

Réduction du risque relié aux inondations du ruisseau Pratt dans la ville de Coaticook

Modélisation hydraulique 2D

24 janvier 2019

Travail réalisé pour :

Ministère de la Sécurité publique
Direction de la prévention et de la planification
2525, boulevard Laurier, Tour des Laurentides, 6e étage
Québec (Québec) G1V 2L2

Travail réalisé par :

Département de génie civil et de génie des eaux de l'Université Laval
Faculté des sciences et de génie, Université Laval, pavillon Adrien-Pouliot
1065, av. de la Médecine,
Québec (Québec), G1V 0A6

Contributeurs à l'étude

Gabriel Poulin-Roy, Étudiant à la maîtrise

Brian Morse, Professeur, Université Laval

**Ce projet est réalisé sous la direction de Pascal Marceau, Ministère de la
Sécurité publique.**

Pour des fins de citations

Roy-Poulin, G. Morse, B. 2019. Réduction du risque relié aux inondations du ruisseau Pratt dans la ville de Coaticook. Modélisation hydraulique 2D. 30p.

Note

Ce sous-projet fait partie d'un projet qui a été appuyé par le Cadre pour la prévention de sinistres 2013-2020 du gouvernement du Québec.

Table des matières

Introduction.....	1
Présentation du modèle hydraulique 2D	1
Modèle numérique de terrain	1
Bathymétrie du ruisseau Pratt.....	1
Sol et bâtiments.....	2
Géométrie.....	3
Maillage 2D.....	3
Couche de rugosité de surface	6
Ponds.....	8
Conditions limites.....	8
Paramètres de simulation	10
Équations de Saint-Venant	10
Pas de temps de calcul	10
Nombre de cœurs.....	11
Nombre d'itération.....	11
Validation du modèle	11
Résultats de simulations.....	15
Cartes.....	15
Submersion des bâtiments.....	23
Conclusion	25
Références	26
Annexe B.....	27

Liste des figures

Figure 1 : MNT du modèle hydraulique 2D	2
Figure 2 : Polygone de l'environnement géométrique 2D	3
Figure 3 : Profondeur d'écoulement lors de la crue 100 ans ($Q = 48,9 \text{ m}^3/\text{s}$) près de la limite amont (Confinement de l'eau entre la limite et un bâtiment)	4
Figure 4 : Lignes de contrainte (en bleu) positionnées le long des berges du canal (secteur entre le pont de la rue Child et le pont de l'allée des Marchands)	5
Figure 5 : Zones de différentes rugosités du modèle	7
Figure 6 : Variations à petite échelle des coefficients de Manning dans le chenal (zones comprises entre le pont de la rue Child et le pont de l'allée des Marchands (environ 90 m de long)	7
Figure 7 : Hydrogramme de crue avec paliers correspondants aux débits de pointe (modélisation hydrologique S17).....	9
Figure 8 : Modélisation de la crue de juin 2015	12
Figure 9 : Arrière du 95 rue Child au lendemain de la crue de juin 2015.....	13
Figure 10 : Est du pont de l'allée des Marchands au lendemain de la crue de juin 2015	14
Figure 11 : Coin Saint-Pierre Sud et Saint-Jean-Baptiste lors de la crue de 2015 (Simon Morin)	15
Figure 12 : Profondeurs d'eau - Crue 2 ans ($10,6 \text{ m}^3/\text{s}$)	16
Figure 13 : Profondeurs d'eau - Crue 5 ans ($18,5 \text{ m}^3/\text{s}$)	16
Figure 14 : Profondeurs d'eau - Crue 10 ans ($24,9 \text{ m}^3/\text{s}$)	17
Figure 15 : Profondeurs d'eau - Crue 25 ans ($33,8 \text{ m}^3/\text{s}$)	18
Figure 16 : Profondeurs d'eau - Crue 50 ans ($41,1 \text{ m}^3/\text{s}$)	18
Figure 17 : Profondeurs d'eau - Crue 100 ans ($48,9 \text{ m}^3/\text{s}$)	19
Figure 18 : Profondeurs d'eau - Crue 200 ans ($60,5 \text{ m}^3/\text{s}$)	19
Figure 19 : Profondeurs d'eau - Crue 500 ans ($81,9 \text{ m}^3/\text{s}$)	20
Figure 20 : Vitesses d'écoulement - Crue 100 ans ($48,9 \text{ m}^3/\text{s}$).....	21
Figure 21 : Carte du risque de renversement des piétons - Crue 100 ans ($48,9 \text{ m}^3/\text{s}$)	22
Figure 22 : Position des seuils des bâtiments du centre-ville (avec couche d'élévation de l'eau de la crue 100 ans en mauve)	23
Figure 23 : Submersion du rez-de-chaussée de 5 seuils représentatifs des secteurs du centre-ville.....	24

Introduction

Dans le cadre du projet de réduction du risque relié aux inondations du ruisseau Pratt à Coaticook, un modèle hydraulique 2D a été développé et exploité par l'Université Laval afin de caractériser l'écoulement au centre de la ville. Développé sur le logiciel HEC-RAS 5, ce modèle comporte plusieurs paramètres qui ont dû être ajustés à maintes reprises afin de modéliser correctement l'écoulement complexe de ce cours d'eau en milieu urbain.

Ce document présente d'abord les caractéristiques du modèle. À plusieurs reprises, des lacunes mineures sont mises en évidence. Il est important de comprendre qu'il ne s'agit pas d'éléments qui compromettent la validité du travail de modélisation effectué. Ces dernières témoignent plutôt de la complexité de l'écoulement du ruisseau Pratt et le défi de modélisation qu'il a représenté. En deuxième partie, le rapport présente la simulation de la crue de juin 2015 qui valide de façon satisfaisante le modèle. Finalement, dans la dernière partie du rapport, les résultats de simulations des crues de 2 à 500 ans sont décrits puis analysés.

Présentation du modèle hydraulique 2D

Il est possible de catégoriser les particularités du modèle en trois aspects. Il y a d'abord, le modèle numérique de terrain (MNT) du centre-ville qui fournit au logiciel les données d'élévation du territoire à l'étude. Ensuite, il y a l'environnement géométrique, principalement composé du maillage 2D et finalement, les paramètres numériques des simulations. Les sections suivantes présentent ces trois aspects.

Modèle numérique de terrain

Le modèle de terrain est le résultat d'une superposition de deux ensembles de données. Cette opération a été réalisée dans Ras Mapper, un outil de cartographie intégré au logiciel HEC-RAS. Le système de coordonnées projetées du modèle en sortie est le NAD87 MTM7 et la transformation des coordonnées des deux couches s'est effectuée de façon adéquate.

Bathymétrie du ruisseau Pratt

La couche supérieure du MNT est une trame de la bathymétrie du ruisseau Pratt composé de pixels de 20 cm de côté. Elle a été produite dans Ras Mapper par l'interpolation de sections transversale d'un modèle 1D. De façon générale, l'interpolation est bien réussie. Ce modèle provient essentiellement de la firme privée Norda Stelo qui l'avait développé en 2013 dans le cadre d'une étude hydraulique (Roche Itée, Groupe-conseil, 2013). Il couvre la face amont du pont Baldwin jusqu'au centre de la rivière Coaticook. En 2018, l'Université Laval a procédé à la mise à jour du modèle en modifiant les coefficients de rugosité de surface, mais surtout en ajustant les données des sections transversales qui ont été modifiées à la suite de travaux dans le canal en 2014 et 2015. Les nouvelles données ont été relevées par l'Université à l'aide d'une station totale. Faute de temps, certains points de section n'ont pas pu être vérifiés lors de la

journée de relevés et il y a des petites incertitudes associées à l'élévation du lit du cours d'eau à certains endroits.

Sol et bâtiments

La couche inférieure est un MNT du centre-ville produit à partir de données Lidar traitées. Elle provient du ministère de la Sécurité publique (MSP) et ne comprend que les élévations du sol et des bâtiments. La taille de ses cellules est de 50 cm.

Cette couche représente généralement bien les élévations du secteur du centre-ville, à l'exception peut-être des portions de sol qui se trouvent très près des murs verticaux de bâtiments. Il s'agit d'un détail qui pourrait être retravaillé, mais qui n'a pas d'effet significatif sur les simulations d'inondations. En effet, les vitesses d'écoulement sont généralement faibles près des murs et des variations de l'élévation du sol à ces endroits auront peu d'effet sur la capacité hydraulique. Les sections qui laissent efficacement passer l'eau sont plutôt les surfaces planes telles que les rues et les plaines. Or, le MNT représente bien l'élévation du terrain à ces endroits. Il est alors attendu qu'un modèle numérique de terrain avec des ruptures claires entre les murs des bâtiments et le sol produise sensiblement les mêmes résultats que le MNT utilisé dans le cadre de ce projet. La figure 1 montre le MNT résultant de la combinaison des deux couches.



