 pour cartographier la sensibilité. L'ensemble des indicateurs retenus a été analysé pour vérifier la qualité des données et certains indicateurs ont été géoréférencés à partir du codage des adresses postales (garderies, résidences pour personnes âgées, écoles primaires et secondaires par exemple). Les données compilées, présentant de formes différentes (points, lignes, polygones), rendent la comparaison des indicateurs difficile. Pour pallier cette difficulté, nous avons uniformisé notre masse initiale des données en transformant les polygones (bâtiments, surfaces d'occupation du sol) en point par la représentation de leur centroïde. Les routes et les accès aux ponts, pour leur part, ont été comptabilisés en nombre de segments délimités par les intersections des rues.

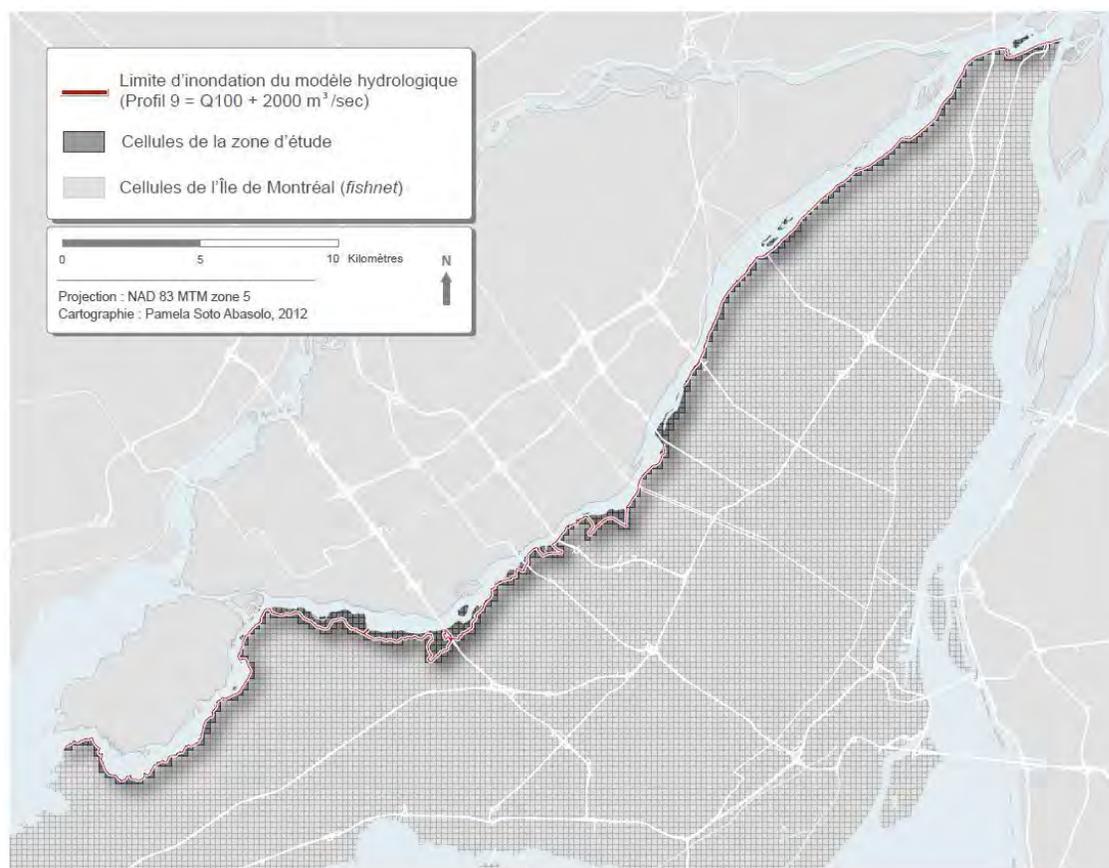
Afin d'analyser de manière systématique le territoire à risque d'inondation sur la rive montréalaise de la rivière des Prairies, l'IST propose de découper le territoire dans une grille où des cellules de 200 mètres par 200 mètres constituent l'échelle d'observation. Cette échelle a été choisie suite à divers tests où nous avons observé la distribution des infrastructures dans notre cas d'étude en fonction de la grandeur des cellules (75 m, 100 m, 200m). Il s'agit alors d'une analyse visuelle qui permet de trouver le juste compromis entre la précision et une taille de cellules suffisamment grande pour nous permettre de compter plusieurs infrastructures par cellule. Dans notre cas, en fonction de la dispersion des infrastructures, la superficie de 40 000 mètres carrés nous semble la plus adaptée.

Cette grille a été créée à l'aide de l'outil *Create Fishnet* d'ArcMap 10. Ce découpage du territoire dans des unités uniformes est intéressant puisqu'il permet d'éliminer l'influence de la superficie de l'unité d'étude comme c'est le cas pour les aires de diffusion ou des limites administratives comme des arrondissements par exemple, où un secteur de plus grande taille risque d'apparaître plus sensible, car il contient plus d'infrastructures dans son territoire.

Il est à noter que dans notre cas d'étude, l'occupation est généralement de densité moyenne et la quasi-totalité de la rive est aujourd'hui habitée. Dans ce contexte, nous avons décidé d'utiliser des cellules représentant 4 hectares de surface pour capter avec le plus de précision possible la distribution de la sensibilité territoriale. Ceci dit, dans le cadre d'une analyse de la sensibilité en milieu rural à faible densité des infrastructures, la taille de cellules peut être revue à la hausse afin de mieux s'adapter aux spécificités de chaque territoire.

Tout comme dans la méthodologie de l'analyse de la sensibilité sociale, nous avons limité le secteur d'étude à la zone qui correspond à la zone inondable telle que définie par le profil 9 d'inondation des simulations hydrologiques réalisées dans le cadre de cette recherche. Nous avons choisi le profil numéro 9 puisqu'il représente le scénario d'inondation le plus important parmi les scénarios simulés pour la rivière des Prairies (voir chapitre IV.2)¹¹. Ce profil d'inondation correspond à une crue centenaire à laquelle nous avons ajouté un débit de 2 000 m³/s. Cette zone d'étude est couverte par 527 cellules qui totalisent 21,08 kilomètres carrés. La figure 26 montre la zone d'étude retenue pour l'IST.

Figure 26 : Zone d'étude de l'Indice de la sensibilité territoriale (IST)



¹¹ Les autres profils d'inondations réalisées dans le cadre de cette recherche (profils 4, 5, 7 et 9) sont également analysés en relation avec la vulnérabilité au chapitre 4.4.

Nous avons ensuite déployé les données spatiales (points et lignes) décrivant les indicateurs sur la grille du découpage du territoire. La mise en relation spatiale de la grille avec les indicateurs nous permet de compter le nombre d'infrastructures à l'intérieur de chaque cellule. Cette opération a été produite par l'outil Spatial Join. Le résultat de cette étape est une table qui montre combien d'infrastructures de chaque indicateur présenté dans le tableau 21 sont contenues à l'intérieur de chaque cellule (figure 27).

Figure 27 : Aperçu de la table d'attributs de la base des données de la description de la sensibilité territoriale.

FID	Shape*	OID	Shape Leng	Shape Area	C garderie	C batim 20	C res priv	C pharmaci	C electr	C
952	Polygon	0	800	40000	0	0	291	1	0	
1226	Polygon	0	800	40000	0	7	213	0	0	
889	Polygon	0	800	40000	0	119	207	0	0	
575	Polygon	0	800	40000	0	49	192	0	0	
1213	Polygon	0	800	40000	0	0	165	0	0	
1187	Polygon	0	800	40000	0	90	101	0	0	
805	Polygon	0	800	40000	0	0	99	0	0	
829	Polygon	0	800	40000	0	0	96	0	0	
1071	Polygon	0	800	40000	0	33	93	0	0	

Réalisée par : Pamela Soto Abasolo, 2012

Comme il est possible de le constater, ces indicateurs sont très différents puisque certains, comme les logements par exemple, sont très présents sur le territoire ex : 9 817 logements résidentiels privés) alors que l'on trouve des infrastructures liées à d'autres indicateurs à seulement à quelques endroits (ex : une seule station d'épuration dans toute la zone d'étude). Afin de mieux observer les différences entre les indicateurs, le tableau 23 montre les statistiques descriptives telle la moyenne, l'intervalle et l'écart type des variables.

Tableau 23 : Statistiques descriptives des indicateurs de la sensibilité territoriale et détermination de sous-groupes d'indicateurs.

Sous-groupes	Indicateurs	N	Intervalle	Minimum	Maximum	Somme	Moyenne	Écart type
Logement	Logements résidentiels privés	527	291	0	291	9817	18,63	30,230
	Logements construits depuis 2004	527	119	0	119	1023	1,94	9,691
	Maisons mobiles	527	7	0	7	12	,02	,374
	Logements sociaux	527	2	0	2	7	,01	,130
Infrastructures critiques	Services de santé - Hôpitaux	527	1	0	1	2	,00	,062
	Services de santé - CHSLD	527	1	0	1	5	,01	,097
	Logements pour personnes âgées	527	2	0	2	28	,05	,271
	Stations d'épuration	527	0	0	0	0	,00	,000
	Stations de transmission d'électricité	527	0	0	0	0	,00	,000
Infrastructures et lieux d'intérêt	Garderies et CPE	527	3	0	3	32	,06	,296
	Stations d'essence	527	1	0	2	5	,01	,115

	Écoles secondaires	527	1	0	1	8	,02	,122
	Écoles primaires	527	1	0	1	12	,02	,149
	Bâtiments industriels	527	1	0	1	1	,00	,044
	Bâtiments commerciaux	527	5	0	5	73	,14	,536
	Prisons	527	1	0	1	2	,00	,062
	Lieux d'entreposage	527	0	0	0	0	,00	,000
	Sites contaminés	527	2	0	2	7	,01	,144
	Épiceries	527	0	0	0	0	,00	,000
	Pharmacies	527	1	0	2	8	,02	,137
	Stations de police et de pompiers	527	1	0	1	3	,01	,075
	Infrastructures de loisir et culture	527	0	0	0	0	,00	,000
	Industries polluantes	527	0	0	0	0	,00	,000
	Hôtels et motels	527	0	0	0	0	,00	,000
Réseau	Routes	527	59	0	59	2490	4,72	5,064
	Accès aux ponts	527	40	0	40	262	,50	2,539

Réalisé par : Pamela Soto Abasolo, 2012

Comme nous pouvons constater dans le tableau 23, à l'intérieur des 527 cellules qui couvrent la zone d'étude, il y a certains indicateurs qui n'ont aucune infrastructure valide dans la zone en fonction des données que l'on possède. C'est le cas des indicateurs sur la localisation des «*stations d'épuration*», «*stations de transmission d'électricité*», des «*lieux d'entreposage*», des «*épiceries*», des «*infrastructures de loisir et de culture*», des «*industries polluantes*» et des «*hôtels et motels*». De plus, on constate qu'il y a des disparités importantes entre les variables concernant les logements et les autres indicateurs. En effet, tandis que l'on compte entre 0 et 291 «*logements résidentiels privés*» par cellule, d'autres indicateurs comme les «*hôpitaux*» ou les «*écoles primaires*» affichent une fréquence entre 0 et 1 infrastructure par cellule. Ceci est normal puisqu'on retrouve beaucoup plus de logements que des infrastructures vouées aux services comme des écoles et des stations de police dans la zone d'étude. Cependant, il est nécessaire d'accorder une importance accrue aux infrastructures critiques, qui jouent un rôle clé dans le fonctionnement du territoire et de la société.

Pour pallier cette situation, nous avons divisé la masse des données en sous-groupes (voir tableau 23) séparant ainsi les variables à l'intérieur de quatre thématiques : Logement, infrastructures critiques, infrastructures et lieux d'intérêt et réseau. Suivant la méthode de D'Ercole et Metzger (2009), nous avons ensuite additionné le nombre d'infrastructures de chaque indicateur à l'intérieur des sous-groupes. Ces résultats ont ensuite été normalisés par la méthode des variables centrées réduites (Zscore). La normalisation des valeurs permet de ramener les indicateurs à une même échelle et d'atténuer ainsi l'écart entre les indicateurs de logements et les autres indicateurs.

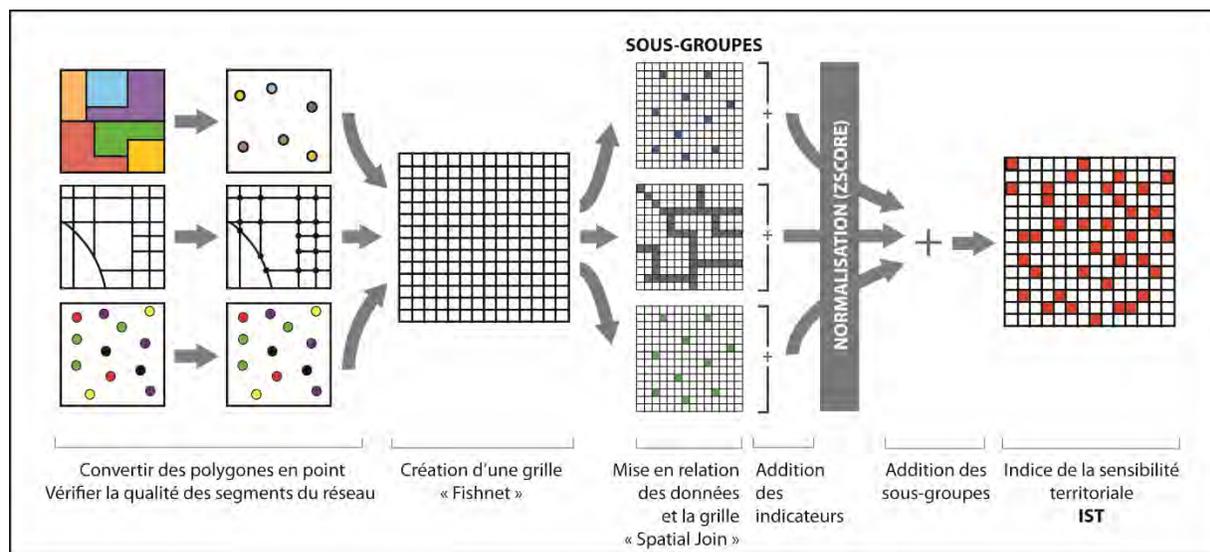
Suite à cette étape, et suivant la méthodologie développée par Robert D'Ercole et ses collaborateurs, nous avons additionné les résultats normalisés de quatre sous-groupes décrits précédemment, pour arriver à un résultat global qui correspond à l'indice de sensibilité territoriale (IST).

$$IST = \sum (C_{xi})$$

Formule 3

L'IST est égal à la somme des valeurs normalisées des sous-groupes d'indicateurs (G_i) pour chaque cellule. L'indice résultant décrit la sensibilité territoriale de la zone d'étude en fonction des indicateurs retenus. Ainsi, la figure 28 schématise les étapes du calcul de la sensibilité territoriale.

Figure 28 : Schéma des étapes de la réalisation de l'indice de la sensibilité territoriale.



Réalisée par : Pamela Soto Abasolo, 2012

Les indicateurs de la sensibilité territoriale n'ont pas été pondérés ou hiérarchisés en raison de la difficulté d'établir un ordre d'importance à l'intérieur d'une gamme d'infrastructures avec des tailles et des vocations très diverses ainsi qu'avec des rôles et des interactions dans l'espace très complexe à isoler. À titre d'exemple, dans l'exercice de réflexion sur la possibilité de pondérer les infrastructures, nous nous sommes vus confrontés à comparer et à prioriser des infrastructures aussi différentes qu'un hôpital avec 200 lits et une école primaire de 500 élèves. Ainsi, il s'avère très difficile d'accorder plus d'importance a priori à l'école puisqu'elle a une plus grande capacité sans se questionner à propos du rôle de l'infrastructure, de la valeur accordée par la société, de son aire d'influence et de son adaptabilité aux risques d'inondation. Alors, une hiérarchisation des infrastructures demande un effort de taille dans la compréhension du fonctionnement de chacune de celles-ci afin d'identifier les caractéristiques comme la dépendance des activités se déroulant dans les bâtiments, l'influence de ces activités et le rôle des infrastructures dans la gestion de la crise (voir l'analyse de la vulnérabilité de D'Ercole et Metzger, 2009). Dans le cadre de cette recherche, nous ne nous sommes pas penchés sur l'analyse qualitative de chaque infrastructure, mais nous reconnaissons l'importance et la pertinence de l'analyse détaillée de chaque élément du territoire qui nous permettrait d'identifier les sensibilités indirectes, sources des effets domino qui peuvent afficher des conséquences d'une catastrophe au-delà des limites de l'exposition à l'aléa.

La cartographie de l'indice permet d'observer la distribution et la concentration spatiales de la sensibilité territoriale à travers la zone d'étude. Nous avons fixé à quatre les intervalles de la sensibilité allant de faible à très forte sensibilité territoriale selon la méthode des *seuils naturels de Jenks*. Cette méthode repose sur un découpage des classes déterminé de manière à minimiser la variance¹² intraclasse et à maximiser la variance. Elle a l'avantage de mettre en avant un découpage où les éléments d'une même classe sont les plus semblables possible (faible variance intra-classes) et de délimiter les différents blocs (forte variance inter-classes). Cette méthode est plus rigoureuse que celle des seuils naturels qui consiste à séparer les classes visuellement, et respecte bien la structure des données. La figure 29 montre ces résultats.

¹² Valeur moyenne du carré des écarts à la moyenne

Comme il est possible de voir dans la figure 29, les secteurs à l'extrême est de l'île ainsi qu'au centre-ouest de la rive présentent une *faible sensibilité* alors que la *très forte sensibilité* apparaît comme étant très concentrée sur certains secteurs éparpillés le long de la rive. Pour ce qui est de la *sensibilité moyenne* de la *forte sensibilité*, nous retrouvons des cellules dispersées sur l'ensemble de la rive de la rivière sans présenter de concentration spatiale particulièrement forte dans un lieu précis. Le tableau 24 montre, en chiffres, la distribution de la sensibilité territoriale selon les intervalles de l'IST. Le tableau montre que la zone d'étude affiche une prépondérance des secteurs jugés à *faible sensibilité* (47,63%) alors que les secteurs *très sensibles* ne représentent que 4,93 % de l'ensemble du territoire.

Figure 29 : Résultats de l'indice de la sensibilité territoriale.

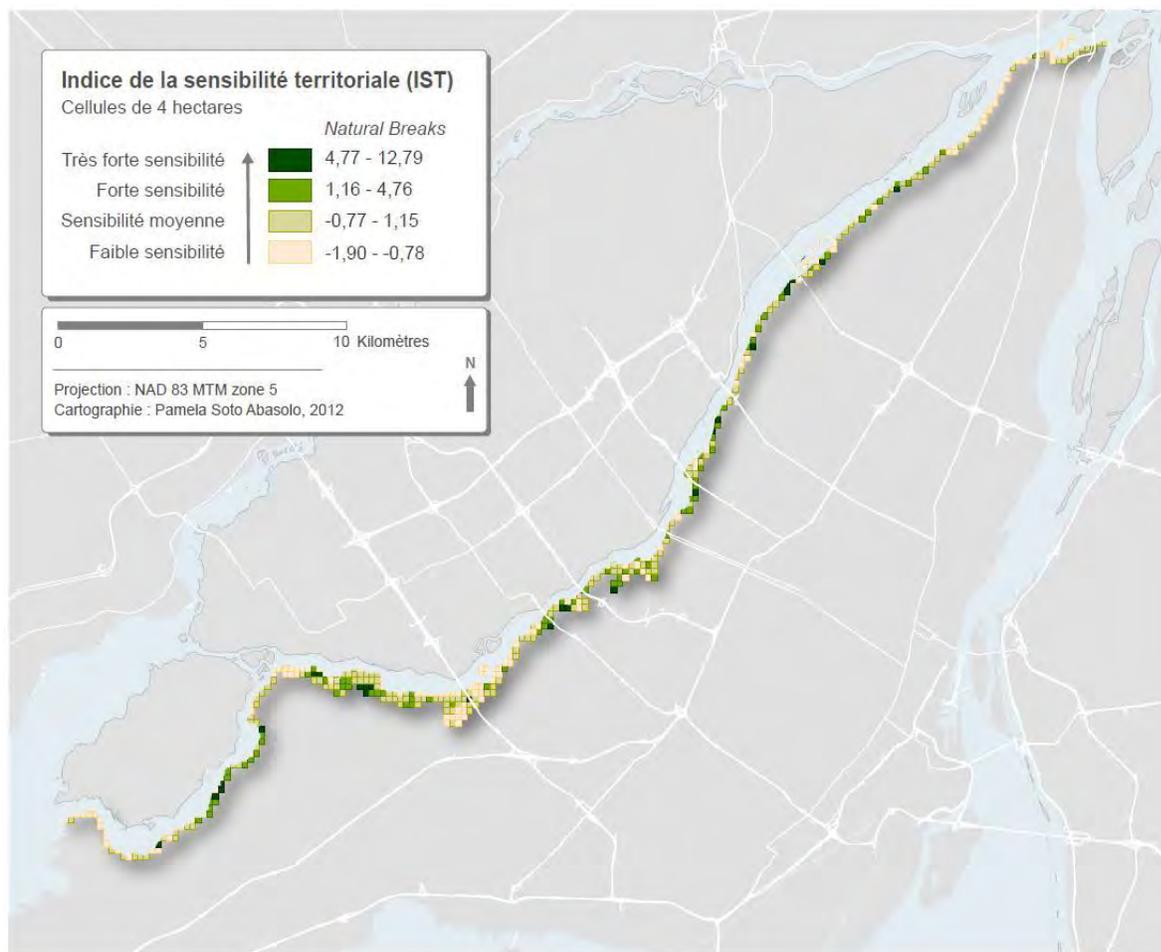


Tableau 24 : Statistiques des intervalles de la sensibilité de l'IST

Intervalle de l'IST	IST (intervalles – Natural breaks)	Nombre de cellules	Pourcentage de cellules
Faible sensibilité	-1,90 - -0,78	251	47,63 %
Sensibilité moyenne	-0,77 - 1,15	165	31,31 %
Forte sensibilité	1,16 - 4,76	85	16,13 %
Très forte sensible	4,77 - 12,79	26	4,93 %
	Total	527	100 %

Ces résultats nous guident vers les secteurs qui présentent une forte sensibilité afin de comprendre quel type d'infrastructures est en jeu et afin de pouvoir planifier l'adaptation et la gestion des risques de ces secteurs.