Figure 1 : MNT du modèle hydraulique 2D

Géométrie

L'environnement géométrique 2D est composé principalement du maillage d'éléments finis, mais également de la couche de rugosité de surface, des éléments 1D internes (ponts), et des conditions limites. Les sous-sections suivantes les détaillent.

Maillage 2D

Polygone

Le maillage est contenu à l'intérieur du polygone de la figure 2. Il couvre un peu plus de 210 000 m² de territoire du centre-ville.



Figure 2 : Polygone de l'environnement géométrique 2D

Les dimensions de ce dernier sont correctes. Si l'on souhaite améliorer l'écoulement de deux secteurs spécifiques, il pourrait être intéressant de l'élargir. En effet, à la limite amont et dans le secteur sud-est du maillage, l'eau est confinée sur le bord du polygone lors des simulations des crues importantes (100, 200 et 500 ans). La limite agit comme une paroi verticale et le modèle génère des niveaux d'eau locaux légèrement plus élevés qu'en réalité. Cette particularité n'a sans doute pas d'effet sur la submersion des seuils des bâtiments au sud-est du territoire étant

qu'ils sont loin de la limite, mais il y a peut-être un effet sur celle des seuils des bâtiments les plus à l'ouest étant qu'ils sont plus près. Si l'on observe cette deuxième zone lors de la simulation de la crue 100 ans (figure 3), il est possible de noter que l'augmentation des niveaux est vraiment contenue entre le côté ouest du bâtiment et la limite du polygone. Toutefois, sur la rue Main Ouest, les profondeurs sont inférieures à 20 cm et l'écoulement est complètement libre. Pour cette raison, il est estimé que l'élargissement du polygone 2D n'aura pas d'effet significatif sur la submersion des seuils de bâtiment à l'ouest.

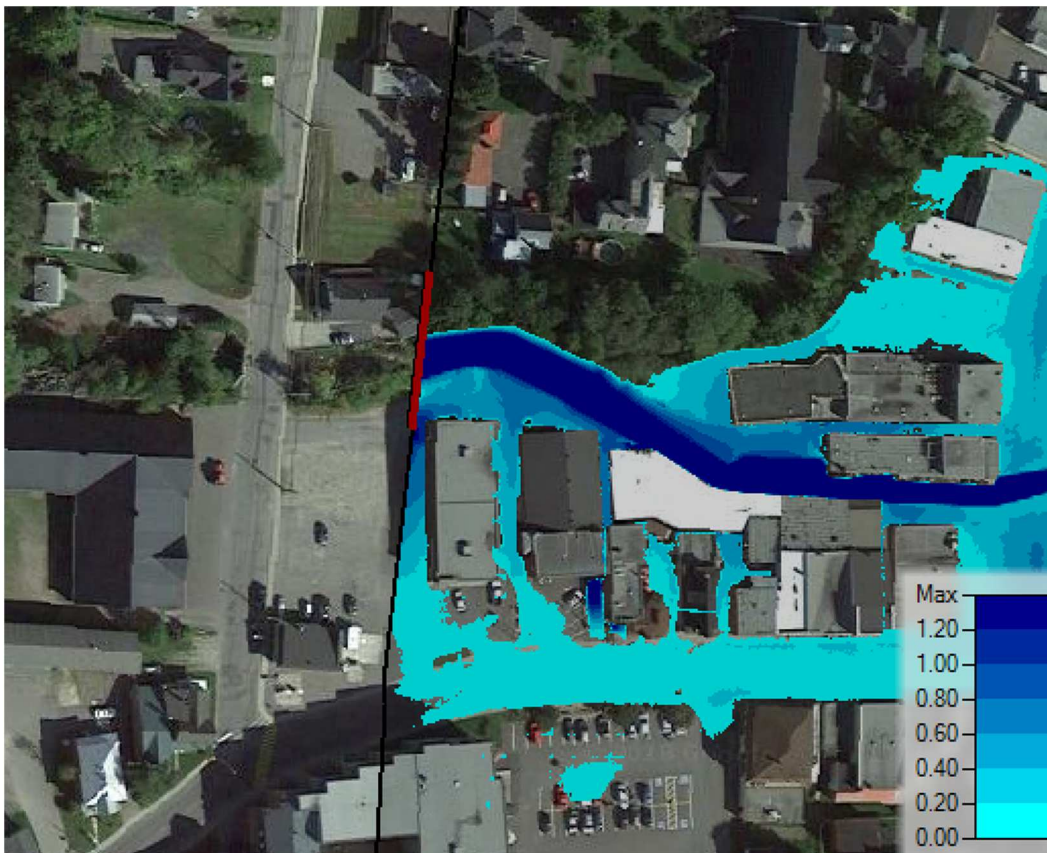


Figure 3 : Profondeur d'écoulement lors de la crue 100 ans ($Q = 48,9 \text{ m}^3/\text{s}$) près de la limite amont (Confinement de l'eau entre la limite et un bâtiment)

Lignes de contrainte

Afin d'aligner les mailles le long des berges du cours d'eau, deux lignes de contraintes ont été ajoutées (figure 4). La géométrie de ces dernières a été extraite dans Ras Mapper depuis les polygones des berges du modèle 1D. Cet ajout permet de s'assurer que l'eau commencera à sortir du lit seulement à partir du moment où la capacité du chenal sera excédée. Il s'agit d'un élément important pour identifier la source des inondations si l'on souhaite effectuer des interventions ciblées.

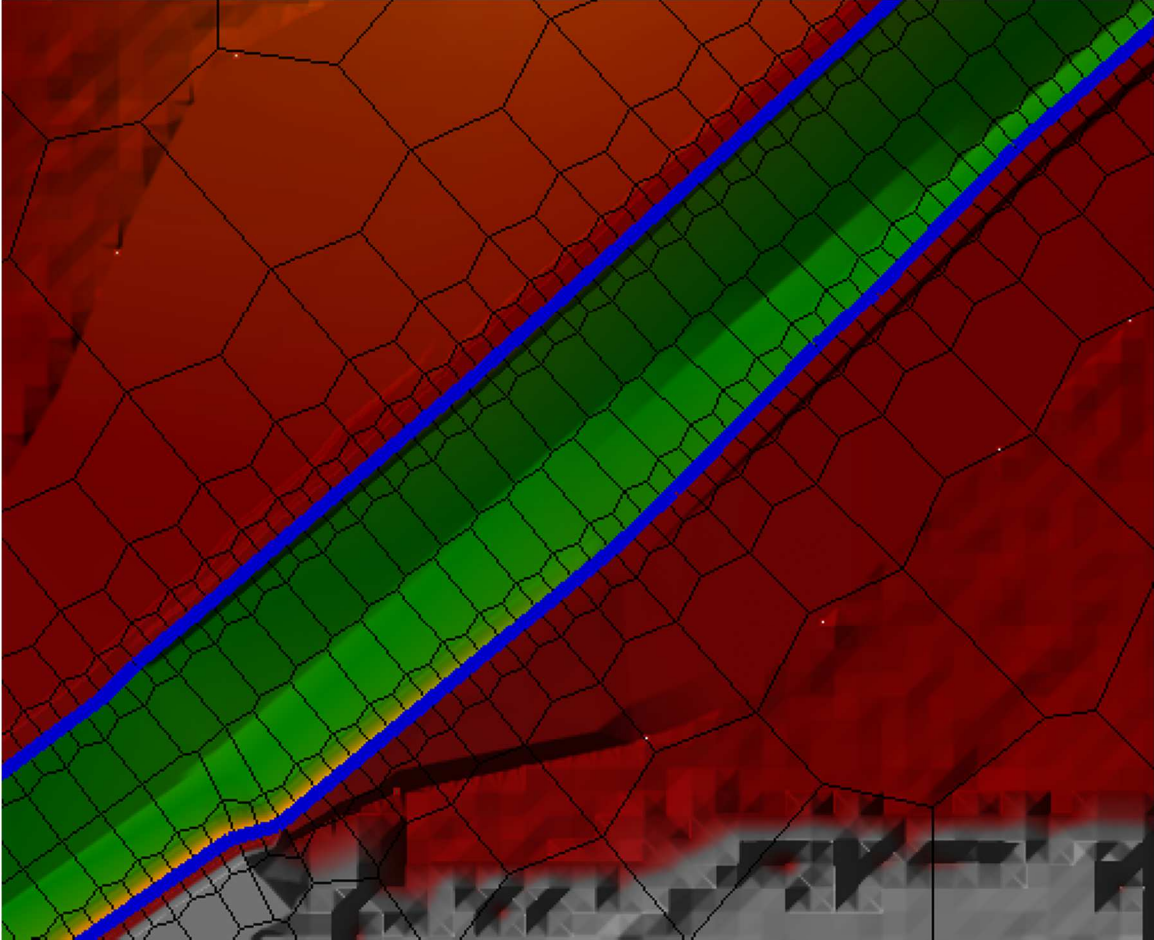


Figure 4 : Lignes de contrainte (en bleu) positionnées le long des berges du canal (secteur entre le pont de la rue Child et le pont de l'allée des Marchands)

Taille du maillage

Deux tailles de cellules ont été utilisées dans le modèle hydraulique.