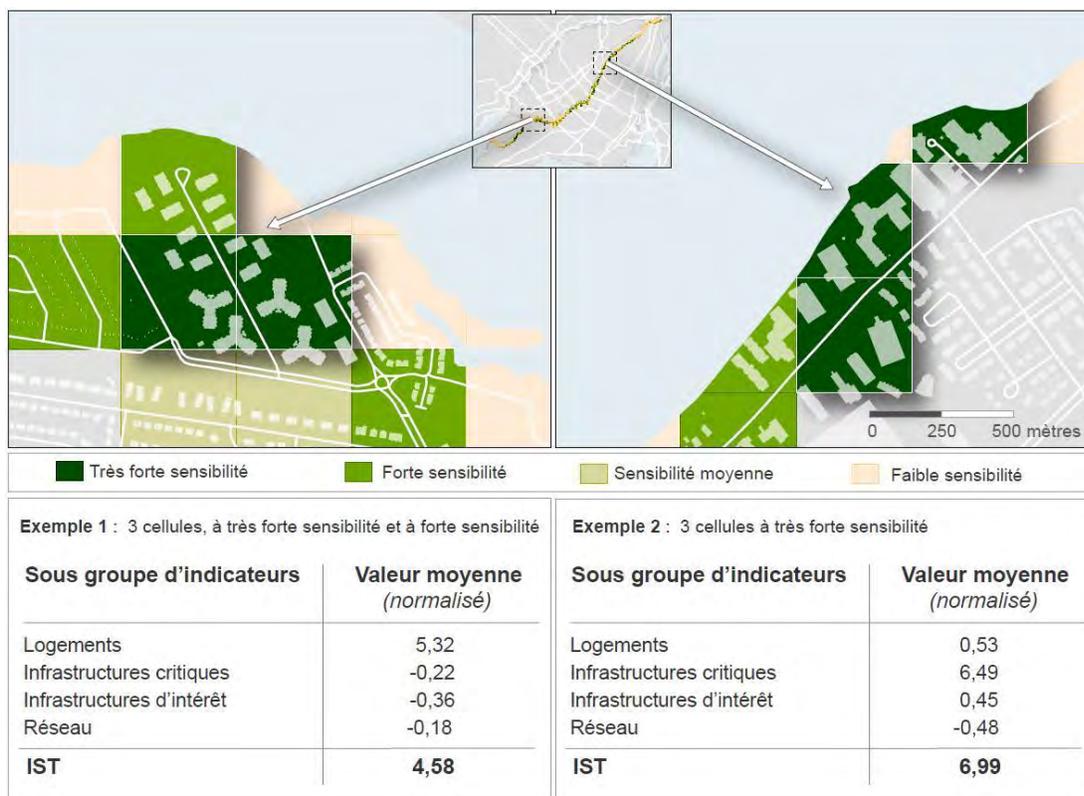
Dans notre cas d'étude, l'occupation du sol est principalement résidentielle, alors, la concentration de logements (sous-groupe logements) a une forte influence dans la détermination de la sensibilité territoriale. Ainsi, cinq cellules sur les 26 cellules jugées à *très forte sensibilité* s'expliquent par la présence d'une forte densité de logements privés et elles sont, dans la plupart des cas, composées des logements construits après 2004. Cette observation est intéressante puisque le développement résidentiel qui continue sa progression sur la rive de la rivière des Prairies a sans aucun doute un impact réel dans l'accroissement de la sensibilité des communautés par l'augmentation de l'exposition. La forte densité résidentielle explique également les 27% des cellules jugées *très sensibles* (23 sur 85 cellules).

En ce qui concerne le sous-groupe d'indicateurs de «réseaux», les cellules qui se trouvent à proximité des points d'accès au pont semblent gagner de la sensibilité par la présence de rues et échangeurs qui convergent vers les ponts. Cet indicateur est de grande importance puisque dans l'éventualité d'une inondation, le blocage d'un point d'accès aux ponts peut avoir des conséquences néfastes sur la circulation routière. Montréal étant une île, la circulation massive des personnes vers et à partir de l'île durant les heures de pointe, entraîne des embouteillages quotidiens dans les grandes routes et les ponts. Si à cette situation actuelle on ajoute la fermeture d'un ou de plusieurs ponts à cause d'une inondation, la circulation ne serait qu'entravée davantage, entraînant des conséquences économiques à la métropole. Pour ce qui est du réseau routier ailleurs que dans les points d'accès aux ponts, la présence des rues ne semble pas avoir une forte influence sur l'IST puisque la densité routière demeure très stable à travers le territoire.

Finalement, les sous-groupes d'indicateurs «*infrastructures critiques*» et «*infrastructures d'intérêt*» ont également une influence importante dans l'IST. À titre d'exemple, parmi les 26 cellules jugées à *très forte sensibilité*, 11 contiennent entre une et deux infrastructures critiques et 18 cellules contiennent entre une et huit infrastructures d'intérêt.

Afin de mieux comprendre les résultats de l'IST, la figure 30 montre deux exemples de cellules à très forte sensibilité et les éléments tenus en compte pour le calcul de l'indicateur.

Figure 30 : Exemples des résultats de l'indice de la sensibilité territoriale (IST)



Réalisée par : Pamela Soto Abasolo, 2012

Le premier exemple de secteurs de concentration de la sensibilité territoriale se situe à l'ouest de la rive de la rivière des Prairies, dans l'arrondissement Pierrefonds-Roxboro. Dans le secteur on trouve principalement des logements résidentiels privés (646 logements) dont la plupart ont été construits après 2004 (443 logements) (figure 31). Cette prépondérance des logements se reflète dans les résultats de l'IST. En effet, parmi les sous-groupes d'indicateurs, celui qui représente les logements a obtenu la valeur la plus forte ayant ainsi la plus grande influence sur la valeur totale de l'IST (4,58).

Le deuxième exemple présenté par la figure 30 correspond à un secteur situé à l'est de Montréal, à la limite entre les arrondissements Montréal-Nord et Rivière-des-Prairies-Pointe-aux-Trembles. Dans ce secteur il y a une concentration importante de résidences pour personnes âgées (figure 32). En effet, on trouve 6 résidences pour personnes âgées à l'intérieur des trois cellules comptabilisées dans cet exemple. Il est à noter que chaque résidence comporte une multitude de logements puisque les bâtiments qui les abritent sont des immeubles à étages et de très forte densité. Cette situation se reflète bien dans le calcul de l'IST, où le sous-groupe d'indicateurs d'infrastructures critiques est responsable presque entièrement du résultat total de l'IST (6,99 pour ce secteur).

Figure 31 : Édifices à résidences pour personnes âgées à l'est de Montréal.



Source : Google Street View.

Figure 32 : Logements privés à forte densité à l'arrondissement Pierrefonds-Roxboro.



Source : Google Street View.

Conclusion

En conclusion, l'IST est une méthode simple qui permet d'observer la distribution et la concentration des infrastructures du territoire susceptibles d'être directement affectées par une éventuelle inondation.

Nous avons démontré que la méthodologie de l'IST offre de résultats intéressants pour cibler certaines infrastructures qui jouent des rôles très importants dans les communautés. Il s'agit notamment des hôpitaux et des écoles, ou d'autres infrastructures comme les résidences pour personnes âgées, dont les habitants sont particulièrement sensibles. Ces infrastructures et lieux méritent d'être répertoriés dans l'espace afin de cibler l'observation et la planification des risques de la part des gestionnaires.

Au-delà des étapes de la méthodologie de l'IST présentée dans ce rapport, le simple répertoire des infrastructures d'intérêt sur le territoire d'une municipalité et la cartographie de celles-ci offre un aperçu intéressant aux municipalités du degré d'exposition de leurs infrastructures aux inondations. Aussi, l'étape de déterminer quel type d'infrastructure devrait être considérée comme ayant un impact sur la sensibilité des communautés, est accompagnée d'une riche discussion et une réflexion poussée à propos de l'importance et le rôle critique de certaines activités sur le territoire. Enfin, par la discussion entre intervenants et gestionnaires et par l'observation de la distribution des infrastructures, cet exercice ne peut qu'accroître la compréhension des municipalités sur les dynamiques du secteur bâti, les aidant ainsi à mieux s'adapter aux risques d'inondations.

4.3.2. Capacité d'adaptation

L'analyse de la capacité d'adaptation est le troisième pilier de notre méthode d'analyse sociétale et territoriale, et elle constitue en cela un incontournable qui conduit à l'analyse de la vulnérabilité. Elle vient tempérer les résultats des deux analyses précédentes, et doit donc comprendre à la fois des éléments sociodémographiques et des éléments territoriaux. Elle doit de plus refléter le contexte politique et institutionnel, qui joue un rôle déterminant pour l'adaptation. Elle est représentée au moyen d'un indice composite, nommé IAdapt. Par souci de cohésion entre les méthodes, nous avons préconisé l'approche méthodologique développée par Cutter dans l'article *Disaster Resilience Indicators for Benchmarking Baseline Conditions* (2010), qui suit l'esprit des indices ISS et IST.

Cette étude de Cutter, porte comme son nom l'indique, sur l'évaluation des conditions de base de la résilience d'une communauté. Sa définition de la résilience, inspirée de Norris (2008) fait de ce concept "le processus liant les diverses composantes de la capacité d'adaptation (telles que le capital social et

le développement économique) aux réponses et aux changements suivant un événement négatif [Cutter, 2010, p. 2]. C'est dire que la méthodologie qu'elle propose repose sur une évaluation de la capacité d'adaptation, qui reprend par ailleurs six catégories de déterminants de la capacité d'adaptation assez proches de celles de Smit et Pilifsova (2001). La nuance entre les termes (résilience/capacité d'adaptation) est surtout que la capacité d'adaptation peut a priori exister sans la catastrophe (dans le « tissu social et économique » de Sherrieb), alors que la résilience sous-entend une réponse à celle-ci. Néanmoins, la méthode que propose Cutter pour évaluer la résilience doit pouvoir s'appliquer partout et en tout temps, et se penche donc sur les conditions de base (préexistantes) de la résilience, c'est-à-dire la capacité d'adaptation.

4.3.2.1. Indicateurs de la capacité d'adaptation

Tout comme pour les analyses de sensibilité décrites plus haut, une liste de variables a été compilée afin de créer l'indice de capacité d'adaptation. La liste proposée et testée par l'auteure se compose des variables sélectionnées au moyen d'une analyse en composantes principales permettant de rejeter les éléments déjà expliqués statistiquement. Les variables qu'elle recense sont au nombre de 36, et se regroupent en cinq sous-catégories :

1. Résilience sociale,
2. Résilience économique,
3. Résilience institutionnelle,
4. Résilience des infrastructures et
5. Capital communautaire.

Il convient de noter que certaines variables se rapprochent de celles utilisées dans l'indice de sensibilité sociale, mais considèrent l'impact des données dans la perspective inverse, soit de manière à ce qu'elles aient un effet positif sur la capacité d'adaptation. Par exemple, alors que l'ISS considérait le taux de chômage et le manque de connaissance des langues officielles, l'Adapt prend en compte le taux d'emploi et la connaissance des langues. La liste complète des variables pouvant servir à mesurer la capacité d'adaptation figure au tableau 25. Par ailleurs, notre équipe de recherche a proposé quelques variables supplémentaires, et a éliminé parmi la liste originale des variables qui ne correspondent pas à la situation particulière de notre zone d'étude. Ainsi, les variables portant sur la couverture de la population par un plan d'assurance-santé ou un plan d'assurance contre les dommages dus aux inondations ont ici aussi été éliminées. Du côté du capital communautaire, Cutter, qui travaillait sur le sud-est des États-Unis, propose comme indicateur de la bonne cohésion d'une population la quantité de croyants (religious adherents). Notre équipe a choisi de ne pas retenir cette variable, car la pratique religieuse est beaucoup plus faible, et ce partout au Canada; en 2000, 71% des Canadiens déclaraient n'assister à un office religieux qu'une fois l'an ou jamais, un chiffre en augmentation constante depuis des décennies [CDPDJ, 2008]. De plus, le modèle d'organisation sociale avec l'église comme pôle central n'est pas non plus ancré dans les mœurs comme il peut l'être dans le sud du continent américain. Parallèlement, l'effet ambivalent de la présence de routes importantes (utiles comme voies d'évacuation et d'acheminement, mais augmentant la vulnérabilité si elles sont coupées par l'inondation) nous a poussé à mettre de côté cette variable.

D'autres variables ont du être écartées en raison de l'absence de données assez précises (c.-à-d. à l'échelle de l'aire de diffusion de Statistique Canada) pour réaliser le type d'analyse voulu, ou encore par la désuétude du moyen de calcul proposé. Par exemple, les capacités de communication, évaluées par Cutter en fonction du pourcentage de la population ayant une ligne téléphonique ne peuvent plus selon nous bien refléter la réalité à une époque où les communications se font de plus en plus de façon numérique et cellulaire, et que les données statistiques ne sont pas disponibles à cette échelle, ni ne seraient utiles pour en rendre compte. Un dernier exemple est celui de la dépendance de l'économie envers le secteur primaire, un facteur qui a certainement son importance sur la capacité d'adaptation,

mais qui ne s'applique pas à notre zone d'étude urbaine composée très majoritairement de secteurs résidentiels et institutionnels.

D'autres facteurs ont été jugés importants mais n'ont pas été inclus dans la portion d'analyse statistique car ils n'y auraient pas eu d'effet mesurable en raison de l'échelle réduite du territoire d'analyse. Par exemple, certaines variables de la composante institutions, comme le niveau de fragmentation politique, le contexte légal de la protection contre les inondations et la présence d'un organisme de bassin versant s'appliquent tous également à l'ensemble des aires de diffusion, et leur inclusion dans l'indice n'aurait pas permis à ce dernier d'apporter de l'information supplémentaire. Ces aspects demeurent néanmoins pertinents et seront traités dans la discussion, à la rubrique de l'analyse qualitative. Dans le cadre d'une étude sur un territoire plus étendu ou relevant de plus d'une juridiction, il faudrait aussi s'assurer d'inclure ces aspects puissent également être intégrés au volet d'analyse statistique.

Tableau 25 : Variables pouvant servir à mesurer la capacité d'adaptation d'une communauté

Thème	Variable	Indicateur	Source	Justification
Société	Équité de l'éducation	Rapport du % de la pop. avec un diplôme postsecondaire au % de la pop. sans aucun diplôme	Norris et al., 2008; Morrow, 2008	Concentration de la population éduquée, indicateur de disparité sociale
	Age	% de la population < 65 ans	Morrow, 2008	Meilleures perspectives d'adaptation, plus de facilité à adopter des changements
	Accès au transport	% de la population possédant un véhicule	Tierney, 2009	Accès à un moyen de transport personnel et flexible
	Capacité de communication	% de la population possédant une connexion téléphonique	Colten et al. 2008	Possibilité de recevoir/transmettre de l'information
	Compétences linguistique	% de la population pouvant s'exprimer dans au moins une des langues officielles	Morrow, 2008	Capacité essentielle à la compréhension des informations sur l'adaptation aux risques
	Besoins spéciaux	% de la population sans handicap sensoriel, moteur ou intellectuel	Heinz Center, 2002	Une forte concentration (ex. un centre de soin longue durée) implique l'attribution de plus de ressources pour l'adaptation
	Santé psychologique	Nombre de psychologues par 10 000 hab,	Inspiré de Norris et al., 2008	Aspect important et souvent négligé pour renforcer la stabilité et la résilience
Thème	Variable	Indicateur	Source	Justification
Revenu et activité économique	Capital immobilier	% de propriétaires occupants	Norris et al., 2008, Cutter et al., 2008	Capacité de générer du capital (par une hypothèque, par exemple) afin d'entreprendre des mesures d'adaptation
	Emploi	% de la pop ayant un revenu d'emploi	Tierney et al. 2001	Part de la population pouvant compter sur un revenu stable
	Revenu et inégalité	Coefficient de GINI	Norris et al., 2008	Mesure de la disparité des revenus de la population
	Diversité économique	% de la pop. non employé dans les industries d'extraction, les pêcheries, la foresterie ou l'agriculture	Berke et Campanella, 2006; Adger, 2000	Industries par définition plus exposées aux conséquences des aléas
	Participation économique des femmes	% de femmes employées dans la pop. active	NRC, 2006	Inclusion sociale, apport de revenus plus élevés, et capital social par le réseautage

	Taille des entreprises	Rapport grandes entreprises/petites entreprises	Norris et al., 2008	Concentration de l'emploi et de l'économie
	Endettement des ménages	Taux d'endettement des ménages	Équipe de recherche de	Capacité des ménages à essayer des pertes monétaires/emprunter pour le rétablissement
Thème	Variable	Indicateur	Source	Justification
Institutions	Mitigation	Présence/absence d'un règlement de concordance avec la PPRLPI, version 2006	Équipe de recherche	Autorités proactives, respectant les délais d'adoption
	Mitigation	% de la pop. couverte par un plan de réduction des risques récent	Burby et al., 2000; Godschalk, 2007	Autorités sensibilisées à la question des risques
	Mitigation	Présence/absence d'un programme citoyen de préparation et réponse en cas de sinistre	Godschalk, 2003	Intérêt dans la communauté de prendre des initiatives de préparation et d'adaptation
	Mitigation	Présence/absence plan de mesures d'urgence	Équipe de recherche	Autorités sensibilisées à la question des risques
	Mitigation	% de la pop. participant à un programme communautaire d'évaluation du risque inondation	Godschalk, 2003	Intérêt dans la communauté de prendre des initiatives de préparation et d'adaptation
	Mitigation	Présence/absence d'un organisme de bassin versant	Inspiré de Godschalk, 2003	Initiative multipartite visant la transparence et la coopération dans la gestion des eaux
	Fragmentation politique	Nombre de niveaux d'administration et de décision	Norris et al., 2008	Degré de complexité de l'administration
	Rétablissement	Présence/absence d'un programme de rétablissement après sinistre	Équipe de recherche	En l'absence d'assurance privée contre les inondations, un moyen d'obtenir un dédomagement
	Adaptation/immunisation	Présence/absence d'un programme d'adaptation ou d'immunisation des propriétés	Équipe de recherche	Intérêt dans la communauté de prendre des initiatives de préparation et d'adaptation
	Expérience d'inondation dans le passé	Événements d'inondation dans les 50 dernières années	Cutter et al., 2008	Connaissance des principaux risques
Thème	Variable	Indicateur	Source	Justification
Milieu physique et infrastructures	Type d'habitation	% des habitations qui ne sont pas des maisons mobiles	Cutter et al., 2003	Car sans fondations, elles sont facilement endommagées
	Potentiel pour l'accès/l'évacuation	Km de routes artérielles par km ²	NRC, 2006	Accès à la zone, mais aussi plus de flexibilité pour l'adoption de mesures structurelles d'adaptation

	Offre d'hébergement d'urgence	Présence/absence d'établissements hôteliers dans la zone d'étude hors ZI	Tierney, 2009	Élément essentiel d'un plan de préparation aux sinistres
	Tenure des zones potentiellement inondables	Taux de parcs/espaces verts sur la superficie potentiellement inondable	Équipe de recherche	Les parties publiques peuvent plus facilement faire l'objet d'aménagement pour en faire des zones tampons ou de rétention des crues.
	État de la zone inondable	% de la rive bétonnée	Équipe de recherche	L'artificialisation des berges est reconnu comme étant dommageable pour les milieux aquatiques, et peut amplifier les effets en aval d'une inondation
Thème	Variable	Indicateur	Source	Justification
Capital communautaire	Attachement à la localité	Migration internationale nette	Morrow, 2008	Part de la population nouvellement arrivée, moins de liens avec les réseaux locaux, moins de connaissance des risques
	Attachement à la localité	% de la pop. née dans la région et y résidant toujours	Vale & Campanella, 2005	Esprit communautaire; Connaissance et diffusion d'information plus fine sur les risques naturels
	Participation politique	% de participation à la dernière élection générale	Morrow, 2008	Mesure de l'intégration à la vie politique
	Implication communautaire	Nombre d'organisations communautaires par 10000 hab.	Murphy, 2007	Mesure de la participation citoyenne

Réalisé par : Guillaume D.-Dutil, Nathalie Bleau, Isabelle Thomas et Pamela Soto Abasolo, 2012 – Adapté de Cutter, 2010

Tableau 26 : Variables entrant dans la composition de l'indice de la capacité d'adaptation

Indicateur
Pourcentage de la population détenant un diplôme, certificat ou grade
Pourcentage de la population connaissant au moins une des deux langues officielles
Taux d'emploi total de la population active
Taux d'emploi des femmes dans la population active
Inverse du coefficient de Gini
Pourcentage de logements occupés par le propriétaire
Pourcentage de la population n'ayant pas déménagé dans les derniers 5 ans
Pourcentage de la superficie de l'aire de diffusion vacante (terrains vacants)

Réalisée par : Guillaume D.-Dutil, 2012

Tableau 27 : Variables évaluées dans l'analyse qualitative de la capacité d'adaptation

Indicateur
Nombre de paliers de gouvernement
Concordance des règlements locaux relatifs aux zones inondables avec les lois et règlements supérieurs
Réglementation sur l'immunisation contre les inondations
Expérience d'inondations dans le passé
Présence/absence d'un organisme de bassin versant
État d'artificialisation de la zone inondable
Présence/absence d'organismes faisant de la sensibilisation sur les milieux riverains
Diffusion par les autorités d'information à propos de la préparation aux inondations

Réalisé par : Guillaume D.-Dutil, 2012

4.3.2.2. Méthodes de la capacité d'adaptation

Analyse statistique

Les données incluses dans l'indice IAdapt proviennent du recensement canadien de 2006, dont les résultats sont diffusés par Statistiques Canada, ainsi que de la Ville de Montréal pour ce qui est du rôle d'évaluation foncière. Elles ont été traitées et calculées avec *MS Excel 2010*, puis normalisées à l'aide du logiciel *SPSS 19*.