Cours d'eau

Le long des lignes de contrainte, des cellules de 0,5 m de côté en moyenne ont été utilisées pour augmenter la densité d'éléments dans le cours d'eau (voir figure 6). Tel que mentionné précédemment, le ruisseau Pratt est un cours d'eau complexe. Les variations de rugosité, de section d'écoulement et voir même de pente sont multiples. En incluant l'effet des ouvrages d'art comme les ponts et passerelles ainsi que des obstacles tels que des conduites d'égouts ou des assises de fondations, ces particularités font en sorte que l'écoulement dans le cours d'eau varie beaucoup d'un endroit à un autre. Pour effectuer une modélisation hydraulique fidèle à la réalité, il est important d'avoir un maillage fin qui permet de prendre en compte les variations résultantes de volume d'eau, de profondeur et de vitesse.

Les cellules qui sont adjacentes aux lignes des ponts, soit les connexions internes 1D, ne peuvent pas être de cette taille. En effet, la fonction de modélisation des ponts exige que les cellules

alignées sur les lignes de connexions aient des faces situées en amont et en aval de l'ouvrage. Or, la taille du côté moyen de ces dernières doit être minimalement supérieure à la longueur du pont. Celle-ci est assurément supérieure à 0,5 m pour chacun des ouvrages du cours d'eau. Cette exigence diminue potentiellement la précision du calcul de l'écoulement à ces endroits, mais faute d'étude ou de cas comparatifs, il est impossible d'en mesurer la portée. Néanmoins, il est plus pertinent d'inclure les ponts et passerelles avec de grosses cellules pour modéliser l'effet de ces obstacles significatifs plutôt que de les omettre et d'utiliser de petites cellules.

Ailleurs

Ailleurs, des cellules de 5 m de côté en moyenne ont été utilisées afin de modéliser l'eau qui inonde les rues et les plaines (voir figure 6). Ces zones sont généralement exemptes de variations importantes et l'écoulement y est plus uniforme. Cette taille de cellule est donc jugée adéquate pour simuler les inondations.

Il faut mentionner que la taille des cellules influence significativement le temps de calcul nécessaire à la modélisation. Dans les deux cas, il est possible qu'une taille plus importante puisse donner des résultats d'une précision satisfaisante tout en limitant le temps de calcul. Toutefois, faute de données de validation et de calibration, les auteurs jugent qu'il est préférable de privilégier l'obtention d'une plus grande précision avec ces petites cellules plutôt que de limiter le temps de calcul.

Couche de rugosité de surface

À partir des images satellites du centre-ville (Google, 2018) et de photographies prises lors du relevé d'arpentage de l'Université, les coefficients de rugosité n de Manning ont été évalués selon la méthode du Federal Highway Administration (Arcement & Schneider, 1989). L'annexe A contient les calculs effectués selon cette démarche.

Par la suite, différents polygones ont été tracés sur les images satellites dans Ras Mapper – et à partir des sections transversales 1D – puis assembler pour former une couche de rugosité variable dans l'espace. La figure 5 montre les zones de différentes rugosités de l'ensemble du modèle et la figure 6 montre un exemple de variation le long des parois du canal. La largeur des bandes de rugosité le long du chenal est comprise entre 1 et 2 m.

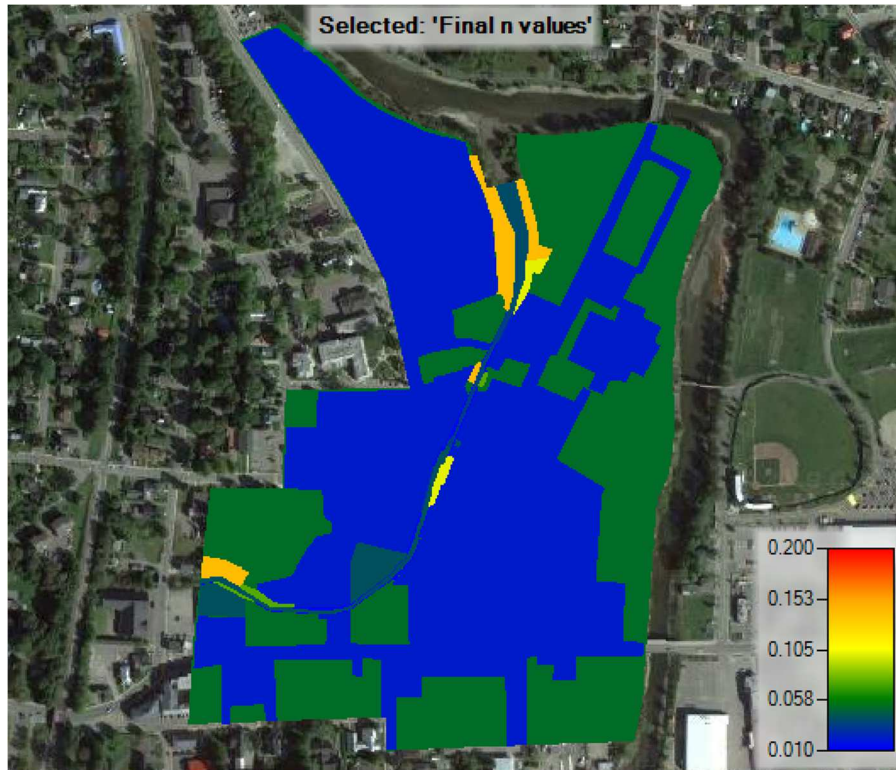


Figure 5 : Zones de différentes rugosités du modèle

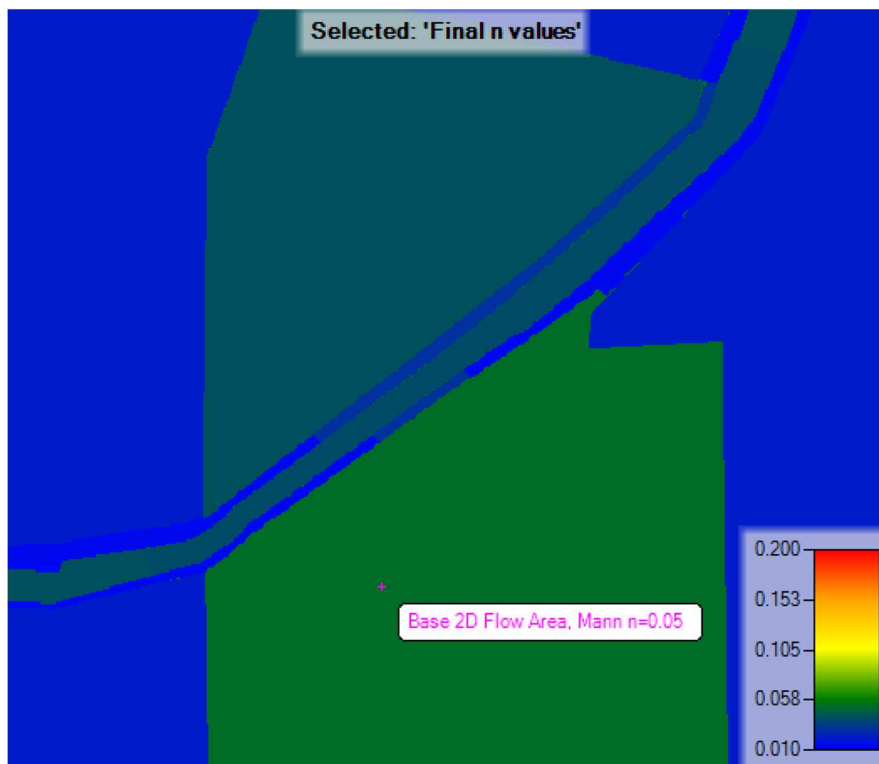


Figure 6 : Variations à petite échelle des coefficients de Manning dans le chenal (zones comprises entre le pont de la rue Child et le pont de l'allée des Marchands (environ 90 m de long)

Ponts

Les ponts sont modélisés comme des ponceaux rectangulaires et sont représentés par des connexions linéaires d'un espace 2D vers un espace 2D, soit le même dans le présent modèle. L'écoulement modélisé à cet endroit est unidimensionnel.

Ces éléments sont une limite du modèle. En effet, l'utilisation de ponceaux rectangulaire rend impossible la représentation des ouvertures non uniforme des ponts et des passerelles. Également, les équations exploitées sont celles des ponceaux et sont moins bien adaptées à l'écoulement sous les ponts. De plus, faute de données de calibration et de validation, les variables des équations de ponceaux et des seuils (lorsque la capacité des ponceaux est excédée) n'ont pas pu être paramétrées. Seules des valeurs présentes dans la littérature ont été utilisées (US Army Corps of Engineers, 2016). En addition au fait que les cellules adjacentes aux connexions sont plus grosses et que l'écoulement dans le ruisseau est très variable, ces différentes implications limitent la qualité de la modélisation près des ouvrages d'art lors des petites crues. Il faut alors interpréter prudemment les niveaux d'eau générés à ces endroits. Lorsqu'il y a inondation, la proportion de l'eau passant par l'ouvrage diminue et tout comme son impact sur l'écoulement dans le centre-ville.

Conditions limites

Le modèle est composé de deux limites (voir lignes pourpres de la figure 2). À l'amont, il y a une limite 1D qui admet l'eau dans le modèle. Elle contient les hydrogrammes de débit. À l'aval, il y a une limite 1D qui longe la berge gauche (vue de l'amont vers l'aval) de la rivière Coaticook. Cette dernière contient un hydrogramme de niveau d'eau constant. Les deux conditions limites sont détaillées ci-dessous.

Hydrogrammes de débit

Les données de ces hydrogrammes proviennent de l'étude hydrologique de l'équipe Université Laval menée en parallèle à la caractérisation hydraulique du ruisseau Pratt (Forest & Morse, 2019). Les auteurs estiment que leur utilisation est appropriée dans un contexte d'évaluation du risque lié aux inondations.

Pour générer les cartes d'inondation, un hydrogramme avec patron en escalier a été appliqué à l'amont (figures 7).

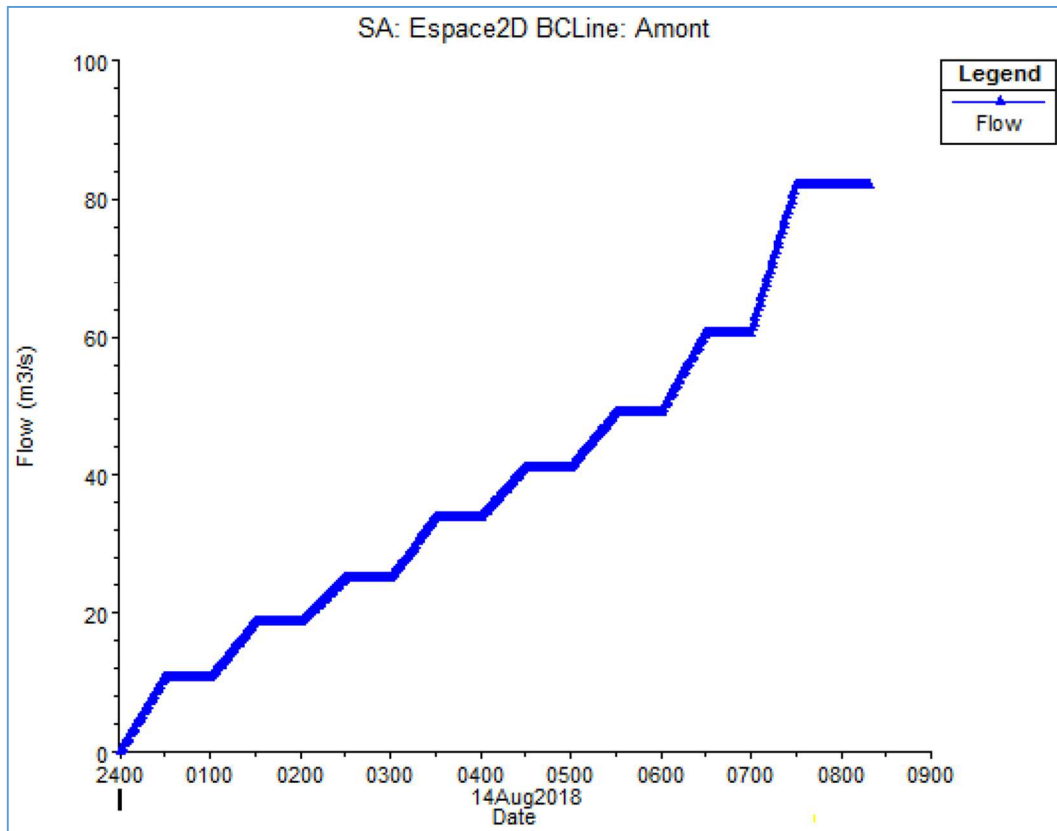


Figure 7 : Hydrogramme de crue avec paliers correspondants aux débits de pointe (modélisation hydrologique S17)

Les paliers de ces hydrogrammes représentent les débits de pointe associés à chacune des périodes de retour. Cette forme d'hydrogramme permet d'accélérer le temps de calcul du modèle sans compromettre les résultats des simulations. En effet, à la suite de quelques essais, le modèle a montré que les hauteurs de submersion générée avec des hydrogrammes en forme de cloche sont comparables à quelques millimètres près de ceux générés avec des hydrogrammes plats équivalents au débit de pointe du premier hydrogramme. Or, l'utilisation de patron en escalier permet de générer des cartes d'inondation à chacun des paliers, soit à chaque période de retour, et ce, au cours d'une simulation unique.

À l'entrée de la limite amont, l'écoulement est considéré comme étant à profondeur normale. Une pente d'énergie est imposée, mais cette dernière n'est pas équivalente à la pente du cours d'eau puisque l'écoulement n'est pas complètement stable. Cette observation a été faite depuis les résultats de simulation du modèle 1D. Ainsi, la pente d'énergie imposée à l'amont est plutôt une moyenne des pentes d'énergie des crues de 2 à 500 ans issue du modèle 1D (0,007 m/m). Idéalement, il pourrait être préférable d'imposer des pentes d'énergie propres à chaque crue. Cela augmenterait peut-être la qualité des simulations en amont. Toutefois, il s'agit d'une lacune très localisée qui perd de l'influence au fur à mesure que l'on s'éloigne de la limite

amont. Il est estimé que la qualité des hauteurs de submersion des secteurs d'intérêt n'est pas affectée par ce détail.

Hydrogramme de niveau d'eau

Le niveau aval sur toute la limite longeant la rivière Coaticook est fixé à une élévation constante de 286 m qui est stabilisée par le barrage Saint-Paul.

Pour les forts débits sur le ruisseau Pratt, il est probable que la rivière Coaticook soit également sujette à un rehaussement de son niveau. Le niveau de la rivière pourrait alors être de l'ordre de 286,9 m (niveau maximal enregistré (Centre d'expertise hydrique du Québec, 2008)) ou même plus si on parle de crue de 200 ou de 500 ans. Des simulations avec un niveau plus élevé pourraient peut-être changer les résultats de simulations et augmenter la vulnérabilité des bâtiments près de l'intersection du ruisseau Pratt avec la rivière Coaticook. Toutefois, les résultats de l'étude de Norda Stelo (Roche Itée, Groupe-conseil, 2013) montraient que le niveau maximal de la rivière Coaticook n'avait plus d'effet sur la profondeur d'écoulement du ruisseau Pratt à partir de 30 m en aval du pont de la rue Chartier. Sachant que l'eau de cette portion du ruisseau Pratt n'est pas sortie du lit lors des simulations 2D, il serait improbable qu'une hauteur de 286,9 m à l'aval puisse changer les hauteurs de submersion des bâtiments au nord de la rue Saint-Jean-Baptiste.

Paramètres de simulation

Il y a quatre principaux paramètres de simulation qui méritent d'être présentés : les équations, le pas de calcul, le nombre de cœurs et le nombre d'itérations.

Équations de Saint-Venant

Cette série d'équations est nécessaire pour modéliser adéquatement l'écoulement de ce cours d'eau complexe. En raison des changements de section, des bâtiments obstacles, des aménagements hydrauliques, des changements de pente et de rugosité, il est essentiel de considérer l'accélération locale et convective de l'écoulement de même que la turbulence. Or c'est la série d'équations de Saint-Venant qui prend en compte ces termes.

Pas de temps de calcul

Le pas de temps de calcul varie automatiquement en fonction du nombre de Courant. Vue la complexité du cours d'eau, cette fonction augmente la précision numérique du modèle. Lorsque le nombre de Courant d'une cellule est jugé trop important (> 1), le pas se scinde en deux afin de mieux modéliser un écoulement qui se déplace plus rapidement que la vitesse de déplacement d'un bout à l'autre d'une cellule lors du précédent pas de temps. Lorsque toutes les cellules du modèle respectent le critère de nombre de Courant, le pas de temps se double si le nombre d'une cellule est trop faible ($< 0,3$). Il s'agit d'un choix qui augmente considérablement le temps requis pour simuler une crue, mais il est nécessaire dans le cas actuel.

Nombre de cœurs

Huit cœurs de calcul ont été sélectionnés pour effectuer les simulations. Il s'agit d'un nombre adéquat déterminé expérimentalement en fonction de l'ordinateur exploité et des temps de calcul.

Nombre d'itération

Le nombre d'itérations maximal par pas de temps a été fixé à 40. Il s'agit du nombre maximal possible et il permet de limiter les messages d'erreur de calcul lié à certaines cellules.