Les variables sélectionnées pour l'analyse, exprimées en pourcentages et en rapports sont ensuite normalisées, comme dans les indices décrits précédemment, selon la méthode des valeurs centrées-réduites (Zscore)

Les valeurs normalisées sont par la suite additionnées, comme le décrit la formule 4. Le tableau 26 présente les variables incluses dans le calcul de l'IAdapt. Chacune des variables qui composent l'indice a une valeur positive sur celui-ci, et un indice IAdapt plus élevé dénote donc une plus grande capacité d'adaptation.

$$\text{IAdapt} = \sum (\text{indicateurs})$$

Formule 4

Deux des indicateurs retenus n'étant pas exprimés en valeur réelle ou en pourcentage, ils ont donc dû faire l'objet de calculs préalables. Il s'agit du coefficient de Gini, un indicateur très répandu de l'inégalité de la richesse, et de la superficie de terrains vacants par aire de diffusion. Le coefficient de Gini a été calculé d'après la formule 5, en utilisant comme tranches de revenu les 11 catégories de revenu par ménage fournies par Statistiques Canada, allant de moins de 10000\$ à plus de 100000\$/an/ménage, par intervalle de 10000\$. X_i représente ici la fréquence cumulée de la classe i dans la population, et Y_i , le pourcentage du total des revenus revenant à cette classe.

$$G = 1 - \sum_{i=1}^J (X_i - X_{i-1})(Y_{i-1} + Y_i)$$

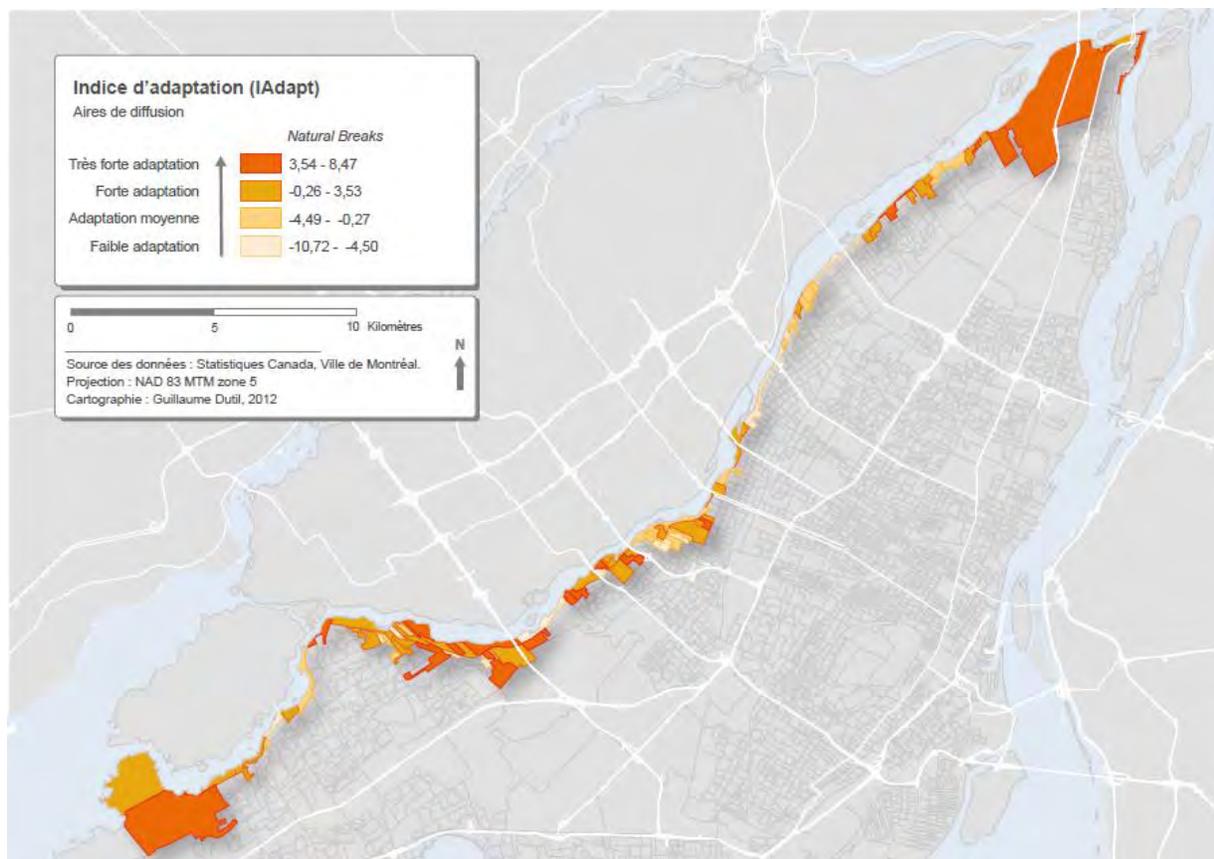
Formule 5

Le coefficient de Gini est exprimé par une valeur entre 0 et 1, où les valeurs les plus près de 0 dénotent des inégalités de revenu plus faibles. Afin de l'inclure à notre indice dont toutes les valeurs ont un effet positif en augmentant, il a donc été nécessaire de prendre en compte dans les calculs l'inverse (1-G) du coefficient de Gini, plutôt que sa forme classique.

Pour ce qui est du pourcentage de la superficie occupée par des terrains vacants, il a été calculé dans ArcGIS en sélectionnant les terrains, classés vacants au rôle foncier 2010 de la Ville de Montréal, qui sont entièrement contenus dans une aire de diffusion. Leur superficie est obtenue par l'outil *calculate geometry*, puis est rapportée au total de la superficie de l'aire de diffusion.

La figure 33 représente l'indice de la capacité d'adaptation IAdapt pour chaque aire de diffusion de la zone d'étude, selon un classement à quatre niveaux obtenu par la méthode des seuils naturels avec l'optimisation de Jenks, calculé à l'aide du logiciel ArcGIS.

Figure 33 : Résultats de l'indice de la capacité d'adaptation



Analyse qualitative

Comme nous l'avons évoqué plus haut, et en accord avec les recherches les plus pertinentes sur le sujet, ce portrait statistique doit être complété par l'examen attentif du volet institutionnel [Keskitalo, 2010, p. 588; Sherrieb, 2010]. Ce volet a été moins exploré par l'approche statistique de Cutter (2010). À cette fin, nous avons donc mené une analyse des lois et règlements en vigueur, de même que du contexte politique entourant les questions d'inondation, de sécurité civile et de protection des berges, et dressé un portrait du comportement des différents acteurs (citoyens, gouvernements, municipalités, médias et organisations) durant des épisodes récents d'inondation (tableau 27). Plusieurs entrevues ont été menées auprès de responsables de l'aménagement des arrondissements de la zone d'étude et de la Ville, permettant de peindre un tableau nuancé de la culture du risque en présence, des motivations renforçant ou nuisant à la capacité d'adaptation, ainsi que de l'application concrète des règles en vigueur. Cette portion de l'étude a été réalisée à l'échelle la plus fine disponible, soit celle de l'arrondissement, car les éléments réglementaires s'appliquent de façon égale à toute une juridiction.

Discussion des résultats de l'IAadapt.

La figure 33 permet d'observer la répartition territoriale de l'indice de capacité d'adaptation dans la zone d'étude, selon une discrétisation à quatre classes, avec une étendue comprise entre -10,72 à 8,47. Le tableau 28 résume la répartition des aires de diffusion selon chacun des quatre intervalles.

Tableau 28 : Nombre et pourcentage des AD à l'intérieur des intervalles de l'indice IAadapt

Intervalle de l'IAadapt	IAadapt (intervalles – Natural breaks)	Nombre d'aires de diffusion	Pourcentage des aires de diffusion
Faible adaptation	-10,72 - -4,50	18	19%
Adaptation moyenne	-4,49 - -0,27	22	23%
Forte adaptation	-0,26 - 3,53	35	37%
Très forte adaptation	3,54 - 8,47	19	20%
	Total	94	100%

Réalisé par : Guillaume D.-Dutil, 2012

On remarque une certaine concentration d'aires de diffusion dont la capacité d'adaptation est plus faible vers le centre de l'île, soit dans les arrondissements d'Ahuntsic-Cartierville et Montréal-Nord. En effet, on retrouve dans ces deux derniers 14 des 20 aires de diffusion dont le niveau d'adaptation apparaît comme faible. Cela est en accord avec la concentration de forte sensibilité constatée dans ce même secteur. Pour les valeurs statistiques, quantifiables, la sensibilité de cette zone sera donc peu tempérée par la capacité d'adaptation. À l'inverse, les aires de diffusion à la capacité d'adaptation très forte sont pour leur part réunies pour moitié (7/19) dans les arrondissements de Pierrefonds-Roxboro et d'Ahuntsic-Cartierville (10/19). On y retrouve généralement plus de maisons unifamiliales, des quartiers comme ceux illustrés par les figures 34 et 35 (et donc en toute logique une plus grande part de propriétaires occupants) de même qu'un plus grand pourcentage de détenteurs de diplôme et un taux d'emploi plus élevé qu'ailleurs. Cependant, à tous les niveaux, d'importantes variations existent à l'intérieur même des arrondissements, ou à quelques kilomètres de distance comme on peut l'observer en comparant les figure 36 et 37, qui expriment les différences entre les modes d'habiter qui coexistent

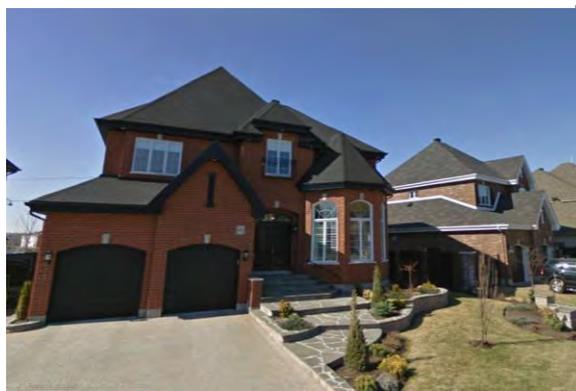
dans notre zone d'étude. À la figure 36, un quartier de l'arrondissement Sainte-Geneviève-Île-Bizard présente quelques anciens chalets reconvertis en résidences principales, voisinant de petits immeubles à appartements. L'aire de diffusion illustrée par cette photo a obtenu un des moins bons scores lAdapt. Pour sa part, la figure 37 montre un quartier de bungalows des années 1970-1980, qui a obtenu le 3^e meilleur score d'lAdapt.

Figure 34 : Maisons unifamiliales, 94^e avenue, Pointe-aux-Trembles.



Source : Google Street View.

Figure 35 : Nouveau développement de maisons unifamiliales près de l'Anse-à-l'Orme, Sainte-Geneviève.



Source : Google Street View.

Figure 36 : Immeuble à appartements et ancien chalet, Sainte-Geneviève.



Source : Google Street View.

Figure 37 : Bungalows des années '70-80, Pierrefonds



Source : Google Street View.

En se penchant sur les données statistiques qui composent l'Adapt (tableau 29), il est possible de souligner d'autres constats. Tout d'abord, bien qu'il utilise des variables distinctes, l'indice lAdapt fait parfois ressortir certaines caractéristiques déjà soulignées par les autres méthodes d'analyse. Par exemple, l'aire de diffusion présentant l'Adapt le plus faible est située juste en retrait de la rive, en face du barrage d'Hydro-Québec. Cette aire de diffusion déjà remarquée dans le volet de la sensibilité, ainsi que ses voisines, ont pour traits distinctifs des taux d'emploi particulièrement bas, de même que le faible pourcentage de propriétaires occupants, ce qui est tout à fait conséquent avec le fait que le secteur accueille plusieurs résidences pour personnes âgées. À l'autre extrémité du spectre, on retrouve l'aire de diffusion comprenant en partie les parcs-natures de l'Anse-à-l'Orme et du cap Saint-Jacques, à Pierrefonds (voir figure 35). Celle-ci présente des valeurs élevées pour presque toutes les variables évaluées, mis à part celle de la mobilité. En effet, cette zone a connu une vague importante

de développement immobilier, ce qui explique que 56% des résidents ont aménagé dans les 5 années précédentes. Enfin, plus de la moitié de cette aire de diffusion est composée de terrains vacants.

Somme toute, près de 57% des aires de diffusion –comprenant 66,5% de la population de la zone d'étude– a été classés sous *bonne* ou *très bonne* adaptation.

La variable indiquant la connaissance des langues officielles donne des résultats relativement élevés sur l'ensemble de la zone d'étude, avec une moyenne de 97,9% de personnes connaissant au moins une des deux langues. Malgré ce résultat, certains secteurs présentent des concentrations élevées de personnes ne comprenant ni ne parlant aucune des deux langues officielles. Si globalement il ne devrait pas y avoir de problème majeur de communication entre la population et les autorités, que ce soit pour diffuser de l'information sur le risque, ou pour débattre par exemple de mesures d'adaptation les plus appropriées à adopter, dans ces secteurs, une attention particulière devrait être portée et des interventions spécifiques devraient être envisagées.

On peut aussi observer une population qui se déplace relativement beaucoup. Dans 14 aires de diffusion, plus de la moitié des habitants ont déménagé dans les cinq années précédentes. Outre les secteurs en développement comme celui déjà cité, ce phénomène pourrait être dû en partie à la présence marquée, sur presque toute la zone d'étude, de résidences pour personnes âgées, qui ont par nature un taux de renouvellement élevé de leurs résidents.

Enfin, le faible pourcentage de terrains vacants sur la superficie totale de l'aire de diffusion permet de constater le pouvoir d'attraction des secteurs près de la rivière. Dans 37 aires de diffusion, moins de 2% de la superficie est encore vacante. Entre le cadre bâti déjà dense, les grandes emprises institutionnelles (hôpitaux, écoles, prison) et les nombreux espaces verts, il reste donc très peu d'espace qui pourrait être réservé à des mesures d'adaptation visant à adapter le milieu à l'intensification possible des crues.

Tableau 29 : Sommaire des résultats de la capacité d'adaptation

		Intervalle	Minimum (%)	Maximum (%)	Somme	Moyenne (%)	Écart-type
Société	Éducation (% de la population détenant un diplôme, certificat ou grade)	37,61	64,52	102,13	8238,77	88,59	7,40
	Compétences linguistiques (% de la population parlant anglais ou français ou les deux)	9,24	91,00	100,24	9111,44	97,97	2,02
Économie	Capital immobilier (% de propriétaires occupants)	99,77	0,23	100,00	5474,46	58,87	26,45
	Revenu et inégalité (coefficient de GINI inversé)	0,32	0,09	0,41	28,10	0,30	0,06
	Emploi (taux d'emploi dans la population)	75,40	5,00	80,40	5269,92	56,67	13,95
	Emploi (taux d'emploi des femmes)	71,40	2,60	74,00	4838,33	52,03	14,74
Infrastructures	Espace disponible (% de terrains vacants sur la superficie de l'aire de diffusion)	50,68	0,00	50,68	634,56	6,75	9,38
Capital communautaire	Attachement au lieu (% de la population n'ayant pas déménagé dans les 5 ans précédents)	53,57	7,69	61,26	3444,30	36,64	12,57

Réalisé par : Guillaume D.-Dutil, 2012

Discussion des résultats de l'analyse qualitative

Le portrait de la capacité d'adaptation d'une population ne peut cependant se résumer à la somme d'indicateurs statistiques, si complets et instructifs soient-ils. Grâce à une série de critères et d'observations recueillies par la recherche et des entrevues avec des responsables de l'aménagement de tous les arrondissements concernés par les risques de crues de la rivière des Prairies, nous souhaitons dans cette section raffiner la compréhension de la situation concrète de la capacité d'adaptation.

Connaissance du risque, gouvernance et réglementation

Tout d'abord, d'un point de vue institutionnel, les riverains de la rivière des Prairies sont soumis aux décisions de cinq paliers de gouvernement : fédéral, provincial, supramunicipal (CMM), municipal et arrondissement. Il se trouve d'ailleurs que tous ces acteurs sont impliqués à un niveau ou un autre dans la gestion des eaux, la définition du risque et la mise en œuvre des divers programmes, lois, politiques et règlements touchant aux inondations ou à la sécurité publique. Cette situation est rare au Québec, car seules les deux communautés métropolitaines de Montréal et de Québec possèdent un tel niveau intermédiaire. Il est aussi notoire que les arrondissements montréalais disposent d'un large pouvoir, presque équivalent à celui d'une municipalité. Ils sont entre autres responsables du règlement de zonage, par lequel s'applique les restrictions aux constructions et travaux en zone inondable.

La volonté de connaître les zones à risque d'inondation et d'y restreindre les activités est venue, à l'origine, du gouvernement fédéral, suite au constat au milieu des années 1970 qu'il était coûteux de dédommager les victimes [Lalande c. P.G. Québec, 1991]. Un programme conjoint a été mis sur pied avec le gouvernement du Québec, et le financement a perduré jusqu'à la fin des années 1990. Québec, par l'entremise du CEHQ a ensuite transféré la responsabilité de la cartographie des zones inondables aux paliers inférieurs, et se consacre désormais seulement aux relevés.

Le niveau supramunicipal est donc devenu responsable de l'identification des zones de contraintes majeures qui chevauchent au moins deux MRC. Dans le cas présent, une campagne de révision des cotes de crues de la rivière des Prairies en 2003-2004 devait s'accompagner de la production par la CMM de documents cartographiques à l'avenant. Le désaccord d'une des municipalités touchées à propos des limites de la zone inondable fait retarder le processus de plusieurs années. Au moment de finaliser cette recherche, les cartes des zones inondables révisées d'après les relevés de 2004 n'ont toujours pas été publiées, bien que ces mêmes relevés soient considérés comme la référence valide dans les règlements municipaux de Montréal et des arrondissements. En attendant, les seules cartes officielles de la zone inondable qui soient disponibles sont celles issues des relevés de la fin des années 1970, et la responsabilité de la cartographie, et donc de la connaissance du risque, a été transférée vers les échelons administratifs inférieurs, ce qui peut laisser présager certaines conséquences. D'une part, les administrations municipales ont rarement les ressources humaines à l'interne à consacrer à un projet cartographique de cette ampleur, ni les ressources financières pour les commander à des firmes spécialisées. Par ailleurs, les municipalités ont un intérêt foncier direct à développer les terrains sur leur territoire, et les terrains en rive sont toujours recherchés et les villes subissent des pressions en ce sens de la part des propriétaires et promoteurs. Rappelons que les gouvernements fédéral et provincial avaient, eux, un intérêt financier à contrôler les établissements exposés au risque et donc les paiements de dédommagement.

Un autre effet de cette complexité administrative se traduit aussi en délais supplémentaires lorsqu'il est nécessaire de modifier une réglementation. Par exemple, Québec a adopté en 2006 une nouvelle version de sa Politique de protection des rives, du littoral et des zones inondables. Adoptée par Montréal en 2009, ce n'est qu'à la fin 2011 que les derniers arrondissements montréalais ont finalement modifié leur règlements en concordance.

Les arrondissements ont, de plus, le pouvoir d'adopter des normes de construction plus contraignantes que celles que la municipalité préconise. Tous les arrondissements proposent les normes minimales d'immunisation pour les bâtiments situés en zone 0-100 ans. Pierrefonds-Roxboro, ancienne municipalité et fréquemment aux prises avec des sites de débordement en période de crue, va même plus loin en donnant plus de détails sur les matériaux et les normes.

Au-delà de la complexité du partage de pouvoir et des délais, l'approche légale et réglementaire, au demeurant bien conçue et complète, se heurte souvent à la volonté politique et aux impératifs fonciers et de développement. C'est ainsi que dans les faits, il existe plusieurs manières courantes, et souvent légales, de contourner les contraintes à la construction. La volonté politique de faire appliquer la loi dans son sens strict est ainsi une limite reconnue depuis de nombreuses années, tant par les experts [Robert, 2003] que par les intervenants rencontrés.

Expérience d'inondations dans le passé

Comme il a été souligné plus haut, il n'existe pas encore à Montréal de base de données centralisée consignait systématiquement les épisodes d'inondation. À l'échelle des arrondissements, cependant, ceux qui doivent faire face chaque année à des débordements plus ou moins importants effectuent en général un suivi qu'ils consignent. Les arrondissements de Pierrefonds-Roxboro, Ahuntsic-Cartierville et Rivière-des-Prairies-Pointe-aux-Trembles sont assez rigoureux dans le suivi des crues. Les services publics de Pierrefonds, par exemple tiennent un registre avec les observations du niveau de l'eau à plusieurs endroits, accompagné de commentaires. Les registres que nous avons pu consulter se limitent à la gestion des services d'urgence. Malgré les informations très précises qu'ils contiennent, ils ne sont jusqu'à ce jour ni standardisés, ni conçus pour participer à la diffusion des connaissances sur les inondations.

Artificialisation de la zone inondable

La rive montréalaise de la rivière des Prairies est artificialisée à des degrés divers le long de notre zone d'étude. Si la construction d'un muret de pierre ou de béton était vue autrefois comme un bon moyen de rehausser un terrain et de le protéger contre les inondations futures, ce type d'intervention intrusive est désormais interdit depuis plus d'une trentaine d'années. En plus de pouvoir accélérer le débit, d'augmenter l'érosion et les débordements en aval, l'artificialisation des rives limite la variété de mesures d'adaptation possibles. De plus, les murs de soutènement doivent être correctement entretenus afin de bien remplir leur office, ce qui n'est pas toujours le cas.

À Montréal-Nord, selon les services d'urbanisme, la majeure partie de la rive est constituée par un mur de béton. De larges portions le sont aussi dans les autres arrondissements à l'étude. Mentionnons ici que les responsables de l'urbanisme de l'arrondissement Île-Bizard-Sainte-Geneviève (hors de notre zone d'étude) sont les seuls à notre connaissance à tenir un répertoire de l'état des rives, qui leur permet de suivre dans le temps les interventions et de compiler la proportion des terrains laissés à l'état naturel, légèrement aménagés, fortement aménagés ou bétonnés

Sensibilisation et information à propos des inondations

Outre le potentiel d'adaptation –qui peut être compilé statistiquement– le geste de mettre en place ou non des mesures d'adaptation dépend beaucoup de la perception des citoyens face aux risques. Pourtant ceux-ci n'ont pas accès à tout le savoir scientifique pour juger de la pertinence de privilégier une approche plutôt qu'une autre. De même, comme nous l'avons vu auparavant, les élus comme les experts n'ont pas accès à toute l'information qui serait nécessaire pour évaluer à moyen et long terme les stratégies à mettre en œuvre. Dans l'état actuel des choses, les responsables de la sécurité civile diffusent à propos des risques d'inondation de l'information centrée sur les mesures d'urgence, par exemple des dépliants ou des avis dans les hebdomadaires locaux. La réflexion autour de mesures

axées sur le long terme pourra éclore dans le futur grâce à la mise en place d'ateliers, d'espaces de discussion et d'information.

Pourtant, à Pierrefonds-Roxboro l'Association des propriétaires et résidents (APRPR) s'intéresse aux milieux humides et aux zones inondables de l'arrondissement. Certains de ses membres férus de l'histoire de ces localités ont produit des recherches portant sur les débats des années 1960-1970 à propos de la construction d'une digue de protection à Roxboro. Il s'agit de l'unique exemple d'un groupe de citoyens s'intéressant à la question des inondations qu'il nous a été donné de constater dans notre zone d'étude. Bien que l'Association n'ait pas pour mission de sensibiliser tous ses concitoyens à cette question en particulier, ses membres sont fort actifs et s'impliquent régulièrement dans la sphère politique locale. C'est là un exemple de vie associative assez courant dans les anciennes municipalités de l'ouest de l'île de Montréal, et il s'agit sans contredit d'un élément qui renforce la cohésion sociale, et donc la capacité d'adaptation de la communauté en entier.

Afin d'engager plus directement des citoyens dans la réflexion sur les mesures d'adaptation aux phénomènes des inondations, il pourrait être intéressant de réunir un groupe d'experts, d'élus et d'autres parties prenantes, à la manière d'une organisation de bassin versant, mais sans en avoir nécessairement toute la portée, étant donné la grande complexité et l'étendue du bassin versant en question.

Tableau 30 : Synthèse de l'analyse qualitative de la capacité d'adaptation

Indicateur				
	Ahuntsic	Montréal-Nord	Pierrefonds-Roxboro	Rivière-des-Prairies-Pointe-aux-Trembles
Nombre de paliers de gouvernement	5	5	5	5
Concordance des règlements locaux relatifs aux zones inondables avec les lois et règlements supérieurs	oui	oui	oui	oui
Réglementation sur l'immunisation contre les inondations	+	+	++	+
Expérience d'inondations dans le passé	++	+	++	++
Présence d'un organisme de bassin versant	non	non	non	non
Artificialisation de la zone inondable	++	+++	++	++
Présence d'organismes faisant de la sensibilisation sur les milieux riverains	non	non	oui	non
Diffusion par les autorités d'information à propos de la préparation aux inondations	++	+	++	+

Réalisé par : Guillaume D.-Dutil, 2012

Conclusion

L'analyse de la capacité d'adaptation apporte un éclairage important à notre démarche axée sur la vulnérabilité. En effet, en intégrant les forces d'une population et son potentiel de répondre aux défis climatiques, elle permet d'éviter de surreprésenter les aspects négatifs. Par ailleurs, au-delà de la représentation cartographique, nous avons souhaité souligner une série d'aspects qui peuvent modifier très largement la réalité entre le potentiel, ou capacité d'adaptation "sur papier", et les actions et éléments concrets entrepris afin que le territoire et la population soient effectivement mieux adaptés aux aléas présents et futurs.

La question de la capacité d'adaptation aux risques est un enjeu d'aménagement incontournable, et les planificateurs et décideurs se doivent d'en tenir compte. La méthode que nous proposons ici est un simple exemple du genre de réflexion qui doit se poser quand on envisage la réponse aux risques à moyen et long terme. Nous nous sommes efforcés d'en tracer des contours solides, précisément adaptés à cette étude de cas, tout en indiquant quelles autres voies pourraient être explorées s'il était question d'un autre territoire.

Cette portion de l'analyse est aussi l'occasion de prendre du recul face aux données statistiques pour examiner le contexte selon des critères appropriés au risque et au milieu en question, qui sont ceux de l'analyse descriptive qui précède. Cela permet, comme nous l'avons vu, de soulever des éléments qui

peuvent difficilement être représentés sur une même carte, comme ceux qui ont à voir avec la culture institutionnelle, par exemple.

Bien entendu, cette tentative de s'approcher de la réalité concrète se limite ici au monde des institutions, à la réponse publique. Dans une étude future sur la capacité d'adaptation, il serait pertinent d'inclure un volet d'analyse des réponses privées aux questions d'adaptation. Autrement dit, d'explorer ce qui fait que les citoyens posent ou ne posent pas de gestes pouvant renforcer leur adaptation aux risques présents dans leur milieu.

Recommandations

- Encourager la mise en place d'une base de données systématique des événements d'inondations à l'échelle de la ville de Montréal, et partager ces connaissances avec les chercheurs et les citoyens intéressés
- Développer une formation destinée aux élus et aux responsables de l'aménagement afin de les sensibiliser aux enjeux soulevés par les risques naturels, et les encourager à une application plus serrée des normes régissant les zones de contraintes, dans une perspective de sécurité publique, afin d'éviter un développement effréné dans les zones à risque et les coûts que cela entraîne pour toute la société
- Étudier plus en profondeur les motivations derrière les actions privées pour l'adaptation, par un questionnaire destiné aux citoyens, afin de mieux voir sur quels aspects devrait se concentrer une politique publique de soutien aux mesures d'adaptation
- Mettre sur pied une table de concertation réunissant les parties prenantes intéressées par la gestion de la rivière des Prairies (élus, CMM, ministères de l'Environnement, de la Sécurité publique, des Ressources naturelles, Hydro-Québec, groupes écologistes), pour qu'ils puissent réfléchir et anticiper les effets de crues plus fréquentes et plus intenses
- Étendre la zone d'étude de la présente recherche à l'autre rive de la rivière des Prairies afin de pouvoir comparer les variations sur des territoires administrés différemment

4.4. Cartographie des typologies

Objectif 4 : *Cartographie des différentes typologies de vulnérabilité en fonction des multiples niveaux d'eau possiblement atteints. Cette cartographie de la vulnérabilité en fonction des niveaux d'eau permettra d'identifier, de caractériser et de hiérarchiser les espaces à partir desquels se crée et se diffuse la vulnérabilité au sein du territoire [D'Ercole, Metzger, 2009].*

4.4.1. Méthodologie de la vulnérabilité et résultats

Dans notre recherche nous avons dissocié l'analyse de la sensibilité de l'analyse de la capacité d'adaptation afin de mieux comprendre les caractéristiques sociales et territoriales qui ont une influence sur ces concepts. À partir de cette réflexion, nous avons pu identifier les indicateurs de la sensibilité et la capacité d'adaptation et nous avons pu saisir les différences, parfois subtiles, entre ceux-ci. En effet, les frontières entre les indicateurs qu'influencent la sensibilité et la capacité d'adaptation sont parfois floues et la forme des données disponibles (recensement de la population par exemple) rend le choix d'indicateurs difficile.

Par exemple, la fourchette inférieure de valeurs de la variable « revenu des ménages » peut être utilisée comme indicateur de la sensibilité, alors que l'extrémité supérieure de cette variable peut être utilisée comme indicateur de la capacité d'adaptation. Un autre exemple, la concentration d'une population faiblement scolarisée peut être utilisée comme indicateur de sensibilité, en lien avec la forte probabilité de trouver dans cette population une plus haute fréquence du faible revenu. En revanche, le niveau de scolarisation peut aussi être utilisé comme indicateur de capacité d'adaptation puisqu'ayant une plus forte scolarisation on pourrait supposer que la population est mieux équipée (financièrement, organisationnellement, etc.) à affronter une catastrophe. Alors, certains indicateurs que nous avons utilisés dans l'analyse de la sensibilité ont été repris dans l'analyse de la capacité d'adaptation mais de manière inverse. Il s'agit notamment des indicateurs du niveau d'éducation, de la tenure des logements et de l'emploi.

Ces différences entre les indicateurs de la sensibilité et de la capacité d'adaptation sont très importantes à saisir par une réflexion approfondie et continue afin d'arriver à des résultats cohérents. Dans cette partie du rapport, nous allons reprendre les résultats de la sensibilité et de la capacité d'adaptation pour développer un indice de la vulnérabilité. En effet, la vulnérabilité est décrite par les « paramètres clés » qui la composent, soient l'exposition, la sensibilité et la capacité d'adaptation (Adger, 2006, p. 269). Suivant cette logique, dans ce chapitre du rapport nous allons présenter la méthodologie de l'analyse de la vulnérabilité des communautés qui occupent la rive de l'île de Montréal de la rivière des Prairies.

4.4.2. Indice de la vulnérabilité

Nous avons recensé divers travaux où les auteurs conçoivent ou reconnaissent la vulnérabilité comme étant la relation entre la sensibilité et l'adaptation d'un territoire exposé à un aléa [Adger, 2010; Kelly et Adger, 2000; Brooks et al. 2005; Eakin et Lynd, 2006, Gallopin, 2006, GIEC, 2001; Holland et al., 2011; Allen Consulting Group, 2005]. Dans notre cas d'étude, nous avons développé des indices pour mesurer la sensibilité sociale (ISSAIP) et territoriale (IST) ainsi que la capacité d'adaptation (IAdapt). De plus, les simulations hydrologiques d'inondation nous permettent d'illustrer l'exposition aux inondations du secteur d'étude dans le contexte des changements climatiques. C'est à partir de ces éléments que nous sommes en mesure d'établir un indice de vulnérabilité (IVu) qui explique, pour la communauté étudiée et en fonction des indices de la sensibilité et de l'adaptation, le degré de vulnérabilité de chaque unité géographique.

Suivant les travaux d'Adger (2010) et de l'Allen Consulting Group (2005), la vulnérabilité d'une communauté est égale à la sensibilité de sa population et de son territoire moins sa capacité d'adaptation.

$$IVu = (ISSAIP + IST) - IAdapt$$

Formule 6

À cette étape de notre recherche, nous avons mis en relation les résultats de l'indice de la sensibilité sociale par addition d'indicateurs pondérés (ISSAIP), l'indice de la sensibilité territoriale (IST) et l'indice de la capacité d'adaptation (IAdapt). De cette manière, pour chaque unité géographique, il est possible de déterminer la vulnérabilité totale de la zone d'étude, en prenant en considération autant les éléments qui ont une influence sur la sensibilité de la population et des infrastructures que les éléments qui dénotent d'une bonne ou d'une mauvaise adaptation. À titre d'exemple, un secteur qui est habité par une population âgée où l'on trouve des infrastructures critiques, tel un hôpital, sera jugé très sensible par l'ISSAIP et l'IST. En revanche, si ce même secteur affiche un revenu moyen et un niveau d'éducation élevé (soit une bonne capacité d'adaptation) verra sa vulnérabilité totale diminuer en fonction de la différence entre la sensibilité et l'adaptabilité. En somme, l'indice de la vulnérabilité révèle les secteurs qui doivent être ciblés et analysés par les gestionnaires afin d'atténuer la sensibilité, lorsqu'il est possible de le faire, ou bien, d'améliorer l'adaptation de la population et des infrastructures pour les préparer à faire face à une inondation.

Sur le plan technique, le calcul de l'IVu n'est possible que lorsque tous les indices en jeu (ISSAIP, IST et IAdapt) sont représentés à une même échelle. Dans notre cas d'étude, l'ISSAIP et l'IAdapt ont été développés à l'échelle de l'AD puisque la plupart des données nécessaires à leur réalisation proviennent du recensement de la population de Statistiques Canada. L'IST, pour sa part, a été développé à une échelle constante représentée par des cellules de 200 mètres de côté. Étant donné que la superficie couverte par les cellules de l'IST est beaucoup plus petite que celle couverte par les AD des autres deux indices, nous penchons pour garder la cellule comme échelle d'analyse pour l'IVu. En effet, les cellules nous permettent d'être plus précis dans l'analyse et, de cette manière, mieux cibler les points de concentration de la vulnérabilité.

Pour ramener les résultats de l'échelle de l'AD à celui de la cellule, nous avons superposé les résultats des ISSAIP et IAdapt à la grille de 527 cellules qui couvrent la zone potentiellement exposée à une inondation dans la rive de la rivière des Prairies. Rappelons que cette zone d'exposition a été établie à partir des simulations hydrologiques d'inondation. Nous avons retenu le profil 9 du modèle d'inondation comme zone d'étude (voir la figure 26).

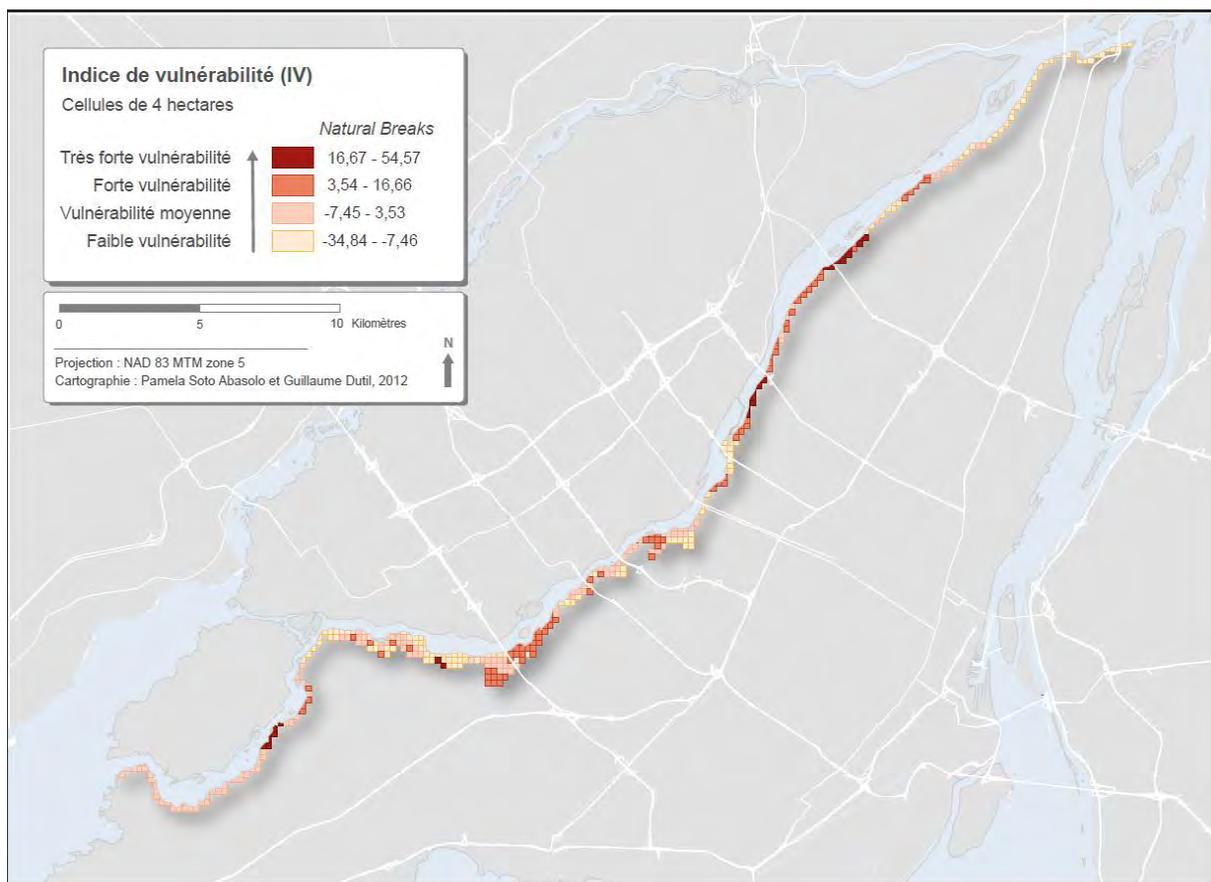
La mise en relation des AD et des cellules a été réalisée avec l'outil *Spatial Join* de ArcMap 10¹³. Étant donné que les échelles géographiques de l'ISSAIP, l'IST et l'IAdapt sont différentes (AD et cellules), la moyenne des AD a été accordée à chaque cellule. La plupart des cellules, contenues entièrement à l'intérieur d'une AD, se sont vues accorder la valeur exacte de l'AD correspondant au secteur. Toutefois, dans le cas où une cellule se trouve à la frontière de deux ou plus AD, la valeur moyenne de celles-ci a été attribuée à la cellule.

Il est important de mentionner, que les indicateurs des indices (ISSAIP, IST et IAdapt) ont tous été normalisés à chaque étape de l'analyse par la méthode des valeurs centrées-réduites (Zscore). De cette manière, les indices peuvent être mis en relation sur une échelle de valeurs commune.

Enfin, nous avons appliqué la formule 6 à la grille finale de l'IVu pour calculer la vulnérabilité totale de chaque secteur d'analyse. Les résultats sont présentés dans la figure 38.

¹³ Pour plus d'information sur cette étape, voir la section IV.3.1.3 Méthode de la sensibilité territoriale et la figure 26 de cette section.

Figure 38 : Résultats de l'indice de vulnérabilité (IVu)



Les résultats de l'IVu sont concluants. Ils montrent de manière claire la concentration de la vulnérabilité à travers le territoire. En effet, en jumelant les résultats de la sensibilité sociale et de la sensibilité territoriale avec les résultats de la capacité d'adaptation, on s'aperçoit d'une consolidation des noyaux de la vulnérabilité (autant forte que faibles) sur la rive. Des secteurs, comme les extrêmes est et ouest de la rive, confirment leur *faible vulnérabilité* en fonction des caractéristiques de leur population, de leurs infrastructures et de leur capacité à s'adapter. En revanche, d'autres secteurs comme le noyau villageois de Sainte-Genève à l'ouest de l'île et aux alentours du pont Pie IX et du pont de l'autoroute 25, présentent une *très forte vulnérabilité*. En effet, ces secteurs ont été identifiés comme très sensibles en fonction de l'ISSAIP et de l'IST et ils présentent une *faible capacité d'adaptation* (IAdapt). La *forte vulnérabilité* est davantage concentrée au centre et à l'est de la rive.

Le tableau 31 présente les statistiques de fréquence des intervalles de la vulnérabilité pour la zone d'étude. La consolidation des intervalles de la vulnérabilité est particulièrement visible dans la distribution du nombre de cellules entre la *vulnérabilité moyenne* et la *forte vulnérabilité*. En effet, dans les indices de la sensibilité (ISSAIP et IST), la *sensibilité moyenne* et la *forte sensibilité* ont tendance à être moins fréquentes que la *faible sensibilité*. En revanche, l'IVu affiche une *faible vulnérabilité* nettement inférieure aux intervalles moyens (vulnérabilité moyenne et forte). Ceci dit, l'IAdapt a un impact important dans l'IVu puisque nombreux secteurs ayant une *faible sensibilité* montrent également une faible capacité d'adaptation ce qui a pour effet d'accroître leur vulnérabilité. La *très forte vulnérabilité*, pour sa part, demeure faiblement-représentée avec 40 cellules très concentrées sur le territoire.

Tableau 31 : Statistiques des intervalles de la vulnérabilité

Intervalle de l'IVu	IVu (Intervalles – Natural breaks)	Nombre de cellules	Pourcentage de cellules
Faible vulnérabilité	-34,84 - -7,46	193	36,62 %
Vulnérabilité moyenne	-7,45 - 3,53	175	33,21 %
Forte vulnérabilité	3,54 - 16,66	119	22,58 %
Très forte vulnérabilité	16,67 - 51,57	40	7,59 %
Total		527	100 %

Réalisée par : Pamela Soto Abasolo, 2012

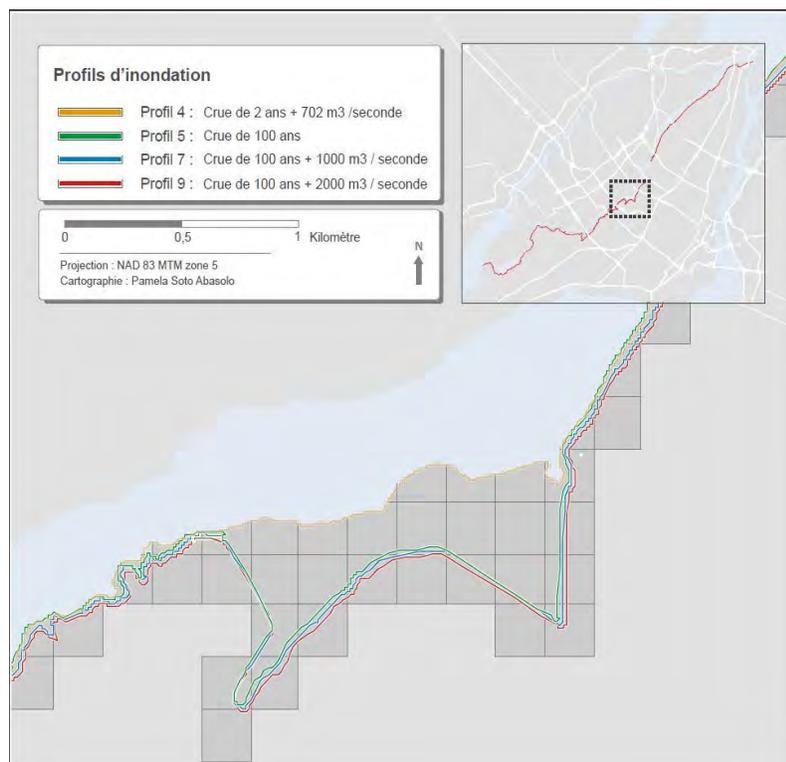
Typologie de la vulnérabilité.