Validation du modèle

Les données et observations historiques en lien avec l'événement de juin 2015 sont cohérentes avec les simulations. En effet, en insérant la crue de 2015 – issue du modèle hydrologique – dans le modèle HEC-RAS ($Q = 38,5 \text{ m}^3/\text{s}$), il a été possible de reproduire les niveaux observés.

Lors de cette simulation, le modèle a été ajusté de façon à reproduire l'état particulier du ruisseau Pratt à cette période. Entre le pont de la rue Chartier et le pont de l'allée des Marchands, le canal était en reconstruction. Les berges étaient exposées puisqu'il n'y avait plus de murs verticaux et celles-ci ont été fortement érodées par la crue. Ces conditions extraordinaires augmentaient la section d'écoulement du ruisseau, ce qui avait pour effet direct d'en augmenter la capacité hydraulique. Ainsi, pour recréer cette augmentation dans le modèle, des murs virtuels ont été installés perpendiculairement à la rue Child. D'une certaine façon, l'eau était transportée en hauteur plutôt qu'en largeur. Les murs ont également eu l'effet de contenir l'eau dans le chenal afin que la rue ne soit pas inondée, tout comme en 2015. En appliquant cette restriction, les élévations de l'eau simulées coïncident avec des observations.

La figure 8 montre les profondeurs générées par la crue de $38,5 \text{ m}^3/\text{s}$.

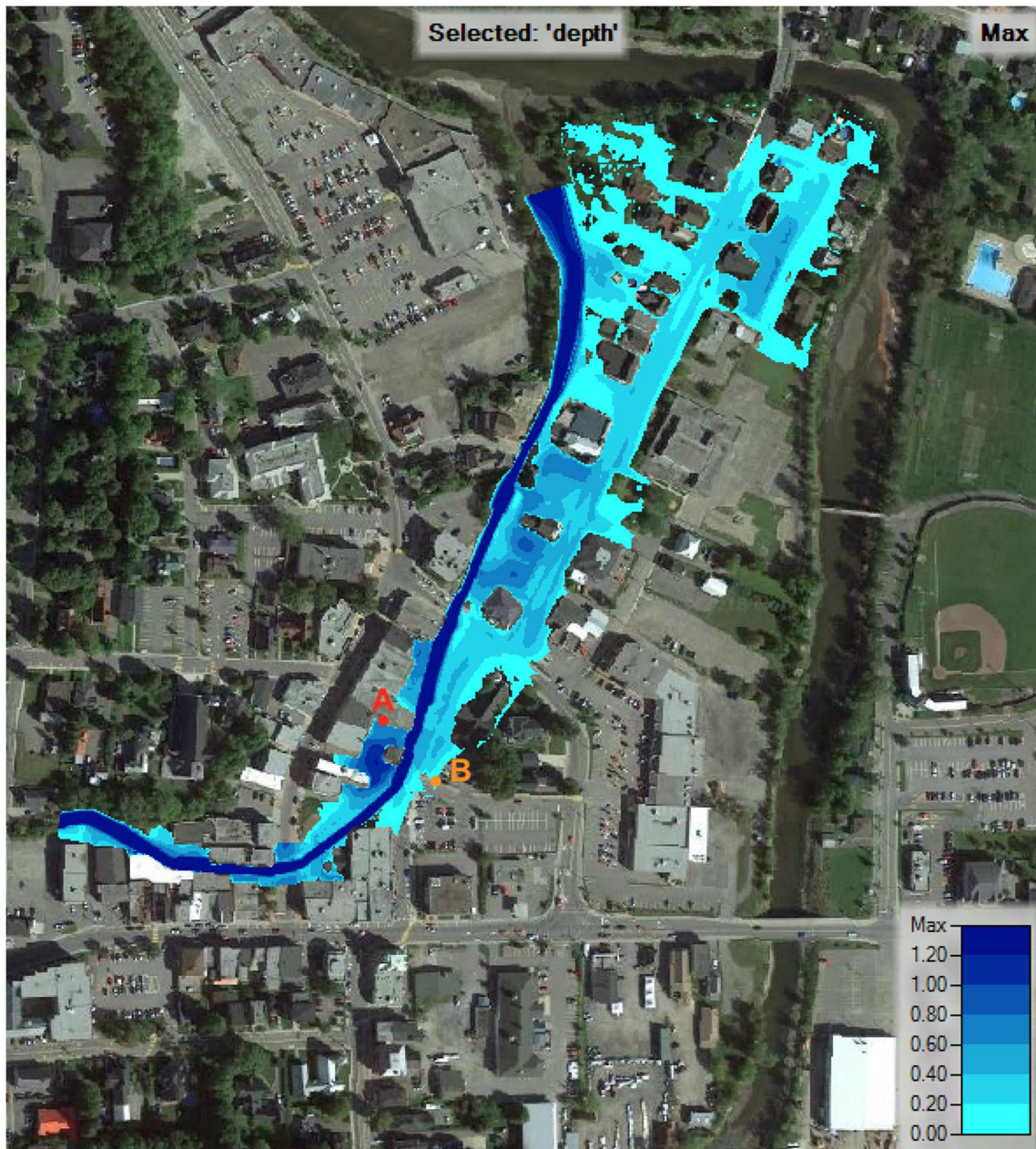


Figure 8 : Modélisation de la crue de juin 2015

En 2015, le ruisseau Pratt a inondé l'arrière du 95 rue Child (point A sur la figure 10). En raison de l'érosion des berges en amont, l'eau était fortement chargée en sédiment. Cette dernière a marqué le mur de l'édifice et a laissé une trace claire du niveau maximal atteint pendant l'événement. La figure 9 montre la trace en question qui surpasse légèrement le seuil de la porte blanche.



Figure 9 : Arrière du 95 rue Child au lendemain de la crue de juin 2015

L'élévation de seuil de cette porte est de 291,2 m, soit la même élévation que la surface de l'eau générée par le modèle (291,20 m).

Approximativement au même endroit, mais de l'autre côté du cours d'eau (point B sur la figure 10), le modèle génère un écoulement à une élévation de 291,17 m. Encore une fois, cette valeur coïncide de façon juste avec l'élévation du point dans le stationnement qui a été marqué par l'eau chargée en sédiment (trait orangé sur la figure 10). Cette deuxième élévation se situe entre 291,15 et 291,20 m.



Figure 10 : Est du pont de l'allée des Marchands au lendemain de la crue de juin 2015

Plus en aval, au niveau de l'intersection de la rue Saint-Pierre Sud avec la rue Saint-Jean-Baptiste, le modèle génère un écoulement encore une fois comparable aux observations. Sur une vidéo de l'inondation fournie par le directeur des services extérieurs de la ville de Coaticook, monsieur Simon Morin, il est possible de voir que l'eau effleure le sommet de la chaîne de trottoir près de la pancarte arrêt (figure 11). Selon le MNT cette élévation correspond environ à 288,90 m tandis que la surface de l'eau générée par le modèle à cet endroit est de 289,08 m, soit seulement 18 cm plus haut que la chaîne. Sachant que le vidéo n'a pas été nécessairement tourné lors de la pointe de la crue, cette faible différence d'élévation est très satisfaisante. En effet, pour deux sites d'intérêt distinct, le modèle a simulé un écoulement qui coïncide fortement avec les observations de terrain. En considérant l'ensemble des sources d'incertitudes associés à ce cours d'eau complexe, il est possible d'affirmer que le modèle est bien adapté à la simulation d'inondation au centre-ville de Coaticook.



Figure 11 : Coin Saint-Pierre Sud et Saint-Jean-Baptiste lors de la crue de 2015 (Simon Morin)

Résultats de simulations

Les simulations permettent de générer des cartes de profondeur d'eau, de vitesse d'écoulement et d'élévation de la surface de l'eau. Il s'agit de résultats qui permettent d'apprécier visuellement la vulnérabilité aux inondations du centre-ville. Dans un contexte d'évaluation du risque en fonction de hauteurs de submersion de seuil de bâtiments, il est également possible d'interroger les cartes d'élévation de la surface de l'eau pour en extraire des niveaux. L'élévation des seuils peut ensuite y être soustraite à ces niveaux afin d'évaluer la submersion de chacun des seuils. Cette section présente les cartes générées pour chacune des crues de même que les profondeurs de submersion des bâtiments du centre-ville.

Cartes

Les figures 12 à 19 présentent les cartes de profondeur d'écoulement générées par les crues de 2 à 500 ans.

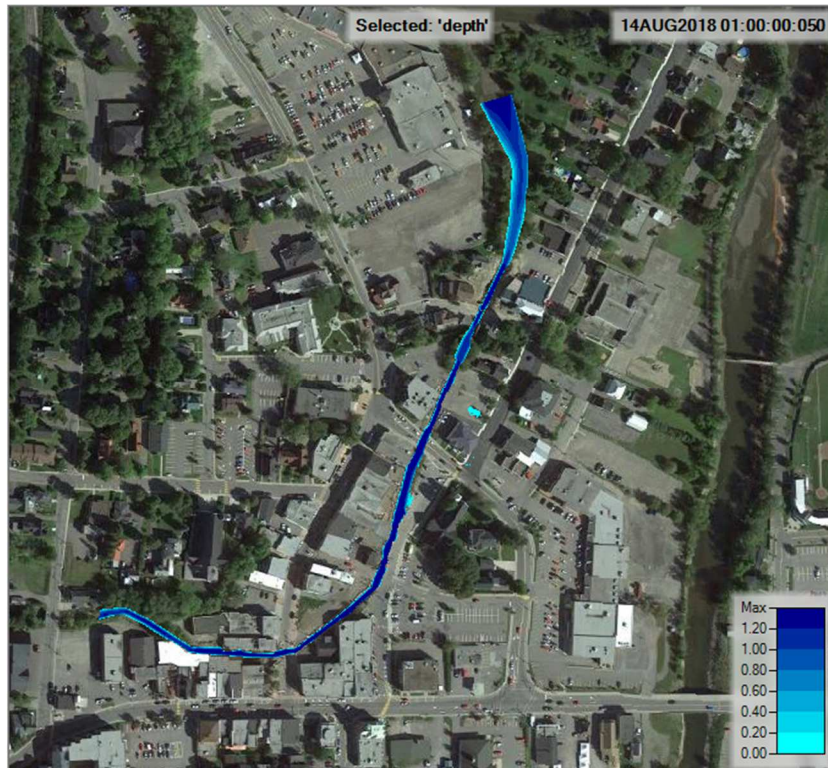


Figure 12 : Profondeurs d'eau - Crue 2 ans ($10,6 \text{ m}^3/\text{s}$)

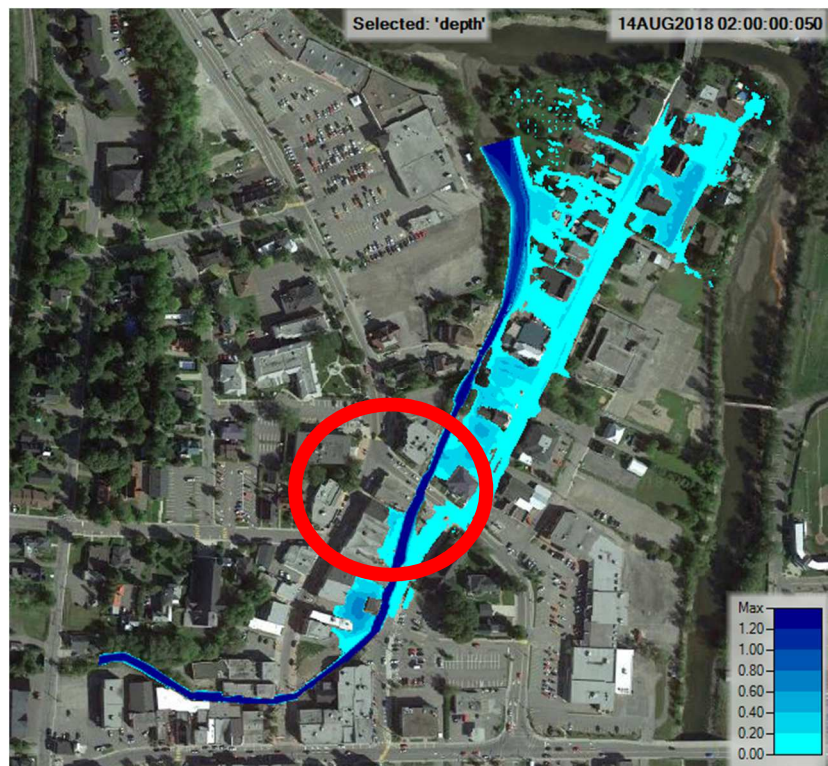


Figure 13 : Profondeurs d'eau - Crue 5 ans ($18,5 \text{ m}^3/\text{s}$)

Cette deuxième carte doit être interprétée prudemment. En analysant le résultat, il a été possible d'affirmer que les inondations en amont de la rue Wellington (cercle rouge sur la figure 13) ne devraient pas avoir lieu. De l'eau est transmise de part et d'autre des murets par les grosses cellules des ponts. À ces endroits, l'eau dans le canal peut communiquer librement avec l'extérieur parce que la contrainte verticale est comprise à l'intérieur des éléments finis et n'est pas prise en compte. Les cas où l'élévation de l'eau est supérieure au terrain, mais inférieure au sommet d'un muret représentent une limite du modèle. C'est à ce moment que les résultats du modèle 1D deviennent pertinents. Dans le cas actuel, les simulations 1D confirment effectivement qu'il n'y a pas d'inondation en amont de Wellington pour un débit de $18,5 \text{ m}^3/\text{s}$.

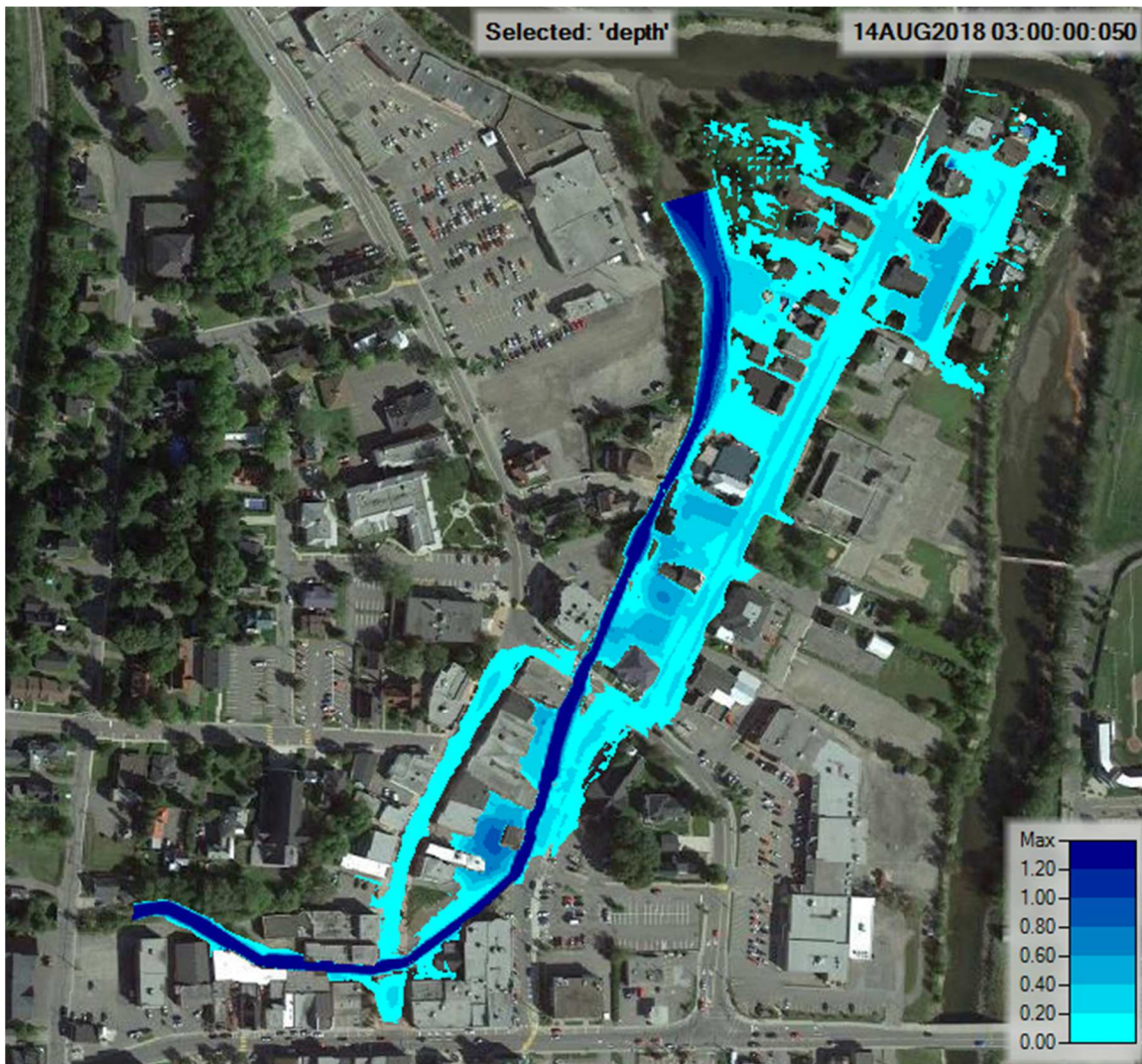


Figure 14 : Profondeurs d'eau - Crue 10 ans ($24,9 \text{ m}^3/\text{s}$)