Suite à la création de l'IVu, nous avons superposé ces résultats aux diverses limites d'inondation déterminés par les simulations hydrologiques réalisées dans le cadre de cette recherche. Il s'agit alors d'observer la distribution de la typologie de la vulnérabilité (très forte vulnérabilité, forte vulnérabilité, vulnérabilité moyenne et faible vulnérabilité) à l'intérieur de ces profils d'inondation.

En ce qui concerne les scénarios d'inondations, rappelons que ceux-ci ont été déterminés par la modélisation hydrologique selon divers scénarios expliqués en détail dans le chapitre 4.2 de ce rapport. Les scénarios retenus comme limites d'exposition pour l'analyse de la vulnérabilité sont les suivants (figure 39)

- Profil 4 : Crue de 2 ans + 702 m³ /seconde
- Profil 5 : Crue de 100 ans
- Profil 7 : Crue de 100 ans + 1000 m³ / seconde
- Profil 9 : Crue de 100 ans + 2000 m³ / seconde

Figure 39 : Profils d'inondations des simulations hydrologiques retenus



Comme il est possible de voir dans la figure 39, les écarts entre les diverses simulations hydrologiques sont très faibles pour notre échelle d'étude. Malgré cela, on observe des différences entre les territoires touchés par les limites d'inondation. Afin d'analyser les différents degrés de vulnérabilité à l'intérieur de chaque limite d'inondation, nous avons déterminé une grille d'observation de la vulnérabilité (tableau 32) qui nous permet de cibler notre attention sur certains indicateurs très marquants dans l'évaluation de la vulnérabilité.

Tableau 32 : Analyse des résultats des indicateurs clés et de la typologie de la vulnérabilité en fonction des divers scénarios d'inondation.

TYPOLOGIE DE LA VULNÉRABILITÉ (nombre de cellules)	Scénarios d'inondation			
	Profil 4	Profil 5	Profil 7	Profil 9
Faible vulnérabilité	171	185	192	193
Vulnérabilité moyenne	152	165	170	175
Forte vulnérabilité	99	106	116	119
Très forte vulnérabilité	37	37	40	40
TOTAL	459	493	518	527

INFRASTRUCTURES (nombre d'infrastructures)	Profil 4	Profil 5	Profil 7	Profil 9
Logements résidentiels privés	7 744	8 608	9 438	9 817
Bâtiments	6 356	7 364	8 143	8 418
Hôpitaux et CHSLD	6	6	6	7
Résidences pour personnes âgées	22	23	28	28

Nous pouvons observer dans le tableau 32 une progression graduelle du nombre de cellules incluses à l'intérieur des limites d'inondations décrites par les profils hydrologiques 4, 5, 7 et 9. En effet, le profil 4 englobe 459 cellules, soit un territoire de 18,24 km² alors que le profil 9 représente une inondation qui couvre 527 cellules soit 21,08 km². Cette différence de 68 cellules correspond principalement à des cellules jugées à *faible vulnérabilité* et à *vulnérabilité moyenne*. En effet, la quasi-totalité des cellules à *très forte vulnérabilité* (38 cellules de 40) est située très près de la rive et contenue alors dans la limite d'inondation du profil 4. La même observation a été faite pour les secteurs à *forte vulnérabilité* qui varient peu entre les divers profils (entre 137 et 169). Ceci dit, les secteurs à *très forte sensibilité* et *forte sensibilité* se trouvent dans la plupart de cas très près de la rivière ce qui augmente leur exposition aux inondations. Au fur et à mesure qu'on s'éloigne de la rive (vers le profil 9 d'inondation), les secteurs sont de plus en plus à *vulnérabilité moyenne* et à *faible vulnérabilité*.

En ce qui concerne les infrastructures sélectionnées dans le tableau 32, nous pouvons voir que la limite d'inondation illustrée par le profil 9 englobe 8 418 bâtiments qui seraient susceptibles d'être affectés par une inondation de cette envergure. Aussi, à l'intérieur de ce profil on trouve 28 résidences pour personnes âgées et 7 centres hospitaliers (2 hôpitaux et 5 CHSLD). Le profil 4 pour sa part, contient 6 356 bâtiments, 6 centres hospitaliers et de soins de longue durée puis 22 résidences pour personnes âgées.

Conclusion

Les résultats de l'IVu sont très concluants puisqu'ils permettent d'observer clairement la distribution et la concentration de la vulnérabilité à travers le territoire. Mettant en relation une multitude de variables qui décrivent la sensibilité sociale et territoriale ainsi que la capacité d'adaptation des communautés,

l'IVu constitue un outil simple qui permet de synthétiser diverses caractéristiques du territoire. L'objectif ultime de notre démarche est d'offrir un aperçu de la vulnérabilité du territoire afin de cibler les lieux où des actions visant à augmenter la capacité d'adaptation des communautés sont nécessaires et prioritaires.

L'observation de la typologie de la vulnérabilité des communautés à l'intérieur de divers scénarios d'inondations nous a permis d'identifier les changements en termes du degré de vulnérabilité et d'infrastructures susceptibles d'être affectées par une inondation. Nous avons ainsi remarqué que les secteurs les plus vulnérables se trouvent pour la plupart très près de la rive et seraient affectés même dans le plus conservateur des scénarios.

À partir de ces résultats, l'observation sur le terrain s'impose où la perception des risques et la capacité d'action doivent être évaluées. Dans le cadre de cette recherche, nous nous sommes concentrés sur l'évaluation de la vulnérabilité en amont des actions sur le terrain, mais nous reconnaissons l'importance de pousser plus loin la recherche dans le futur.

5. Synthèse des résultats

La démarche de l'étude historique tant de l'urbanisation que des inondations est importante avant d'entreprendre une investigation pour l'aménagement et l'adaptation du territoire. Elle a montré l'importance de l'expansion urbaine dans la zone étudiée entre 1920 et 2009 et donc dans des zones potentiellement vulnérables aux inondations dans le contexte des changements climatiques. Elle a fait apparaître qu'une réglementation trop tardive peut nuire à la maîtrise du développement des constructions, des résidents conservant le droit de reconstruire en zone inondable. Des relevés systématiques et une cartographie précise des zones inondées s'avèrent nécessaires, le but étant d'obtenir une bonne connaissance des lieux et de leur environnement. Ainsi, une analyse suffisamment complète et pertinente des enjeux face aux risques d'inondation pourra être réalisée.

La difficulté majeure dans le contexte de notre étude de cas s'est avérée être celle d'obtenir des informations, certaines ayant un caractère confidentiel, d'autres n'étant pas disponibles. Il est apparu que beaucoup d'informations sont éparpillées, présentées sur différents supports et différents types de bases de données. Aucune base de données précise et géo référencée des événements passés n'était disponible pour le territoire analysé. Plusieurs bases de données ont été créées par géo référencement à partir du codage des adresses postales, en particulier pour les infrastructures. Il faudrait avoir accès à des données systématiquement compilées dans un SIG.

Les scénarios hydrologiques, particulièrement ceux résultant de la modélisation bidimensionnelle constituent des outils puissants puisqu'ils déterminent et montrent aux acteurs locaux les niveaux d'eau possiblement atteints lors des épisodes de crues. L'analyse de la vulnérabilité en fonction de ces niveaux d'eau a pour but de hiérarchiser les niveaux de vulnérabilité de la zone d'étude et de privilégier dans le futur des zones prioritaires pour la prévention et l'adaptation.

La méthode d'analyse de la vulnérabilité présente une démarche innovante pour aider les acteurs locaux à prendre des décisions éclairées concernant l'aménagement et l'adaptation de leur territoire aux enjeux des CC. Une investigation très sérieuse nous a d'abord permis de déterminer une liste d'indicateurs de la sensibilité classés par thèmes et de montrer différentes méthodes possibles pour les analyser.

La liste des indicateurs est exhaustive et les municipalités pourront choisir ceux qui sont les plus appropriés pour leur cas. Il est important de réaliser que si de nombreux indicateurs sont très pertinents, certains ne peuvent être utilisés à cause du manque de bases de données. Des efforts restent à accomplir par les administrations de la ville de Montréal et du gouvernement du Québec pour la centralisation et le développement de l'offre de données suite à la mise en place de portails de diffusion des données existantes.

Parmi les indicateurs de la sensibilité, notre investigation nous a permis de réaliser que l'ISS offre un résultat rapide décrivant bien la distribution de la sensibilité mais manquant de précision dans la détermination de la variable la plus importante. L'ISSAIP est très intéressant car il permet grâce à l'atelier une réflexion sur la pondération des indices, ce qui est nécessaire quand on veut obtenir plus de détails basés sur une connaissance précise du cas d'étude. Cette démarche permet ainsi une possibilité de réaction sur la validité de chaque indice et de son poids.

L'atelier présente des aspects bénéfiques pour déterminer les indicateurs et leur poids. Il implique une valorisation de la méthode car il fait intervenir des chercheurs spécialistes des questions de risques, mais aussi des experts et acteurs locaux responsables de l'aménagement pour les inondations.

L'analyse de la sensibilité territoriale a permis de faire un état des principales infrastructures des lieux étudiés et de leurs enjeux. La quantification des infrastructures contenues dans chaque unité spatiale

offre un aperçu de leur degré d'exposition aux inondations et doit permettre aux responsables d'apporter une réponse appropriée.

La compréhension de l'adaptation prend ensuite en compte non seulement la capacité d'adaptation mais aussi les éléments les plus influents du contexte politique, légal et institutionnel. L'analyse de la vulnérabilité permet de compiler les deux aspects qui la composent, à savoir la sensibilité et la capacité d'adaptation. Sa hiérarchisation en intégrant l'incertitude des changements climatiques est un outil puissant pour les décideurs qui sont amenés à choisir des aménagements sur le long terme. Cette recherche a aussi permis l'éducation et la sensibilisation d'étudiants en urbanisme et en hydrologie à la question des risques dans le contexte des changements climatiques. Les collaborations avec des groupes de recherches internationaux se penchant sur des enjeux semblables ont été renforcées. Les relations avec les acteurs locaux travaillant sur ces enjeux ont permis des échanges fructueux.

6. Analyse et discussion

La question de la vulnérabilité des populations est liée à celle de la capacité d'adaptation et de la résilience. Il est de plus en plus essentiel de réfléchir à des outils qui répondent tant en termes de prévention des risques que d'adaptation aux changements climatiques.

La méthode innovante développée dans cette recherche permet aux communautés urbaines de comprendre leur vulnérabilité aux aléas climatiques (les inondations) dans le contexte des CC. Elle constitue une étape obligée avant la mise en place d'outils d'aménagement qui répondent non seulement à la prévention des risques mais aussi à l'adaptation aux changements climatiques.

Cette recherche a permis de développer des outils qui contribuent à mieux comprendre la vulnérabilité aux inondations dues au débordement de cours d'eau, pouvant affecter les collectivités urbaines. Ces outils vont guider les décideurs, urbanistes et aménageurs, à faire face à ces risques de façon plus efficace tout en intégrant dans leur réflexion l'incertitude liée aux changements climatiques. Ce projet fournit une méthode d'aide à la décision en identifiant et caractérisant les zones vulnérables. L'objectif sera ensuite de prioriser les interventions qui visent à réduire cette vulnérabilité. Ce projet a contribué à identifier les enjeux et les aspects à considérer dans la problématique de l'aménagement du territoire dans ces zones à risques, tant sur le plan des politiques de développement urbain que de la planification territoriale.

De même, la formation, la sensibilisation et la participation tant d'étudiants, de chercheurs internationaux que d'acteurs locaux permet d'obtenir une fine connaissance des territoires, de développer des outils adaptés localement tout en relativisant les résultats.

Un outil de détermination de la vulnérabilité permettant de hiérarchiser la vulnérabilité des communautés à risques dans le contexte des changements climatiques constitue un excellent moyen pour réfléchir à des solutions d'adaptation qui intègrent prévention et considération des changements climatiques sur le long terme.

Cette recherche a aussi soulevé l'importance d'une meilleure coordination entre les gestionnaires de l'urgence et les façonneurs de l'adaptation.

Les quatre étapes de la recherche sont complémentaires. Elles permettent, en utilisant des méthodes variées d'obtenir une cartographie de la vulnérabilité dans le contexte des changements climatiques et donc en intégrant l'incertitude. L'analyse de la sensibilité sociétale aide à cerner les enjeux liés à la population localisée dans les zones à risque. L'utilisation de bases de données liées à l'emploi ou la santé permettrait de révéler l'ensemble de ces enjeux. L'intégration d'un atelier dans la démarche permet non seulement de préciser la sensibilité localement mais aussi d'obtenir des retombées collatérales par la participation de différents acteurs. La méthode d'analyse de la sensibilité territoriale est relativement simple et permet de comprendre les dynamiques du secteur bâti tout en considérant le degré d'exposition des infrastructures aux inondations. D'autres indicateurs, comme l'accessibilité mériteraient dans le futur d'être intégrés dans cette analyse. L'obtention de limites de niveaux d'eau possiblement atteints lors de crues a permis non seulement de tester et de comparer deux méthodes mais fait aussi partie d'une démarche innovante qui vise à intégrer l'incertitude liée aux CC. Enfin, l'analyse de la capacité d'adaptation et son utilisation peuvent aussi être considérées comme novatrices. C'est une étape essentielle pour comprendre la véritable vulnérabilité de la zone étudiée et de porter un regard éclairé sur les futurs besoins en adaptation. Travailler sur la capacité d'adaptation implique une connaissance des règlements et de la gouvernance. La question des droits acquis dans la

zone étudiée et de ce qu'ils impliquent sur les constructions dans les zones à risque méritera d'être approfondie.

L'importance des SIG en aménagement est avérée non seulement pour la construction de bases de données précises mais aussi la possibilité de mener des analyses complexes pour obtenir une cartographie relativement simple à comprendre pour les décideurs. Il est nécessaire de développer des bases de données géo-référencées dans de nombreux domaines allant de l'hydrologie à la santé ou l'emploi. Ces bases de données doivent être compatibles à différentes échelles et être conservées dans le temps. Les SIG constituent un outil puissant pour la compilation, les calculs, les analyses et la visualisation, visant à la compréhension de phénomènes complexes.

7. Conclusion et recommandations

Cette recherche se situe dans la perspective des changements climatiques. Ainsi, elle montre la prise de conscience de l'utilité de développer des outils qui permettent aux acteurs locaux de comprendre les enjeux liés aux incertitudes des CC et de choisir des solutions d'adaptation en fonction de ces enjeux. La méthode développée vise à améliorer la capacité d'adaptation des communautés urbaines par la connaissance de leur vulnérabilité dans le contexte des changements climatiques.

C'est par le développement de méthodes innovantes par des équipes multidisciplinaires et en intégrant les acteurs locaux que les enjeux liés à la planification de la résilience de nos communautés urbaines en intégrant les changements climatiques pourra être atteinte.

Ce projet a permis de mettre en lumière plusieurs recommandations :

- Créer des bases de données historiques et actualisées d'inondations géo référencées pour l'ensemble des municipalités;
- Encourager la transparence dans les données d'inondations passées et actuelles;
- Intégrer de nouveaux phénomènes liés aux changements climatiques, concernant les embâcles, le frasil et la possibilité de récurrence de pluies importantes de même que les caractéristiques des inondations : «lentes», dues aux crues printanières, «rapides», dues à l'accumulation de frasil, aux phénomènes d'embâcle-débâcle ou encore à l'augmentation des précipitations intenses sous forme de pluies;
- Intégrer les incertitudes au niveau des bassins versants et considérer les capacités des ouvrages et leurs limites;
- Considérer non seulement la gestion de l'urgence, mais aussi l'adaptation en intégrant les incertitudes et en considérant différentes échelles d'analyse;
- Modéliser, dans un souci de protection du public, les niveaux d'eau atteints avec de vraies données et des causes multiples (en intégrant les retours d'égouts);
- Réaliser des scénarios climatiques permettant la cartographie des différents niveaux d'eau possiblement atteints. L'objectif est ensuite pour les acteurs locaux de non seulement prendre conscience du risque, mais aussi de travailler sur l'adaptation en intégrant la question des coûts;
- Réfléchir globalement aux outils d'adaptation et travailler avec des architectes du paysage sur des territoires ciblés;
- Penser globalement à l'adaptation et non pas en silos par l'intégration des enjeux liés aux changements climatiques;
- Favoriser l'accès des chercheurs aux bases de données concernant les risques d'inondation;
- Améliorer l'offre de statistiques, de données sur l'emploi, la santé, les industries dangereuses etc.;
- Intégrer dans le cursus pédagogique des étudiants en urbanisme, hydrologie et autres discipline la question des enjeux des CC et les former aux logiciels nécessaires.

8. Références

- Adger, W. N. (1999). "Social vulnerability to climate change and extremes in coastal Vietnam." *World Development* 27(2): 249-269.
- Adger, W. N. (2006). "Vulnerability." *Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions* 16(3): 268-281.
- Adger W. N. et al , (2007) . "Assessment of adaptation practices, options, constraints and capacity", *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability . Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge : Cambridge University Press, pp. 717 –743.
- Adger, W. N., N. Brooks, et al. (2004). New indicators of vulnerability and adaptive capacity, Tyndall Centre for Climate Change Research.
- Allard, G. (2009) « Des tempêtes de glace dans nos rivières », *Info-UQAR*, 18 février 2009, [<http://www.uqar.ca/uqar-info/0209/ArticleGAllard.asp>]. (Consulté le 4 décembre 2010)
- America, O. Social Vulnerability and Climate Change in the US Southeast. <http://adapt.oxfamamerica.org/>.
- Arnold, M., R. S. Chen, et al. (2006). *Natural Disaster Hotspots: Case Studies*. Disaster Risk Management Series. W. B.-H. M. Unit. Washington D.C., World Bank.
- Baillargeon J. (2003). "L'analyse en composantes principales". Document d'enseignement. Université de Québec à Trois-Rivières. 25 pages. <http://www.uqtr.ca/cours/srp-6020/acp/acp.pdf>
- Barroca, B. (2006). "Risques et vulnérabilités territoriales : Les inondations en milieu urbain". Thèse de Doctorat à l'Université de Marne-La-Vallée, sous la direction de G. Hubert. 317 p.
- Bankoff, G., Frerks, G. and Hilhorst, T. (2004), "Mapping Vulnerability: Disasters, Development and People", London: Earthscan, 2004
- Bates, P.D. et De Roo A.P.J. (2000). A simple raster-based model for flood inundation simulation. *Journal of Hydrology*, 2000, 236(1), p. 54-77.
- Bates, B. C., Z. W. Kundzewicz, S. Wu et J. P. Palutikof, éd., (2008). "Le changement climatique et l'eau", document technique publié par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Secrétariat du GIEC, Genève, 236 p.
- Baume J.P. et G. Belaud, (2002). "Introduction à la modélisation hydraulique". Cours diffusé aux étudiants de l'ENSAM (DAA Agroenvironnement), ENGREF (mastère «gestion de l'eau»), ENTPE (formation continue). 57 p.
- Becerra, S. et Peltier, A. (2010). "Contribution des actions publiques liées au sous secteur de l'élevage à réduire la vulnérabilité des populations rurales : Etat des lieux, effets et liens à la gestion effective", *Projet ANR Elevage-Climat-Sociétés (ECLIS)*, 199 p.
- Becerra, S. et Peltier, A. (2009). "Risques et environnement : recherches interdisciplinaires sur la vulnérabilité des sociétés". Paris : L'Harmattan. 577 p.
- Beck U., (1986), "La Société du risque", Aubier, Coll. Alto.
- Benyahya, L., A. Daigle, D. Caissie, D. Beveridge, A. St-Hilaire, (2009). *Caractérisation du régime naturel du débit des bassins versants de l'Est du Canada*. Rapport de Recherche- INRS-ETE.R-1057
- Besson, L., 1996, *Les risques naturels en montagne, traitement, prévention, surveillance*, Artès-Publiaip, 438 p.

Birkmann, J. (Ed.), (2006), *Measuring Vulnerability to Natural Hazards— Towards Disaster-Resilient Societies*. UNU Press, Tokyo, New York.

Birkmann, J. (2007). "Risk and vulnerability indicators at different scales: Applicability, usefulness and policy implications." *Environmental Hazards* 7(1): 20-31.

Blaikie, P. T. Cannon, I. Davis, and B. Wisner (1994). *At Risk: Natural Hazards, People's Vulnerability, and Disasters*. London: Routledge.

Bleau, N. et Thomas, I. (2010) "Analyser la vulnérabilité sociétale et territoriale aux inondations en milieu urbain dans le contexte des changements climatiques, en prenant comme cas d'étude la Ville de Montréal". Proposition de projet Ouranos / ICAR-QUÉBEC, Acceptée.

Bohm, H. R., B. Haupter, et al. (2004). "Implementation of flood risk management measures into spatial plans and policies." *River Research and Applications* 20(3): 255-267.

Boruff, B. J. and S. L. Cutter (2007). "The environmental vulnerability of Caribbean Island nations." *Geographical Review* 97(1): 24-45.

Boucher, Jean-Paul (1978). *Cartographie des plaines d'inondation, Rivière-des-Prairies-ES-78-01*, Service de l'hydrométrie, ministère des Richesses naturelles, Québec.

Boucher, Jean-Paul, François Picard (1993). *Cartographie des zones inondables, villes de Laval-Rivière-des-Prairies -DH-93-04*, Direction du domaine hydrique, ministère de l'Environnement, Québec.

Bouillon, M. C. (1999). "Le risque d'inondation et son évolution sur la rivière Châteauguay." *Canadian Journal of Civil Engineering* 26(2): 186-196.

Bourque, A. et Simonet, G. (2008). "Québec » dans vivre avec les changements climatiques au Canada : édition 2007", Lemmen, F.J. Warren, J. Lacroix et Bush, E. (éditeurs), Gouvernement du Canada, Ottawa (Ontario), pp. 171-226.

Breton, C. and C. Marche (2001). "Une aide à la décision pour le choix des interventions en zone inondable." *Revue des sciences de l'eau* 14(3): 363-379.

Brooks, N., W. N. Adger, et al. (2005). "The determinants of vulnerability and adaptive capacity at the national level and the implications for adaptation." *Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions* 15(2): 151-163.

Bureau d'assurance du Canada (2005) « Dommages causés par l'eau dans la région de Québec », *Communiqué de presse*, 24 octobre 2005, [http://www.infoassurance.ca/data/fr/20051024_dommmages-eau-quebec.pdf] (Consulté le 30 octobre 2010)

Camphuis, C. L.e. N.-G. (ND). *METHODOLOIRE Développement d'une méthodologie de mise en perspective des dommages économiques à l'échelle du bassin fluvial de la Loire*.

Cannon, T. 2000. "Vulnerability Analysis and Disasters," (ch.2) in D.J. Parker, ed. *Floods*. London: Routledge, pp. 45-55.

Cardona, O.D. (2003). "The need for rethinking the concepts of vulnerability and risk from a holistic perspective: a necessary review and criticism for effective risk management". In: G. Bankoff, G. Frerks and D. Hilhorst, Editors, *Mapping Vulnerability: Disasters, Development and People*, Earthscan, London (2003) (Chapter 3).

CDC-ATSDR (ND). *The CDC-ATSDR Public Health Vulnerability Mapping System: Using a GIS for Depicting Human Vulnerability to Environmental Emergencies*.

Chaline C. et Dubois-Maury J. (2002). "Les risques urbains", Paris, Armand Colin, 208 pp.

Chang, C.-Y. D. and H.-C. J. Hsiao (2007). *Establishing Hazards of Place Model of Vulnerability - A case of Flood in the Shijih City Taiwan*. 2nd International Conference on Urban Disaster Reduction.

Chardon, A.-C. and J.-C. Thouret (1994). "Cartographie de la Vulnérabilité d'une Population Citadine face aux risques naturels: Le Cas de Manizales." Mappemonde 4.

Collins, T. W., S. E. Grineski, et al. (2009). "Vulnerability to environmental hazards in the Ciudad Juarez (Mexico)-El Paso (USA) metropolis: A model for spatial risk assessment in transnational context." *Applied Geography* 29(3): 448-461.

Commission des droits de la personne et de la jeunesse (CDPDJ) (2008). Portrait ethnoreligieux du Québec en quelques tableaux, en ligne, URL: <http://www.cdpdj.qc.ca/Publications/Documents/religion-Quebec-statistiques.pdf> Consulté le 25 mars 2012. 28 p

Conseil de l'Europe, (2005), Rapport de la Conférence mondiale sur la prévention des catastrophes, Kobe (Hyogo, Japon), 18-22 janvier 2005, 46 pages.

Corriveau, J. (2011). "Projet Montréal décrie une transaction inequitable", *Le Devoir*, 29 avril 2011, en ligne, URL : <http://m.ledevoir.com/politique/montreal/322195/projet-montreal-decrie-une-transaction-inequitable> (consulté le 27 mars 2012)

Crabbe, P. and M. Robin, (2006). "Institutional adaptation of water resource infrastructures to climate change in Eastern Ontario". *Climatic Change*, 78(1), 103–133.

Cutter, S. L., B. J. Boruff, et al. (2003). "Social Vulnerability to Environmental Hazards." *Social Science Quarterly* 84(2).

Cutter, S. L., C. E. Emrich, et al. (2009). *Social Vulnerability to Climate Variability Hazards: A Review of the Literature*, Hazards and Vulnerability Research Institute Department of Geography University of South Carolina: 44.

Cutter, S. L. and C. Finch (2008) "Temporal and spatial changes in social vulnerability to natural hazards." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 105(7): 2301-2306.

Cutter, S. L., J. T. Mitchell, et al. (2000). "Revealing the vulnerability of people and places: A case study of Georgetown County, South Carolina." *Annals of the Association of American geographers* 90(4): 713-737.

Cutter, S. L., Burton, C. Emrich (2010) *Disaster Resilience Indicators for Benchmarking Baseline Conditions*, *Journal of Homeland Security and Emergency Management*, Vol. 7, N.1, Article 51, 22 p.

D'Ercole, R. (1994). "Les vulnérabilités des sociétés et des espaces urbanisés : concepts, typologie, modes d'analyse." *Revue de géographie alpine* 82(4): 87-96.

D'Ercole, R. and P. Metzger (2009). "La vulnérabilité territoriale : une nouvelle approche des risques en milieu urbain." *Cybergeo*.

Dauphiné A. P. D. (2007). "La résilience : un concept pour la gestion des risques." *Ann. Géo.*n° 654: 115-125.

Dessai S., & al. (2009). "Climate prediction : a limit to adaptation ? ". *Adapting to climate change: Thresholds, Values, Governance*, eds. W. N. Adger, I. Lorenzoni and K. L.O'Brien, Cambridge University Press. Elsevier Science and Technology. (sommaire accepté, article soumis).

Di Mauro C., Bouchon S. (2009). "Mieux évaluer la vulnérabilité et la résilience territoriales pour améliorer la gestion de crise ; le cas de la province de varese (Italie)" In : S. Becerra et A. Peltier, *Risques et environnement : recherches interdisciplinaires sur la vulnérabilité des sociétés*, Paris : L'Harmattan, pp.403-416.

Donze J. (2002). "Comment cartographier les risques?". Intervention lors de la journée APHG, Dijon, 4 décembre 2002, sur le thème "Les sociétés face aux risques naturels et technologiques".

- Douglas, P., S. Leigh, et al. (2000). "Disaster response: risk, vulnerability and resilience." *Disaster Prevention and Management* 9(3): 173-180.
- Drouin, A. (2008). "Élaboration d'un modèle de simulation des niveaux d'inondation à partir d'un SIG et application à un site : rivière Saint-François à Sherbrooke". *Environnement Urbain / Urban Environment*, vol. 2, p. 33-49.
- Dubos, Véronique (2001). Mémoire de maîtrise à l'Institut National des Recherches Scientifiques (INRS-EAU) ; Site consulté en 2012 :
[<http://www.bio.ulaval.ca/cirsa/Publications/memoire%20Veronique%20Dubos.pdf>].
- Dunning, C. M. et Durden, S. (2011). "Social Vulnerability Analysis Methods for Corps Planning" U.S. Army Institute for Water Resources, 105p. Publication 2011-R-07, May 2011.
- Durand, C. (2003). "L'analyse factorielle et l'analyse de fidélité : notes de cours et exemples ". Document d'enseignement. Université de Montréal. 30 pages.
<http://www.mapageweb.umontreal.ca/durandc/Enseignement/MethodesQuantitatives/FACTEUR9.pdf>
- Dwyer, A., C. Zoppou, et al. (2004). Quantifying Social Vulnerability: A methodology for identifying those at risk to natural hazards, Australian Government - Geoscience Australia Record. 14: 92.
- Eakin, H. and A. L. Luers (2006). Assessing the Vulnerability of Social-Environmental Systems. 31: 365-394.
- Ebert, A., N. Kerle, et al. (2009). "Urban social vulnerability assessment with physical proxies and spatial metrics derived from air- and spaceborne imagery and GIS data." *Natural Hazards* 48(2): 275-294.
- Eriksen, S. H. and P. M. Kelly (2007). "Developing credible vulnerability indicators for climate adaptation policy assessment." *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 12(4): 495-524.
- Estupina-Borell, V. et al., 2005, Prévion des crues éclair, Comptes Rendus Geosciences, Volume 337, Issue 13, September-October 2005, Pages 1109-1119
- Fédération des municipalités canadiennes. (2001) "Final report on Federation of Canadian Municipalities municipal infrastructure risk project: adapting to climate change". Rapport commandé par le Fonds d'action pour le changement climatique, Ressources naturelles Canada.
- Fedeski, M. and J. Gwilliam (2007). "Urban sustainability in the presence of flood and geological hazards: The development of a GIS-based vulnerability and risk assessment methodology." *Landscape and Urban Planning* 83(1): 50-61.
- Fekete, A. (2009). "Validation of a social vulnerability index in context to river-floods in Germany." *NATURAL HAZARDS AND EARTH SYSTEM SCIENCES* 9(2): 393-403.
- Fuamba, M., et al . (2008). "Pour une gestion intégrée des eaux pluviales au Québec", *Vecteur Environnement*, 41 (5) novembre 2008 : 16-24.
- Füssel , H. M. (2007) . "Vulnerability: a generally applicable conceptual framework for climate change research" , *Global Environmental Change* 17 : 155 –167.
- Gall, M. (2007). Indices of social vulnerability to natural hazards: a comparative evaluation. Doctor of Philosophy, University of South Carolina.
- Gallopin, G. C. (2006). "Linkages between vulnerability, resilience, and adaptive capacity." *Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions* 16(3): 293-303.
- Gard, O. d. R. I. d. I. Liste des Indicateurs regroupés par catégories thématiques. <http://orig.cg-gard.fr/orig/ori/tab/result>.

GIEC., (2001). "Bilan 2001 de l'évolution du climat: Troisième rapport d'évaluation, Rapport de synthèse du GIEC". Wembley, Royaume-Uni: Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. 37 p.

GIEC. (2007) "Résumé à l'intention des décideurs", dans *Climate Change 2007 : Impacts, Adaptation and Vulnerability*, contribution du Groupe de travail II au Quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden et C.E. Hanson (éd.), Cambridge University Press.

Gilles, A. (2004). *Cartographie du risque naturel dans le monde. Étude comparative entre une approche d'ordre sociale et une d'ordre économique de la vulnérabilité*.

Gleyze, J.-F. et Reghezza. M. (2007). "La vulnérabilité structurelle comme outil de compréhension des mécanismes d'endommagement". *Géocarrefour*, vol. 82/1-2, 2007

Grelot, F., 2004, *Gestion collective des inondations : Peut-on tenir compte de l'avis de la population dans la phase d'évaluation économique a priori ?*, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 406 p.

Group, T. A. C. (2005). *Climate Change Risk and Vulnerability : Promoting an efficient adaptation response in Australia*, Report to the Australian Greenhouse Office, Department of the Environment and Heritage. 159 p.

Hec-Ras, (2012). *Modèle numérique 1D de simulation des rivières*. Site consulté le 30 mars 2012 : <http://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/hecras-download.html>

Heinz Center for Science, Economics, and the Environment. (2000). *The Hidden Costs of Coastal Hazards: Implications for Risk Assessment and Mitigation*. Covello, Cal.: Island Press.

Heniche, M., Secrétan, Y., Boudreau P. et Leclerc, M. (2000) A two-dimensional finite element drying-wetting shallow water model for rivers and estuaries, *Advances in Water resources* 23 [359-372].

Hinkel J. (2011) « Indicators of vulnerability and adaptive capacity » Towards a clarification of the science-policy interface, *Global Environmental Change*, N. 21, p.198-208

Holand, I. S., P. Lujala, et al. (2011). "Social vulnerability assessment for Norway: A quantitative approach." *Norsk Geografisk Tidsskrift-Norwegian Journal of Geography* 65(1): 1-17.

Horritt M.S. et Bates P.D. (2002). Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation. *Journal of Hydrology*, 268(1), p. 87-99.

Ivey, J.L., J. Smithers, R.C. de Loe and R.D. Kreuzwiser, (2004). "Community capacity for adaptation to climate-induced water shortages: linking institutional complexity and local actors". *Environ. Manage.*, 33(1), 36-47.

Katirai, D. M. S. a. M. (2006). *Indicator Issues and Proposed Framework for a Disaster Preparedness Index (DPi)*, Center for Hazards Research and Policy Development, University of Louisville.

Kelly, P. M. and W. N. Adger (2000). "Theory and practice in assessing vulnerability to climate change and facilitating adaptation." *Climatic Change* 47(4): 325-352.

Keskitalo, E.C., H. Dannevig, G. Hovelsrud, J. West, Swartling, A. (2011) Adaptive capacity déterminants in developed states : examples from the Nordic countries and Russia, *Regional Environmental Change*, N. 11, p.579-592

King County (2010). *Climate Change Impacts on River Flooding : State-of-the- Science and Evidence of Local Impacts*. Prepared by Curtis DeGasperi, Water and Land Resources Division, Seattle, Washington, USA.

King, D. and C. MacGregor (2000). "Using Social Indicators to Measure Community Vulnerability to Natural Hazards." *Australian Journal of Emergency Management*, The 15(3): 52-57.

- Koivumaki, L., P. Alho, et al. (2010). "Uncertainties in flood risk mapping: a case study on estimating building damages for a river flood in Finland." *Journal of Flood Risk Management* 3(2): 166-183.
- Kubal, C., D. Haase, et al. (2009). "Integrated urban flood risk assessment - adapting a multicriteria approach to a city." *Natural Hazards and Earth System Sciences* 9(6): 1881-1895.
- Kumpulainen, S. (2006). *Vulnerability Concepts in Hazard and Risk Assessment. Natural and Technological Hazards and Risks Affecting the Spatial Development of European Regions*. P. Schmidt-Thomé.
- Lalande c. Québec (Procureur général) (1991). Juge Roland Durand, Cour Supérieure, Montréal. Références : AZ-91021309; J.E. 91-894; [1991] R.J.Q. 1629 ; [1991] R.D.I. 549
- Larrue, C et Camphuis, N.-G. (2010), *MéthodoLoire – Développement d'une méthodologie de mise en perspective des dommages économiques à l'échelle du bassin fluvial de la Loire – Rapport final*, 182 p. http://www.plan-loire.fr/fileadmin/pce/PF_PreventionDesInondations/DemarcheIndustrielle/Docs/Portrait_Methodoloire.pdf
- Leclerc, M., P. Boudreau, N. Roy, Y. Secretan, S. El Adlouni, T. Ouarda, D. Chaumont, I. Falardeau et F. Morneau (2006). *Contribution à la recherche d'une solution intégrée au risque d'inondation à Châteauguay. Pour le compte de la Ville de Châteauguay, en collaboration avec le ministère de la Sécurité publique. Rapport de recherche #R841*. 280 pages (5 annexes). Avril.
- Leichenko, R. M. and K. L. O'Brien (2002). "The dynamics of rural vulnerability to global change: The case of Southern Africa." *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 7(1): 1-18.
- Lemmen, D.S. et F.J. Warren, éditeurs (2004). "Impacts et adaptation liés aux changements climatiques: perspective canadienne"; Gouvernement du Canada, Ottawa, ON, 174 p.
- Lemmen, D.S., F.J. Warren and J. Lacroix. (2008). "Synthesis in From Impacts to Adaptation: Canada in a Changing Climate 2007", edited by D.S. Lemmen, F.J. Warren, J. Lacroix and E. Bush. Government of Canada, Ottawa. p. 1-20.
- Leone F. et Vinet F. . (2006). "La vulnérabilité des sociétés et des territoires face aux menaces naturelles. Analyses géographiques". *Géorisques*, n°1, coll. de l'Equipe d'Accueil GESTER, Ed. Publications de l'Université Paul-Valéry-Montpellier 3, 141 p.
- Lindley, S. J., J. F. Handley, et al. (2006). "Adaptation Strategies for Climate Change in the Urban Environment: Assessing Climate Change Related Risk in UK Urban Areas." *Journal of Risk Research* 9(5): 543 - 568.
- Lisflood (2012). *Modèle numérique 2D de simulation des rivières*. Site consulté le 30 mars 2012 : <http://floods.jrc.ec.europa.eu/lisflood-model>
- Mailhot, A., Duchesne, S., Caya, D. et Talbot, G. (2007), «Assessment of Future Change in Intensity-Duration-Frequency (IDF) Curves for Southern Quebec Using the Canadian Regional Climate Model (CRCM)», *Journal of Hydrology*, vol. 347, nos 1-2, p. 197-210.
- Mailhot A., Kingumbi A., Talbot G. et Poulin A. (2010). *Future changes in intensity and seasonal pattern of occurrence of daily and multi-day annual maximum precipitation over Canada* . *J. Hydrol.*, 388 (3-4): 173-185.
- Manyena S, B., 2006, "The concept of resilience revisited", *Disaster*, 30 (4).
- Marant, Louis (2009). *Comparaison entre la modélisation de rivière (1D) unidimensionnelle et bidimensionnelle (2D) en vue d'une modélisation de la Basse Vallée de la Doller, École Nationale du Génie de l' Eau et de l'Environnement de Strasbourg*
- Maret I., Cadoul T., (2008), "Résilience et reconstruction durable: que nous apprend La Nouvelle-Orléans?" *Annales de Géographie* n° 663, pp 104-124.

Maret I., Goeury R. (2008). "La Nouvelle-Orléans et l'eau : Un urbanisme à haut-risque. " *Environnement urbain / Urban Environment* n°2: pp a107 - a122. http://www.vrm.ca/cyber_pub.asp?vol=2008

Marsan, Jean-Claude (1976) Montréal en évolution. Historique du développement de l'architecture et de l'environnement montréalais, Montréal, Fides, 1974, 423 p.; 2e édition

Mendes, J. M. D. (2009). "Social vulnerability indexes as planning tools: beyond the preparedness paradigm." *Journal of Risk Research* 12(1): 43-58.

Mercier, Guy (2006) La norme pavillonnaire : mythologie contemporaine, idéal urbain, pacte social, ordre industriel, moralité capitaliste et idéalisme démocratique, Cahiers de géographie du Québec, vol. 50, n° 140, 2006, p. 207-239

Meyer, V., S. Scheuer, et al. (2009). "A multicriteria approach for flood risk mapping exemplified at the Mulde river, Germany." *Natural Hazards* 48(1): 17-39.

MicroDerm, (2012a). Software Download. Site consulté en 2012: [<http://telecharger.caloga.com/logiciel-windows-graphisme-multimedia-divers-microdem.html>].

MicroDem, (2012b). Software Download. Site consulté en 2012: <http://www.usna.edu/Users/oceano/pguth/website/microdem/microdemdown.htm>

Morrow BH. (1999). Identifying and mapping community vulnerability. *Disasters* 23(1)1–18

Naess, L.O., G. Bang, S. Eriksen and J. Veatne, (2005). "Institutional adaptation to climate change: flood responses at the municipal level in Norway". *Global Environ. Chang.*, 15, 125–138.

Networks, I.-I. R. I. (2005). Disaster Reduction and the human cost of disaster. IRIN Web special, United Nations - Integrated Regional Information Networks.

O'Keefe, P., K. Westage and B. Wisner (1976), Taking the naturalness out of natural disasters., *Nature* 260 260:566-567.

Olmos, S. (2001). Vulnerability and Adaptation to Climate Change: Concepts, Issues, Assessment Methods, *Climate Change Knowledge Network*: 20.

Ouranos (2004). S'adapter aux changements climatiques, 91 pp.

Ouranos, (2010) "Élaborer un plan d'adaptation aux changements climatiques. Guide destiné au milieu municipal québécois", Montréal (Québec), 48 p.

Pageon, J. (2008). "Méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité d'une MRC face aux ressources essentielles. Mémoire – École Polytechnique de Montréal. 107 p.

Pampalon, R. and G. Raymond (2003). Indice de défavorisation matérielle et sociale : son application au secteur de la santé et du bien-être, *Santé, société et solidarité*. 2: 191-208.

Patt, A., R. Klein, A. de la Vega-Leinert (2005) Taking the uncertainty in climate-change vulnerability assessment seriously, *C.R. Geoscience*, N. 337, p. 411-424

Pelling, M. (1997). "What determines vulnerability to floods: A case study in Georgetown, Guyana" *Environment and Urbanization*, 9(1), 203-226.

Pelling M., (2004). "Visions of Risk: A Review of International Indicators of Disaster Risk and its Management". UNDP—Bureau for Crisis Prevention and Recovery (BRCP), Geneva.

Philibert, M. D., R. Pampalon, et al. (2007). "Material and social deprivation and health and social services utilisation in Quebec: A local-scale evaluation system." *Social Science and Medicine* 64(8): 1651-1664.

Pigeon, P. (2002). "Réflexions sur les notions et les méthodes en géographie des risques dits naturels." *Annales de Géographie* 111(627): 452-470.

Pigeon, P. (2007). "Les Plans de Prévention des Risques (PPR) : essai d'interprétation géographique." *Géocarrefour* 82(1-2): 27-34.

Plate, E. J. (2002). "Flood risk and flood management." *Journal of Hydrology* 267(1): 2-11.

PNUD, (2004). "La réduction des risques de catastrophe : un défi pour le développement", PNUD, 159 p.

Polisky, C., R. Neff, B. Yarnal (2007) Building comparable global change vulnerability assessments : The vulnerability scoping diagram, *Global Environmental Change*, N. 17, p.472-485.

Posey, J. (2009). "The determinants of vulnerability and adaptive capacity at the municipal level: Evidence from floodplain management programs in the United States." *Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions* 19(4): 482-493.