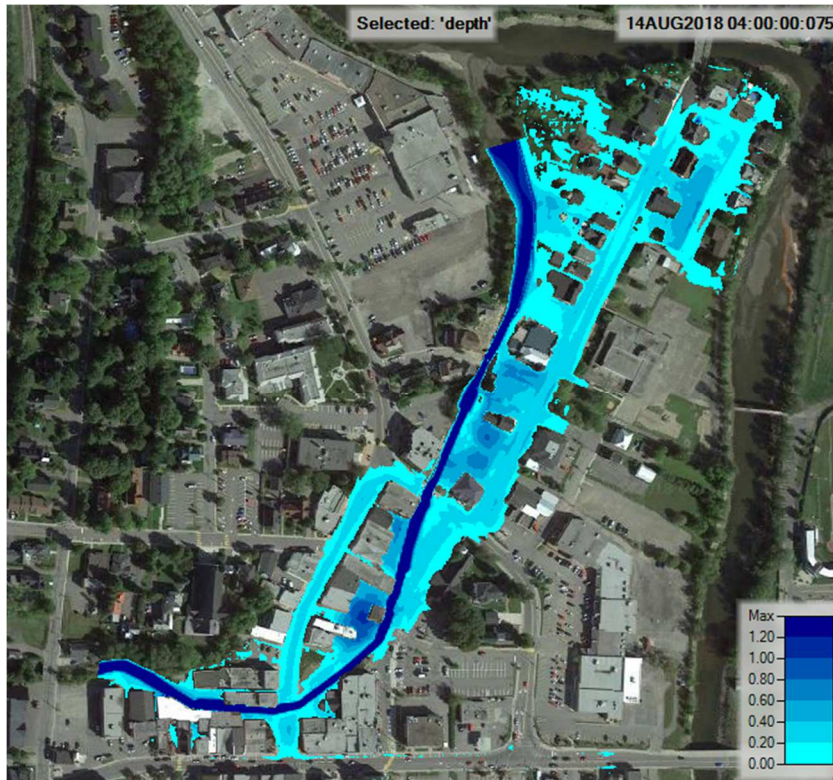


Figure 15 : Profondeurs d'eau - Crue 25 ans ($33,8 \text{ m}^3/\text{s}$)

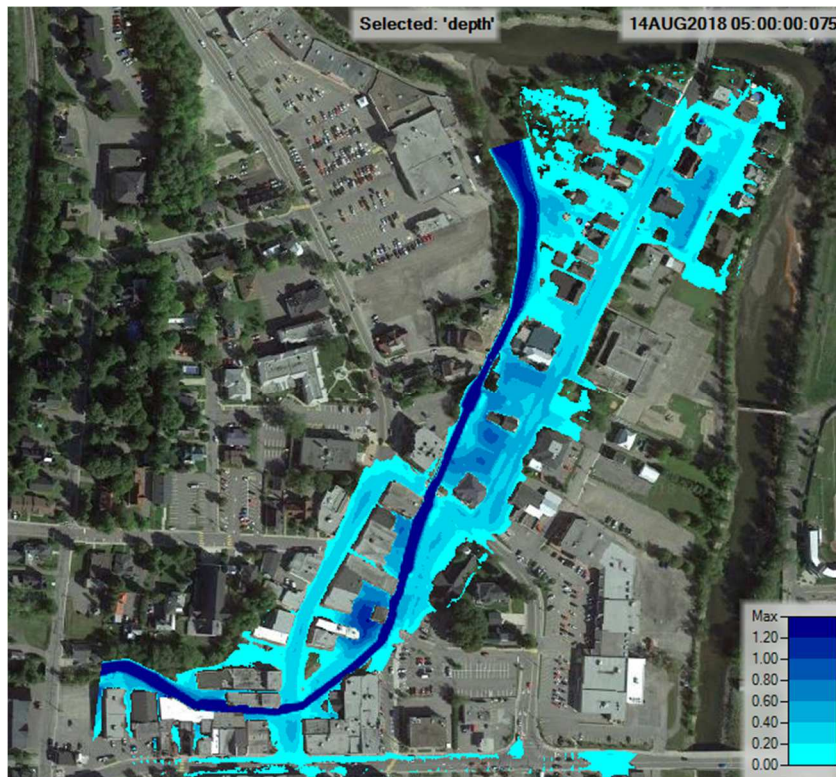


Figure 16 : Profondeurs d'eau - Crue 50 ans ($41,1 \text{ m}^3/\text{s}$)

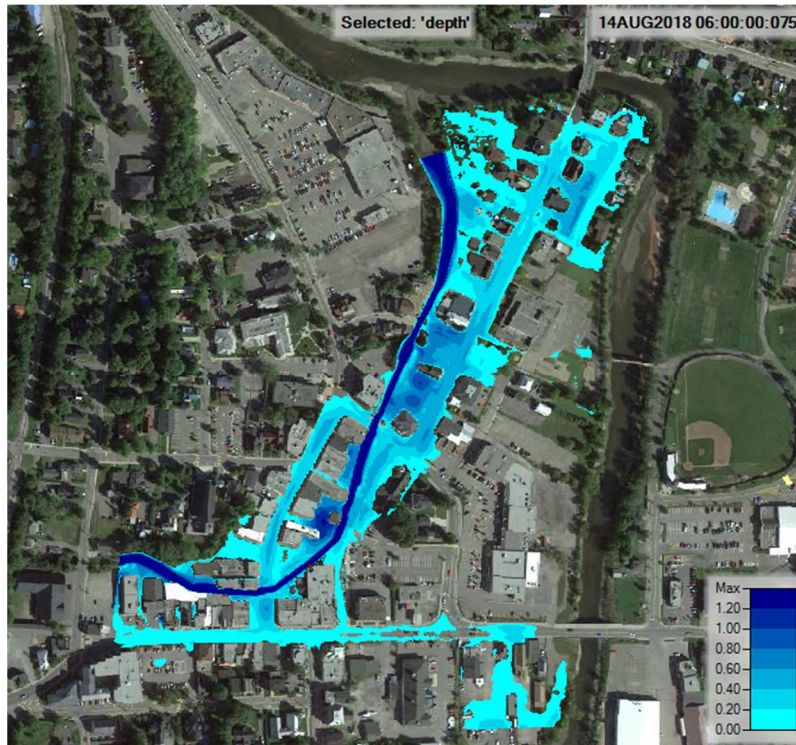


Figure 17 : Profondeurs d'eau - Crue 100 ans ($48,9 \text{ m}^3/\text{s}$)

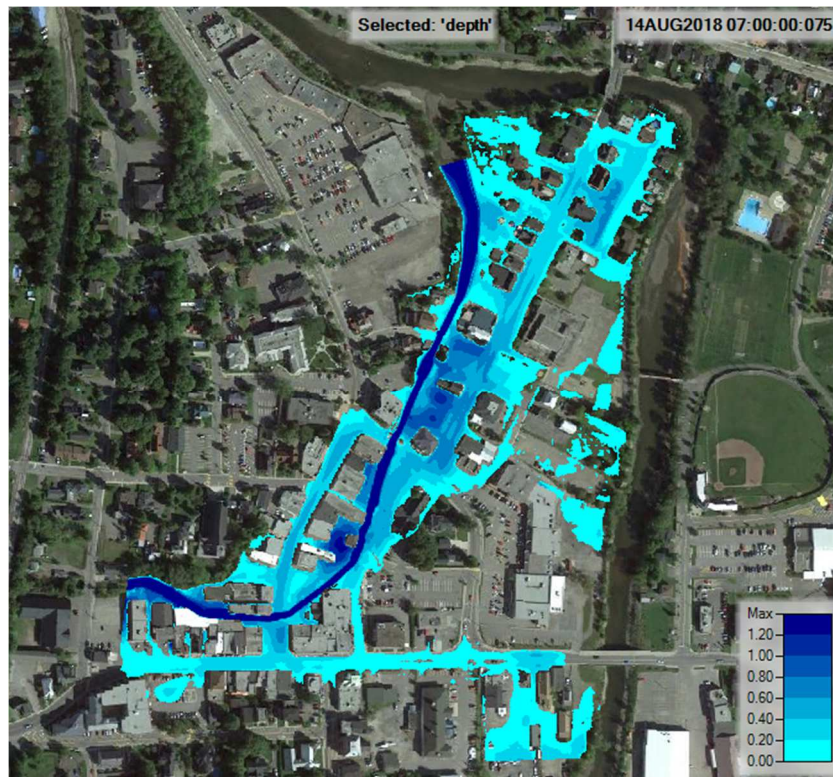


Figure 18 : Profondeurs d'eau - Crue 200 ans ($60,5 \text{ m}^3/\text{s}$)