Projet Montréal (2011) Petite histoire d'un échange de terrains, Site consulté le 13 mars 2012 : http://www.projetmontreal.org/files/documents/2011_04_28_projetmontreal_document_1304009228_fr.pdf

Provitolo D., 2003, « Modélisation et simulation de catastrophe urbaine : le couplage de l'aléa et de la vulnérabilité » in Cd Rom des Actes du colloque SIRNAT 2003, Orléans.

Provitolo D., 2003, « Modélisation et simulation du risque d'inondation en milieu urbain méditerranéen » in CD Rom des Actes des 5ièmes rencontres de THEOQUANT 2001, Besançon.

Québec. CEHQ (2006). Villes de Charlemagne, de Laval, de Montréal, de Repentigny et de Terrebonne, Révision des cotes de crues de la Rivière-des-Prairies. Centre d'Expertise Hydrique du Québec, Direction de l'expertise et de la gestion des barrages publics, CEHQ 13-002, Québec, Canada, 98 pp.

Québec. CEHQ (2009). Détermination des cotes de crues de la Rivière-des-Prairies. Centre d'Expertise Hydrique du Québec

Québec. CEHQ-a (2010) Répertoire des barrages, Barrages sur la rivière des Outaouais, Centre d'expertise hydrique du Québec, [http://www.cehq.gouv.qc.ca/barrages/ListeBarrages.asp?Tri=No] Consulté le 2 novembre 2010.

Québec. MDDEP. (1987). "Politique de protection des rives du littoral et des plaines inondables. Québec"

Québec. MRNF, (1997). Données numériques d'élévation du Canada, niveau 1. Direction générale de l'information géographique, Québec, Canada.

Québec, MSP, (2010). Communications téléphoniques avec Jacques Brouillette, conseiller en aménagement, Ministère de la Sécurité publique, direction régionale de Montréal, Laval, Lanaudière et Laurentides. Contacté le 3 et le 9 décembre 2010.

Reghezza M., (2006a). "Réflexions sur la vulnérabilité métropolitaine : le cas de la métropole francilienne face au risque de crue centennale", Thèse de doctorat de géographie, Université Paris X Nanterre.

Reghezza M., (2006b). "La vulnérabilité : un concept problématique" dans Leone F. et Vinet F. . (2006). "La vulnérabilité des sociétés et des territoires face aux menaces naturelles. Analyses géographiques". *Géorisques*, n°1, coll. de l'Equipe d'Accueil GESTER, Ed. Publications de l'Université Paul-Valéry-Montpellier 3, 141 p.

Robert, B., S. Forget, J. Rousselle (2003) The Effectiveness of Flood Damage Reduction Measures in the Montreal Region, *Natural Hazards*, N. 28, p. 367-385

Robin M., (ed) 2002 – Télédétection, des satellites aux SIG. Fac Géographie. Paris, éditions Nathan.

- Saint-Laurent, D. et M. Hahni (2008). "Crues et inondations majeures des villes de l'Estrie : variations climatiques et modifications anthropiques (Québec, Canada)." *Environnement urbain*(2): a.50-a72.
- Saint-Laurent, D., et Lavoie, L., 2009, Récurrence des inondations et édification des plaines alluviales des bassins du centre-sud du Québec (Canada), *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, Issue : 22(1), pp. 51-68
- Schmidlein, M. C., R. C. Deutsch, et al. (2008). "A sensitivity analysis of the Social Vulnerability Index." *Risk Analysis* 28(4): 1099-1114.
- Secretan, Yves, Y. Roy et autres (2000). *Modeleur*, version 1.0a07, guide d'utilisation, rapport INRS-Eau R482-G3F, 267p.
- Sherrieb, K., F. Norris, S. Galea (2010), *Measuring Capacities for Community Resilience*, Social Indicators Research, N.99, p. 227-247
- Simonovic, S.P., Prodanovic, P. et Helsten, M. (2007). *Inverse Modelling of Climatic Change Impacts in the Upper Thames River Basin*, 18th Canadian Hydrotechnical Conference, Challenges for Water Resources Engineering in a Changing World Winnipeg, Manitoba, August 22 – 24, 2007 / 22 – 24 août 2007, Canada
- Simpson, D. M. et M. Katirai (2006). « Indicator Issues and Proposed Framework for a Disaster Preparedness Index (DPI) », Center for Hazards Research and Policy Development, University of Louisville.
- Smit, B., O. Pilifosova (2003) *Adaptation to Climate Change in the Context of Sustainable Development and Equity*, p.877-912
- Smit, B. and J. Wandel (2006). "Adaptation, adaptive capacity and vulnerability." *Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions* 16(3): 282-292.
- Soane, E., I. Schubert, et al. (2010). "Flood perception and mitigation: the role of severity, agency, and experience in the purchase of flood protection, and the communication of flood information." *ENVIRONMENT AND PLANNING A* 42(12): 3023-3038.
- Tate, E., S. L. Cutter, et al. (2010). "Integrated multihazard mapping." *ENVIRONMENT AND PLANNING B-PLANNING & DESIGN* 37(4): 646-663.
- Telemac (2012). *Modèle numérique 2D de simulation des rivières*. Site consulté le 30 mars 2012 : <http://www.opentelemac.org/>
- Theys, J. (1987) "La société vulnérable" dans Jean Louis Fabiani et Jacques Theys (dir.) *La société vulnérable. Évaluer et maîtriser les risques*, Presses de l'École Normale Supérieure, pp. 3-35.
- Thouret J.C. et Chardon A.C. (1994). "Cartographie de la vulnérabilité d'une population citadine face aux risques naturels : le cas de Manzales, *Mappemonde*, 4.
- Thouret, J.-C. and R. D'Ercole (1996). "Vulnérabilité aux risques naturels en milieu urbain : effets, facteurs et réponses sociales." *Cahiers des Sciences Humaines* 32(2): 407-422.
- Tran, P., R. Shaw, et al. (2009). "GIS and local knowledge in disaster management: a case study of flood risk mapping in Viet Nam." *Disasters* 33(1): 152-169.
- Trégouet, B. d. (2011). *Guide d'Accompagnement du Territoire pour l'analyse de sa vulnérabilité socio-économique au changement climatique*, Commissariat général au développement durable • Service de l'observation et des statistiques.
- Turner, B.L., Kasperson, R.E., Matson, P., McCarthy, J.J., Corell, R.W., Christensen, L., Eckley, N., Kasperson, J.X., Luers, A., Martello, M.L., Polsky, C., Pulsipher, A. and Schiller, A. (2003) , "A framework for vulnerability analysis in sustainability science", *Proceedings of the National Academy of Sciences, United States of America* 100, 8074–8079.

Twigg, C. B. a. J. (2007). Tools for Mainstreaming Disaster Risk Reduction: Guidance Notes for Development Organisations. Guidance Note 9, Provention Consortium - Tools for Mainstreaming Disaster Risk Reduction.

Twigg, J. (2007). Characteristics of a Disaster-resilient community. A guidance note, DFID Disaster risk reduction interagency coordination group.

US ACE (2001). HEC Ras (River Analysis system): Hydraulic Reference Manual, US Army of Civil Engineers, Davis, California.

Van der Veen, A. and C. Logtmeijer (2005). "Economic hotspots: Visualizing vulnerability to flooding." *Natural Hazards* 36(1-2): 65-80.

Veyret Y, (2004), "Géographie des risques naturels en France. De l'aléa à la gestion". Paris, Hatier, 251 pages.

Villagran De Leon, J. C. (2006). Vulnerability: A Conceptual and Methodological Review. C. Studies of the University : Research, Education - Publication Series of UNU-EHS, United Nations University. Institute for Environment and Human Security. 4.

Ville de Montréal. En ligne (a). « La crue des eaux. La sécurité civile à Montréal ». Site internet consulté le 23 février 2012 :

http://ville.montreal.qc.ca/portal/page?_pageid=7637,82391659&_dad=portal&_schema=PORTAL

Ville de Montréal. En Ligne. «Un nouveau parc-nature dans l'ouest de l'île : le parc-nature des rapides du Cheval Blanc » Site internet consulté le 13 mars 2012 :

http://ville.montreal.qc.ca/portal/page?_pageid=4837,52859560&_dad=portal&_schema=PORTAL

Vincent, K. (2004). Creating an index of social vulnerability to climate change for Africa, Tyndall Centre for Climate Change Research.

Vincent, K. (2007). "Uncertainty in adaptive capacity and the importance of scale." *Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions* 17(1): 12-24.

Walker, G. and K. Burningham (2011). "Flood risk, vulnerability and environmental justice: Evidence and evaluation of inequality in a UK context." *Critical Social Policy* 31(2): 216-240.

Wheater, H. and E. Evans (2009). "Land use, water management and future flood risk." *Land Use Policy* 26: S251-S264.

White, G.F. and J.E. Haas (1975). *Assessment of Research on Natural Hazards*. Cambridge, MA: MIT Press.

Wisner, B., Blaikie, P., Cannon, T., Davis, I. (2003) "At Risk: Natural Hazards, People's Vulnerability and Disasters". Second edition, London, Routledge.

Wood, N. J., C. G. Burton, et al. (2010). "Community variations in social vulnerability to Cascadia-related tsunamis in the US Pacific Northwest." *Natural Hazards* 52(2): 369-389.

Wu, S. Y., B. Yarnal, et al. (2002). "Vulnerability of coastal communities to sea-level rise: a case study of Cape May County, New Jersey, USA." *Climate Research* 22(3): 255-270.

Yeletaysi, S., D. Ozceylan, et al. (2009, June, 9th - 11th). A FRAMEWORK TO INTEGRATE SOCIAL VULNERABILITY INTO CATASTROPHIC NATURAL DISASTER PREPAREDNESS. TIEMS, Istanbul.

Yohe, G. and R. S. J. Tol (2002). "Indicators for social and economic coping capacity - moving toward a working definition of adaptive capacity." *Global Environmental Change-Human and Policy Dimensions* 12(1): 25-40.

Annexes

Annexe A - Aperçu des résultats obtenus avec HEC-RAS

Reach	River Sta	Profile	Q Total (m3/s)	W.S. Elev (m)
amont	23	QT 2 ans	1210	23.13
amont	23	P1: Q2 ans+234 m	1444	23.35
amont	23	P2: Q2 ans+468 m	1678	23.55
amont	23	: Q2 ans+702m3/s	1912	23.78
amont	23	P5: QT100ans+468	2382	24.41
amont	23	Q T100 ans	1914	24.06
amont	23	Q T100 ans+1000	2914	24.79
amont	23	Q T100 ans+1500	3414	25.09
amont	23	Q T100 ans+2000	3914	25.38
amont	21.0625	QT 2 ans	1210	23.09
amont	21.0625	P1: Q2 ans+234 m	1444	23.3
amont	21.0625	P2: Q2 ans+468 m	1678	23.5
amont	21.0625	: Q2 ans+702m3/s	1912	23.69
amont	21.0625	P5: QT100ans+468	2382	24.34
amont	21.0625	Q T100 ans	1914	23.99
amont	21.0625	Q T100 ans+1000	2914	24.7
amont	21.0625	Q T100 ans+1500	3414	25.02
amont	21.0625	Q T100 ans+2000	3914	25.29
amont	19.9	QT 2 ans	1210	23.07
amont	19.9	P1: Q2 ans+234 m	1444	23.27
amont	19.9	P2: Q2 ans+468 m	1678	23.47
amont	19.9	: Q2 ans+702m3/s	1912	23.66
amont	19.9	P5: QT100ans+468	2382	24.31
amont	19.9	Q T100 ans	1914	23.97
amont	19.9	Q T100 ans+1000	2914	24.66
amont	19.9	Q T100 ans+1500	3414	24.97
amont	19.9	Q T100 ans+2000	3914	25.25
amont	18.95	QT 2 ans	1210	23.04
amont	18.95	P1: Q2 ans+234 m	1444	23.24
amont	18.95	P2: Q2 ans+468 m	1678	23.43
amont	18.95	: Q2 ans+702m3/s	1912	23.62

amont	18.95	P5: QT100ans+468	2382	24.27
amont	18.95	Q T100 ans	1914	23.94
amont	18.95	Q T100 ans+1000	2914	24.62
amont	18.95	Q T100 ans+1500	3414	24.92
amont	18.95	Q T100 ans+2000	3914	25.19
amont	18.7125	QT 2 ans	1210	23.02
amont	18.7125	P1: Q2 ans+234 m	1444	23.22
amont	18.7125	P2: Q2 ans+468 m	1678	23.41
amont	18.7125	: Q2 ans+702m3/s	1912	23.59
amont	18.7125	P5: QT100ans+468	2382	24.24
amont	18.7125	Q T100 ans	1914	23.92
amont	18.7125	Q T100 ans+1000	2914	24.59
amont	18.7125	Q T100 ans+1500	3414	24.89
amont	18.7125	Q T100 ans+2000	3914	25.15
amont	18.7124		Bridge	
amont	18.475	QT 2 ans	1210	23.02
amont	18.475	P1: Q2 ans+234 m	1444	23.21
amont	18.475	P2: Q2 ans+468 m	1678	23.4
amont	18.475	: Q2 ans+702m3/s	1912	23.58
amont	18.475	P5: QT100ans+468	2382	24.23
amont	18.475	Q T100 ans	1914	23.91
amont	18.475	Q T100 ans+1000	2914	24.58
amont	18.475	Q T100 ans+1500	3414	24.88
amont	18.475	Q T100 ans+2000	3914	25.14
amont	18	QT 2 ans	1210	22.99
amont	18	P1: Q2 ans+234 m	1444	23.18
amont	18	P2: Q2 ans+468 m	1678	23.36
amont	18	: Q2 ans+702m3/s	1912	23.54
amont	18	P5: QT100ans+468	2382	24.2
amont	18	Q T100 ans	1914	23.88
amont	18	Q T100 ans+1000	2914	24.53
amont	18	Q T100 ans+1500	3414	24.83
amont	18	Q T100 ans+2000	3914	25.08
centre	17.2	QT 2 ans	2327	22.58
centre	17.2	P1: Q2 ans+234 m	2561	22.75

centre	17.2	P2: Q2 ans+468 m	2795	22.92
centre	17.2	: Q2 ans+702m3/s	3029	23.07
centre	17.2	P5: QT100ans+468	4012	23.76
centre	17.2	Q T100 ans	3544	23.46
centre	17.2	Q T100 ans+1000	4544	24.09
centre	17.2	Q T100 ans+1500	5044	24.37
centre	17.2	Q T100 ans+2000	5544	24.61
centre	14	QT 2 ans	2327	21.75
centre	14	P1: Q2 ans+234 m	2561	21.92
centre	14	P2: Q2 ans+468 m	2795	22.08
centre	14	: Q2 ans+702m3/s	3029	22.24
centre	14	P5: QT100ans+468	4012	23.04
centre	14	Q T100 ans	3544	22.72
centre	14	Q T100 ans+1000	4544	23.39
centre	14	Q T100 ans+1500	5044	23.71
centre	14	Q T100 ans+2000	5544	23.94
centre	13.6	QT 2 ans	2327	21.73
centre	13.6	P1: Q2 ans+234 m	2561	21.9
centre	13.6	P2: Q2 ans+468 m	2795	22.06
centre	13.6	: Q2 ans+702m3/s	3029	22.22
centre	13.6	P5: QT100ans+468	4012	23.03
centre	13.6	Q T100 ans	3544	22.7
centre	13.6	Q T100 ans+1000	4544	23.38
centre	13.6	Q T100 ans+1500	5044	23.7
centre	13.6	Q T100 ans+2000	5544	23.93
centre	13.2	QT 2 ans	2327	21.69
centre	13.2	P1: Q2 ans+234 m	2561	21.86
centre	13.2	P2: Q2 ans+468 m	2795	22.02
centre	13.2	: Q2 ans+702m3/s	3029	22.18
centre	13.2	P5: QT100ans+468	4012	22.98
centre	13.2	Q T100 ans	3544	22.66
centre	13.2	Q T100 ans+1000	4544	23.33
centre	13.2	Q T100 ans+1500	5044	23.64
centre	13.2	Q T100 ans+2000	5544	23.87
centre	12.4	QT 2 ans	2327	21.63
centre	12.4	P1: Q2 ans+234 m	2561	21.79

centre	12.4	P2: Q2 ans+468 m	2795	21.95
centre	12.4	: Q2 ans+702m3/s	3029	22.1
centre	12.4	P5: QT100ans+468	4012	22.91
centre	12.4	Q T100 ans	3544	22.59
centre	12.4	Q T100 ans+1000	4544	23.26
centre	12.4	Q T100 ans+1500	5044	23.57
centre	12.4	Q T100 ans+2000	5544	23.79
centre	12	QT 2 ans	2327	21.57
centre	12	P1: Q2 ans+234 m	2561	21.73
centre	12	P2: Q2 ans+468 m	2795	21.88
centre	12	: Q2 ans+702m3/s	3029	22.03
centre	12	P5: QT100ans+468	4012	22.84
centre	12	Q T100 ans	3544	22.52
centre	12	Q T100 ans+1000	4544	23.19
centre	12	Q T100 ans+1500	5044	23.5
centre	12	Q T100 ans+2000	5544	23.72
centre	11.99		Bridge	
centre	11.475	QT 2 ans	2327	21.22
centre	11.475	P1: Q2 ans+234 m	2561	21.38
centre	11.475	P2: Q2 ans+468 m	2795	21.53
centre	11.475	: Q2 ans+702m3/s	3029	21.68
centre	11.475	P5: QT100ans+468	4012	22.26
centre	11.475	Q T100 ans	3544	21.99
centre	11.475	Q T100 ans+1000	4544	22.53
centre	11.475	Q T100 ans+1500	5044	22.77
centre	11.475	Q T100 ans+2000	5544	23
centre	8.85	QT 2 ans	2327	20.35
centre	8.85	P1: Q2 ans+234 m	2561	20.51
centre	8.85	P2: Q2 ans+468 m	2795	20.65
centre	8.85	: Q2 ans+702m3/s	3029	20.8
centre	8.85	P5: QT100ans+468	4012	21.37
centre	8.85	Q T100 ans	3544	21.1
centre	8.85	Q T100 ans+1000	4544	21.61
centre	8.85	Q T100 ans+1500	5044	21.83
centre	8.85	Q T100 ans+2000	5544	22.02

centre	8.325	QT 2 ans	2327	20.13
centre	8.325	P1: Q2 ans+234 m	2561	20.28
centre	8.325	P2: Q2 ans+468 m	2795	20.42
centre	8.325	: Q2 ans+702m3/s	3029	20.56
centre	8.325	P5: QT100ans+468	4012	21.13
centre	8.325	Q T100 ans	3544	20.86
centre	8.325	Q T100 ans+1000	4544	21.35
centre	8.325	Q T100 ans+1500	5044	21.57
centre	8.325	Q T100 ans+2000	5544	21.75
centre	7.8	QT 2 ans	2327	19.41
centre	7.8	P1: Q2 ans+234 m	2561	19.51
centre	7.8	P2: Q2 ans+468 m	2795	19.6
centre	7.8	: Q2 ans+702m3/s	3029	19.68
centre	7.8	P5: QT100ans+468	4012	20.12
centre	7.8	Q T100 ans	3544	19.86
centre	7.8	Q T100 ans+1000	4544	20.25
centre	7.8	Q T100 ans+1500	5044	20.29
centre	7.8	Q T100 ans+2000	5544	20.45
centre	7.3	QT 2 ans	2327	18.06
centre	7.3	P1: Q2 ans+234 m	2561	18.14
centre	7.3	P2: Q2 ans+468 m	2795	18.2
centre	7.3	: Q2 ans+702m3/s	3029	18.26
centre	7.3	P5: QT100ans+468	4012	18.52
centre	7.3	Q T100 ans	3544	18.4
centre	7.3	Q T100 ans+1000	4544	18.65
centre	7.3	Q T100 ans+1500	5044	19.03
centre	7.3	Q T100 ans+2000	5544	19.42
centre	6.8	QT 2 ans	2327	17.29
centre	6.8	P1: Q2 ans+234 m	2561	17.5
centre	6.8	P2: Q2 ans+468 m	2795	17.78
centre	6.8	: Q2 ans+702m3/s	3029	18.03
centre	6.8	P5: QT100ans+468	4012	18.58
centre	6.8	Q T100 ans	3544	18.28
centre	6.8	Q T100 ans+1000	4544	18.9
centre	6.8	Q T100 ans+1500	5044	19.24
centre	6.8	Q T100 ans+2000	5544	19.56

centre	6.79		Inl Struct	
centre	5.9	QT 2 ans	2327	12.95
centre	5.9	P1: Q2 ans+234 m	2561	12.2
centre	5.9	P2: Q2 ans+468 m	2795	12.32
centre	5.9	: Q2 ans+702m3/s	3029	12.43
centre	5.9	P5: QT100ans+468	4012	13.79
centre	5.9	Q T100 ans	3544	13.36
centre	5.9	Q T100 ans+1000	4544	15.14
centre	5.9	Q T100 ans+1500	5044	15.44
centre	5.9	Q T100 ans+2000	5544	15.74
centre	5.6*	QT 2 ans	2327	10.11
centre	5.6*	P1: Q2 ans+234 m	2561	10.81
centre	5.6*	P2: Q2 ans+468 m	2795	11
centre	5.6*	: Q2 ans+702m3/s	3029	11.2
centre	5.6*	P5: QT100ans+468	4012	13.53
centre	5.6*	Q T100 ans	3544	13.08
centre	5.6*	Q T100 ans+1000	4544	15
centre	5.6*	Q T100 ans+1500	5044	15.3
centre	5.6*	Q T100 ans+2000	5544	15.58
centre	5.59		Bridge	
centre	5.3*	QT 2 ans	2327	11.02
centre	5.3*	P1: Q2 ans+234 m	2561	13.44
centre	5.3*	P2: Q2 ans+468 m	2795	13.61
centre	5.3*	: Q2 ans+702m3/s	3029	13.78
centre	5.3*	P5: QT100ans+468	4012	14.42
centre	5.3*	Q T100 ans	3544	14.13
centre	5.3*	Q T100 ans+1000	4544	14.73
centre	5.3*	Q T100 ans+1500	5044	15.01
centre	5.3*	Q T100 ans+2000	5544	15.27
centre	5	QT 2 ans	2327	11.29
centre	5	P1: Q2 ans+234 m	2561	13.06
centre	5	P2: Q2 ans+468 m	2795	13.21
centre	5	: Q2 ans+702m3/s	3029	13.36
centre	5	P5: QT100ans+468	4012	13.91
centre	5	Q T100 ans	3544	13.66

centre	5	Q T100 ans+1000	4544	14.18
centre	5	Q T100 ans+1500	5044	14.41
centre	5	Q T100 ans+2000	5544	14.63
centre	4.625	QT 2 ans	2327	11.85
centre	4.625	P1: Q2 ans+234 m	2561	12.23
centre	4.625	P2: Q2 ans+468 m	2795	12.35
centre	4.625	: Q2 ans+702m3/s	3029	12.47
centre	4.625	P5: QT100ans+468	4012	12.94
centre	4.625	Q T100 ans	3544	12.73
centre	4.625	Q T100 ans+1000	4544	13.17
centre	4.625	Q T100 ans+1500	5044	13.37
centre	4.625	Q T100 ans+2000	5544	13.56
centre	4.25	QT 2 ans	2327	11.28
centre	4.25	P1: Q2 ans+234 m	2561	11.98
centre	4.25	P2: Q2 ans+468 m	2795	12.1
centre	4.25	: Q2 ans+702m3/s	3029	12.22
centre	4.25	P5: QT100ans+468	4012	12.7
centre	4.25	Q T100 ans	3544	12.48
centre	4.25	Q T100 ans+1000	4544	12.94
centre	4.25	Q T100 ans+1500	5044	13.15
centre	4.25	Q T100 ans+2000	5544	13.36
centre	3.875	QT 2 ans	2327	10.88
centre	3.875	P1: Q2 ans+234 m	2561	11.85
centre	3.875	P2: Q2 ans+468 m	2795	11.98
centre	3.875	: Q2 ans+702m3/s	3029	12.1
centre	3.875	P5: QT100ans+468	4012	12.57
centre	3.875	Q T100 ans	3544	12.35
centre	3.875	Q T100 ans+1000	4544	12.81
centre	3.875	Q T100 ans+1500	5044	13.02
centre	3.875	Q T100 ans+2000	5544	13.23
centre	3.5	QT 2 ans	2327	10.5
centre	3.5	P1: Q2 ans+234 m	2561	11.79
centre	3.5	P2: Q2 ans+468 m	2795	11.91
centre	3.5	: Q2 ans+702m3/s	3029	12.03
centre	3.5	P5: QT100ans+468	4012	12.5
centre	3.5	Q T100 ans	3544	12.28

centre	3.5	Q T100 ans+1000	4544	12.74
centre	3.5	Q T100 ans+1500	5044	12.96
centre	3.5	Q T100 ans+2000	5544	13.17
centre	3.49		Bridge	
centre	3.15	QT 2 ans	2327	10.42
centre	3.15	P1: Q2 ans+234 m	2561	10.54
centre	3.15	P2: Q2 ans+468 m	2795	10.67
centre	3.15	: Q2 ans+702m3/s	3029	10.79
centre	3.15	P5: QT100ans+468	4012	11.31
centre	3.15	Q T100 ans	3544	11.08
centre	3.15	Q T100 ans+1000	4544	11.58
centre	3.15	Q T100 ans+1500	5044	11.79
centre	3.15	Q T100 ans+2000	5544	12.01
centre	2.8	QT 2 ans	2327	9.86
centre	2.8	P1: Q2 ans+234 m	2561	9.99
centre	2.8	P2: Q2 ans+468 m	2795	10.14
centre	2.8	: Q2 ans+702m3/s	3029	10.27
centre	2.8	P5: QT100ans+468	4012	10.88
centre	2.8	Q T100 ans	3544	10.64
centre	2.8	Q T100 ans+1000	4544	11.14
centre	2.8	Q T100 ans+1500	5044	11.38
centre	2.8	Q T100 ans+2000	5544	11.62
centre	2.56	QT 2 ans	2327	9.75
centre	2.56	P1: Q2 ans+234 m	2561	9.89
centre	2.56	P2: Q2 ans+468 m	2795	10.03
centre	2.56	: Q2 ans+702m3/s	3029	10.17
centre	2.56	P5: QT100ans+468	4012	10.79
centre	2.56	Q T100 ans	3544	10.54
centre	2.56	Q T100 ans+1000	4544	11.05
centre	2.56	Q T100 ans+1500	5044	11.28
centre	2.56	Q T100 ans+2000	5544	11.52
centre	2.32	QT 2 ans	2327	9.54
centre	2.32	P1: Q2 ans+234 m	2561	9.68
centre	2.32	P2: Q2 ans+468 m	2795	9.81
centre	2.32	: Q2 ans+702m3/s	3029	9.95

centre	2.32	P5: QT100ans+468	4012	10.6
centre	2.32	Q T100 ans	3544	10.35
centre	2.32	Q T100 ans+1000	4544	10.87
centre	2.32	Q T100 ans+1500	5044	11.11
centre	2.32	Q T100 ans+2000	5544	11.36
centre	2.319		Bridge	
centre	1.84	QT 2 ans	2327	9.18
centre	1.84	P1: Q2 ans+234 m	2561	9.31
centre	1.84	P2: Q2 ans+468 m	2795	9.45
centre	1.84	: Q2 ans+702m3/s	3029	9.59
centre	1.84	P5: QT100ans+468	4012	10.29
centre	1.84	Q T100 ans	3544	10.04
centre	1.84	Q T100 ans+1000	4544	10.56
centre	1.84	Q T100 ans+1500	5044	10.8
centre	1.84	Q T100 ans+2000	5544	11.04
centre	1.6	QT 2 ans	2327	9.04
centre	1.6	P1: Q2 ans+234 m	2561	9.18
centre	1.6	P2: Q2 ans+468 m	2795	9.32
centre	1.6	: Q2 ans+702m3/s	3029	9.47
centre	1.6	P5: QT100ans+468	4012	10.21
centre	1.6	Q T100 ans	3544	9.95
centre	1.6	Q T100 ans+1000	4544	10.49
centre	1.6	Q T100 ans+1500	5044	10.73
centre	1.6	Q T100 ans+2000	5544	10.98
centre	1	QT 2 ans	2327	8
centre	1	P1: Q2 ans+234 m	2561	8.7
centre	1	P2: Q2 ans+468 m	2795	8.9
centre	1	: Q2 ans+702m3/s	3029	9.1
centre	1	P5: QT100ans+468	4012	9.96
centre	1	Q T100 ans	3544	9.71
centre	1	Q T100 ans+1000	4544	10.24
centre	1	Q T100 ans+1500	5044	10.51
centre	1	Q T100 ans+2000	5544	10.78
aval	0.5	QT 2 ans	3137	8.29
aval	0.5	P1: Q2 ans+234 m	3371	8.9

aval	0.5	P2: Q2 ans+468 m	3605	9.25
aval	0.5	: Q2 ans+702m3/s	3839	8.99
aval	0.5	P5: QT100ans+468	5420	10.53
aval	0.5	Q T100 ans	4952	10.37
aval	0.5	Q T100 ans+1000	5952	11.05
aval	0.5	Q T100 ans+1500	6452	11.32
aval	0.5	Q T100 ans+2000	6952	11.51
aval	0	QT 2 ans	3137	8.75
aval	0	P1: Q2 ans+234 m	3371	8.83
aval	0	P2: Q2 ans+468 m	3605	8.91
aval	0	: Q2 ans+702m3/s	3839	8.98
aval	0	P5: QT100ans+468	5420	9.87
aval	0	Q T100 ans	4952	9.65
aval	0	Q T100 ans+1000	5952	10.12
aval	0	Q T100 ans+1500	6452	10.35
aval	0	Q T100 ans+2000	6952	11.06

Réalisé par : Sonia Kadi et Musandji Fuamba, 2012

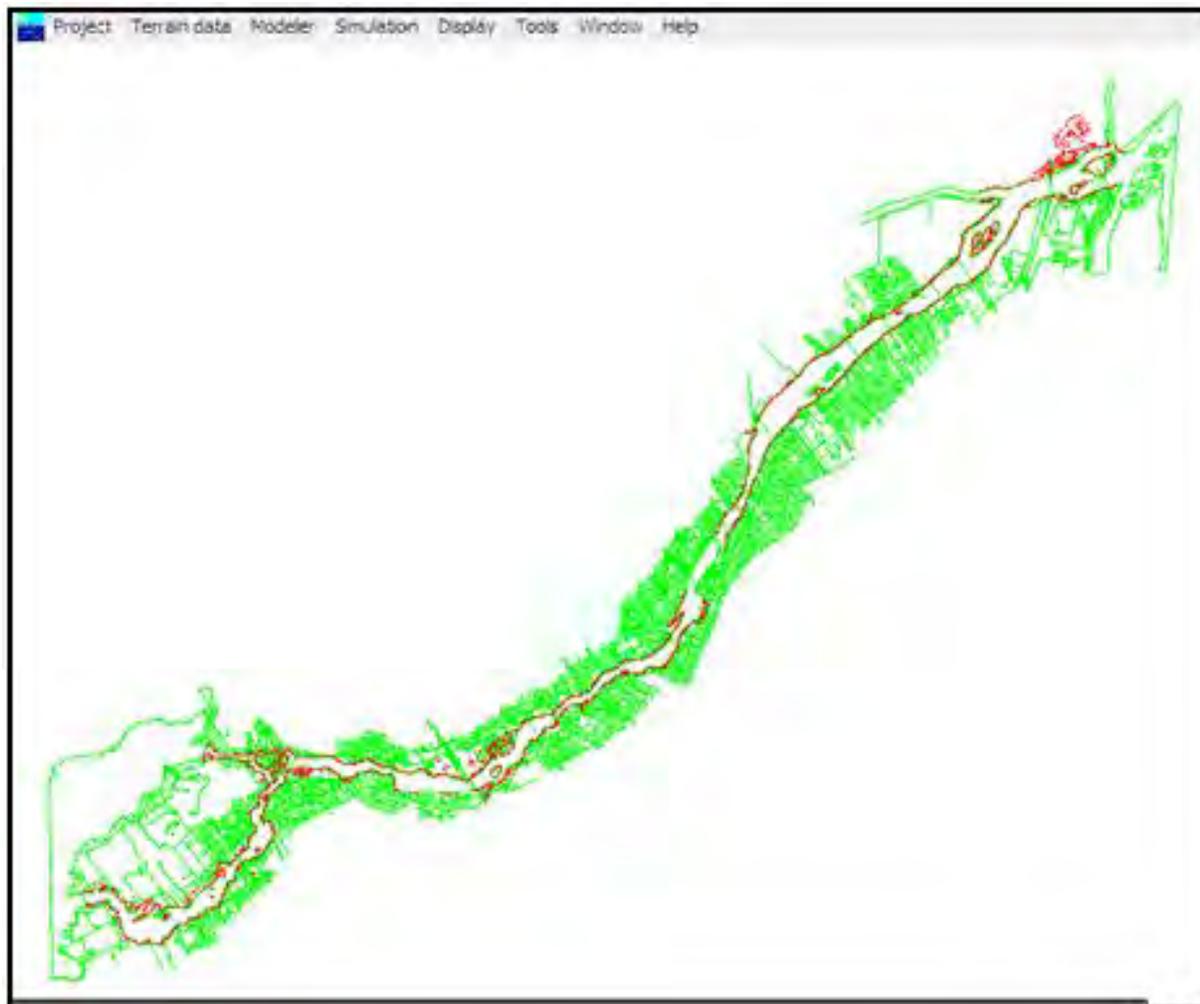
Annexe B - Aperçu des résultats obtenus avec Hydrosim

Simulation du profil 1



Réalisée par : Sonia Kadi, 2012

Simulation du profil 2



Réalisée par : Sonia Kadi, 2012

Simulation du profil 3



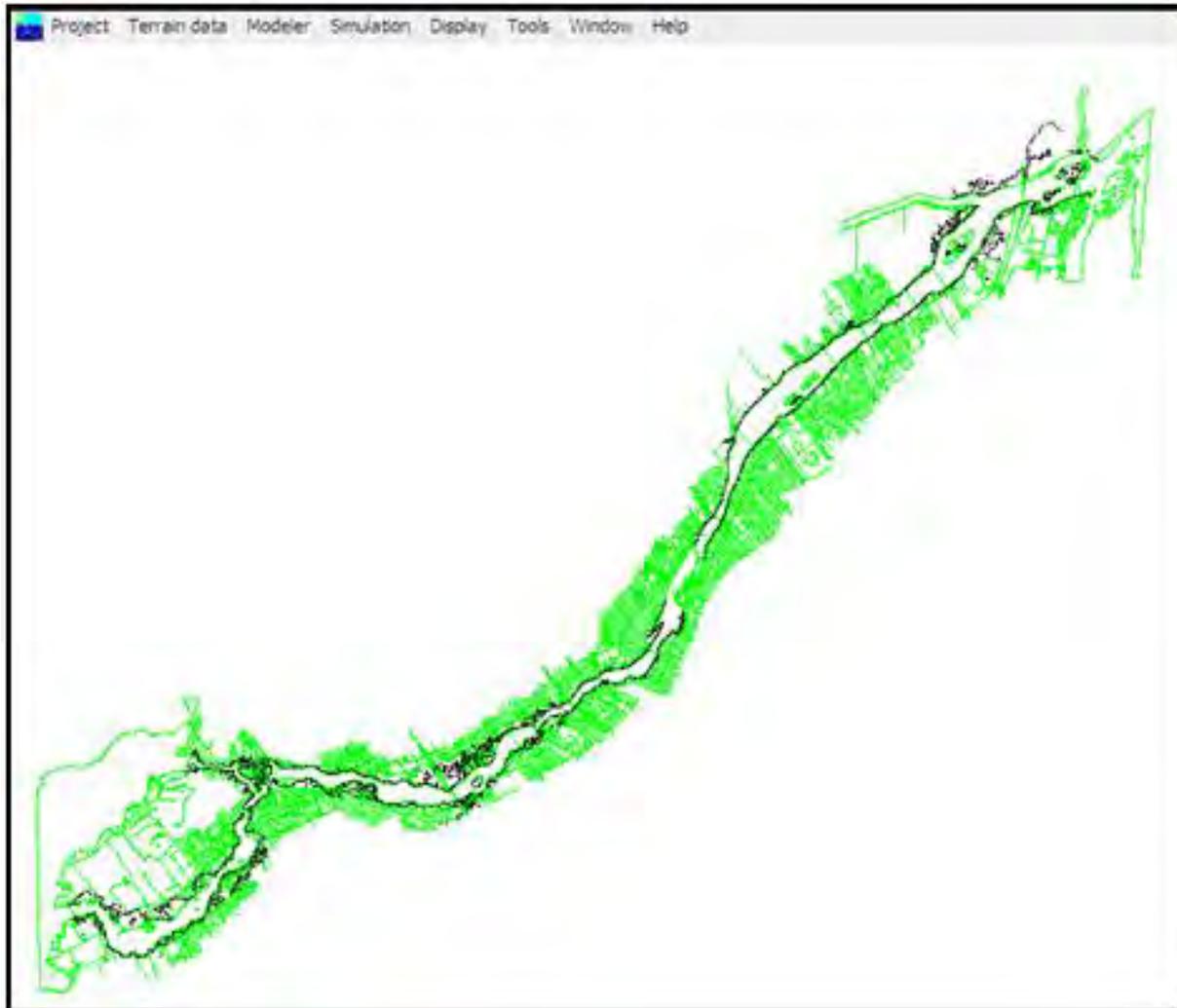
Réalisée par : Sonia Kadi, 2012

Simulation du profil 4



Réalisée par : Sonia Kadi, 2012

Simulation du profil Q100 + 1000 m³/s



Réalisée par : Sonia Kadi, 2012

Simulation du profil Q100 + 1500m³/s

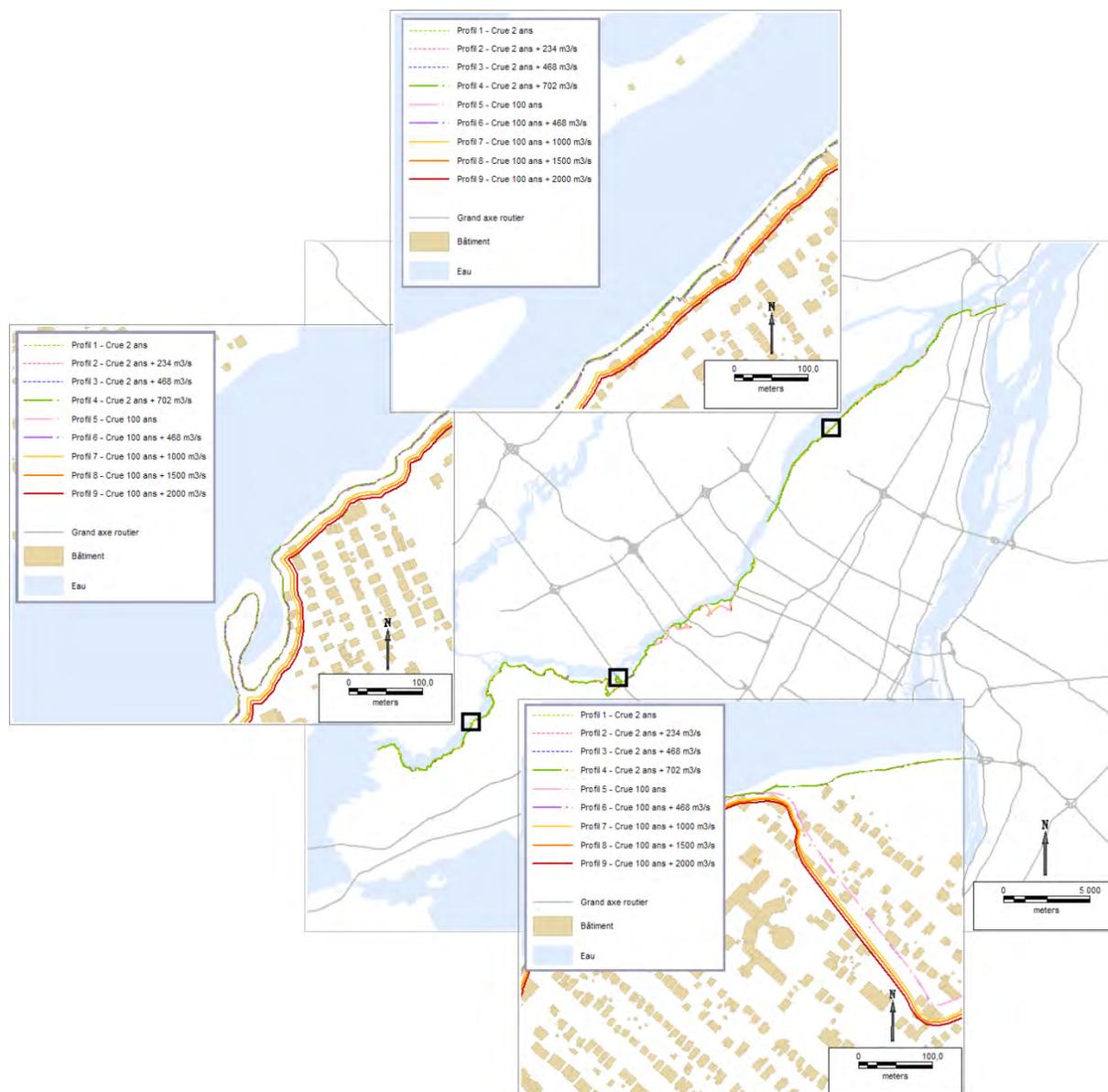
Réalisée par : Sonia Kadi, 2012

Simulation du profil Q100 + 2000m³/s



Réalisée par : Sonia Kadi, 2012

Annexe C – Résultats des simulations d'HydroSim transposées dans MapInfo



Réalisée par : N. Bleau, 2012

Annexe D - Source des données recueillies

Données	Source	Forme des données
Recensement de la population 2006	Statistiques Canada	Polygone - Aire de diffusion
Habitation sociale	SHQ	Point
Réseau routier	CanStreet - DMIT Inc.	Ligne
Centre de refuge pour itinérants	Centre de référence du Grand Montréal (Compilation manuelle)	Point
Espaces de bureau	Dun & Branstreet	Point
Service d'incendie	EPOI- DMTI Inc.	Point
Services de Santé	EPOI- DMTI Inc.	Point
Service de police	EPOI- DMTI Inc.	Point
Institutions bancaires	EPOI- DMTI Inc.	Point
Industries chimiques	EPOI- DMTI Inc.	Point
Musées	EPOI- DMTI Inc.	Point
Prisons	EPOI- DMTI Inc.	Point
Épiceries et pharmacies	EPOI- DMTI Inc.	Point
Logement pour personnes âgées	Famille et aînées. Gouvernement du Québec (Compilation manuelle)	Point
Établissements d'enseignement	Ministère d'éducation du Québec (Compilation manuelle)	Point
Entreprises par catégorie de nombre d'emploi offert	Statistiques Canada	Polygone - Aire de diffusion
Réseau de transport en commun	STM, AMT	Point et ligne
Ponts (débit)	Transport Québec (Compilation manuelle)	Ligne
Réseau cyclable	Vélo Québec	Ligne
Infrastructures patrimoniales	Ville de Montréal	Point et Polygone
Services publics (centre communautaire, écoquartier, loisir et sports, etc.)	Ville de Montréal	Point
Bâtiments et rôle foncier	Ville de Montréal	Point
Hôtels	Ville de Montréal (rôle foncier)	Point
Stations d'essence	Ville de Montréal (rôle foncier)	Point