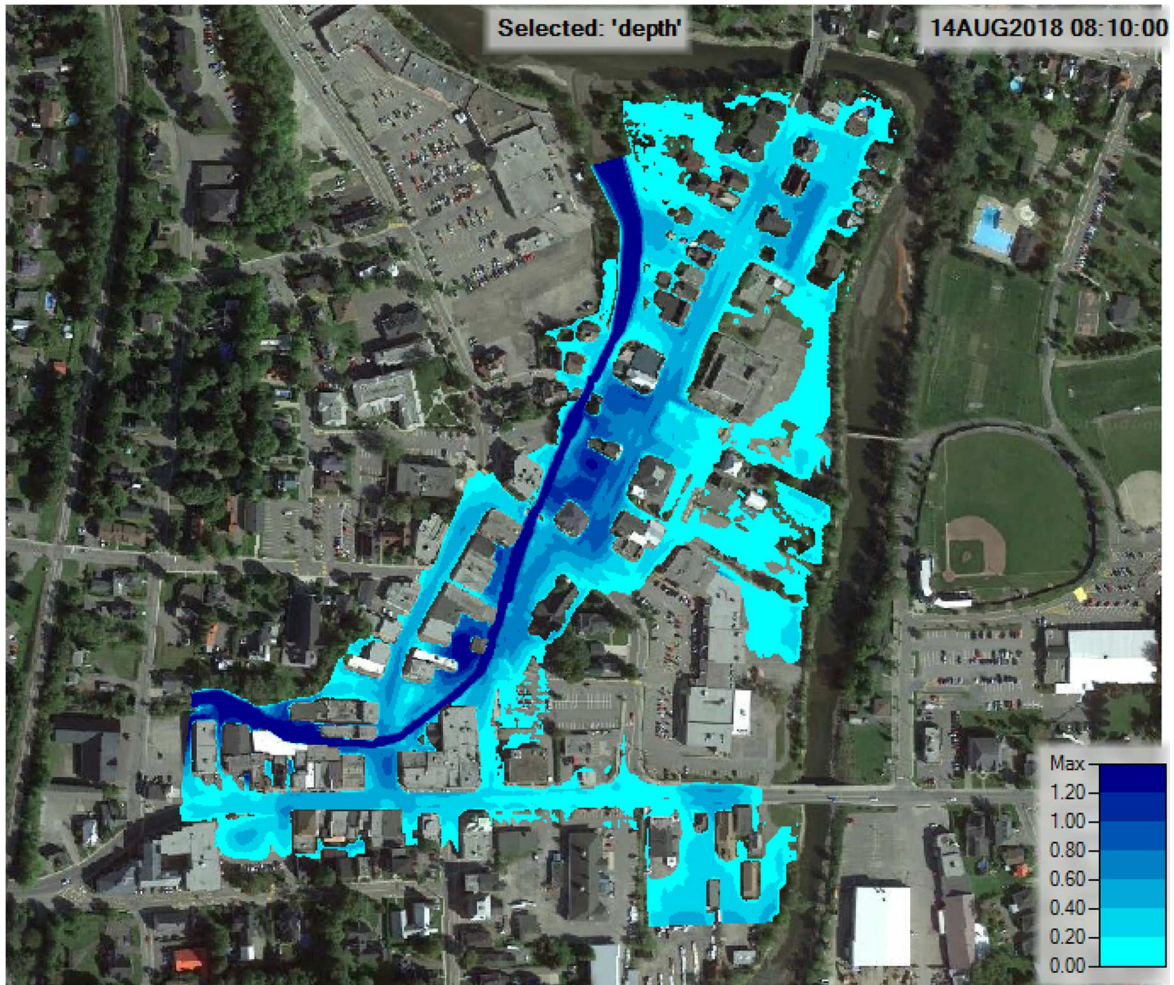


Figure 19 : Profondeurs d'eau - Crue 500 ans (81,9 m³/s)

Les cartes montrent que des secteurs du centre-ville sont plus exposés que d'autres. Il commence à avoir de l'eau sur la rue Saint-Jean-Baptiste dès la crue 5 ans (18,9 m³/s). La rue Child commence à recevoir de l'eau à 25 m³/s tandis que la rue Main nécessite 41 m³/s pour être touchée. En contrepartie, les simulations montrent que les deux centres commerciaux sont bien situés puisque l'eau ne les atteint pas, même lors de la crue de 500 ans.

Il est également possible d'extraire les cartes de vitesse d'écoulement de l'eau. Cette caractéristique hydraulique est un indicateur intéressant pour évaluer le potentiel de dommage aux piétons, aux routes et aux infrastructures. À titre d'exemple, la figure 20 montre les vitesses lors de la crue 100 ans.

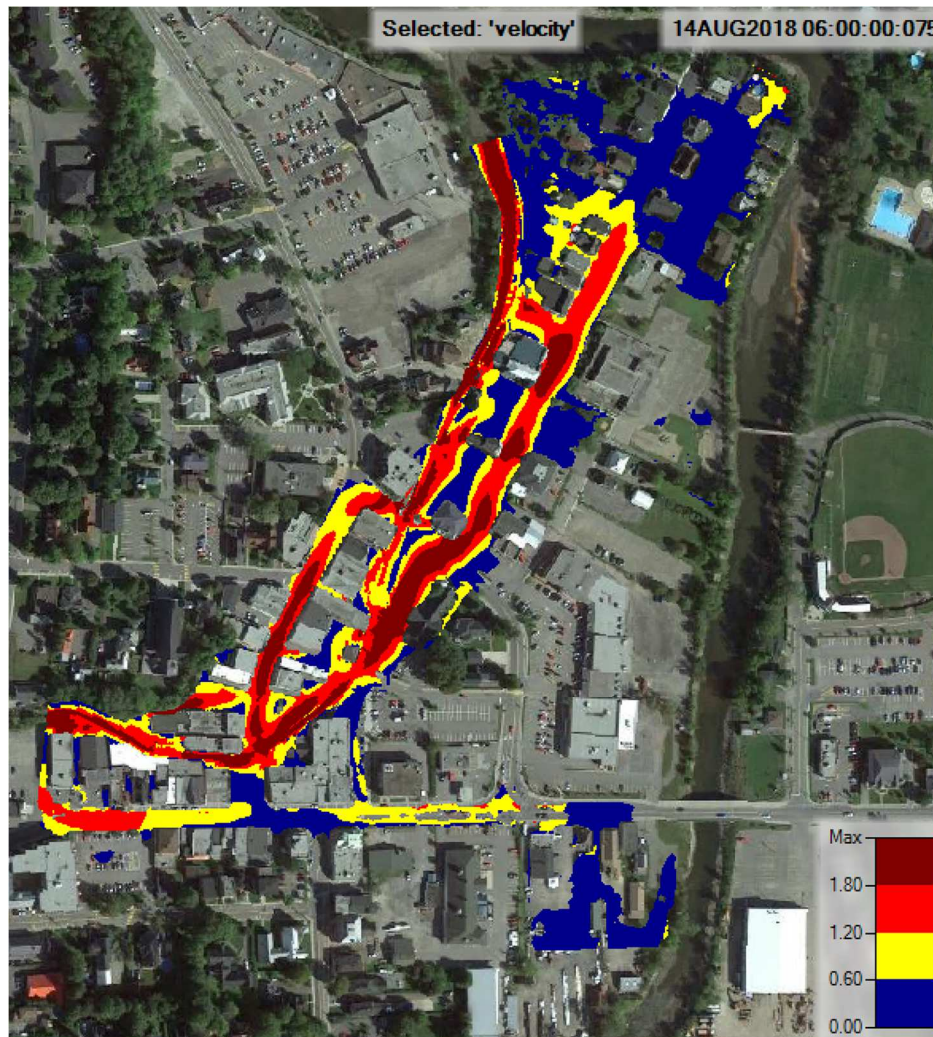


Figure 20 : Vitesses d'écoulement - Crue 100 ans (48,9 m³/s)

La littérature suggère que des vitesses supérieures à 1,2 m/s sont associées à un fort potentiel de dommages aux rues (Ribeiro Neto, 2016). Les résultats de la simulation de la crue 100 ans montrent ainsi une rue Child et une rue Saint-Jean-Baptiste à risque d'être endommagé. Toutefois, il est difficile de quantifier les coûts associés à ces dommages potentiels. Or, dans le cadre de ce travail, ce type de dommage est plutôt évalué par le biais d'une proportion du coût des dommages liés aux bâtiments. Les résultats de vitesses ne sont pas directement exploités, mais ils justifient qu'un coût supplémentaire est associé aux dommages aux rues.

Ces précédents résultats sont un exemple des informations hydrauliques que le modèle hydrodynamique fonctionnel du ruisseau Pratt est en mesure de produire. En plus d'indiquer les profondeurs et les vitesses d'écoulement des secteurs du centre-ville, le modèle pourrait être exploité pour identifier le risque de renversement des piétons ou celui de la perte de contrôle automobile ou celui du risque d'érosion. La figure 21 montre un exemple d'une carte de vulnérabilité de renversement humain pour la crue de 48,9 m³/s.

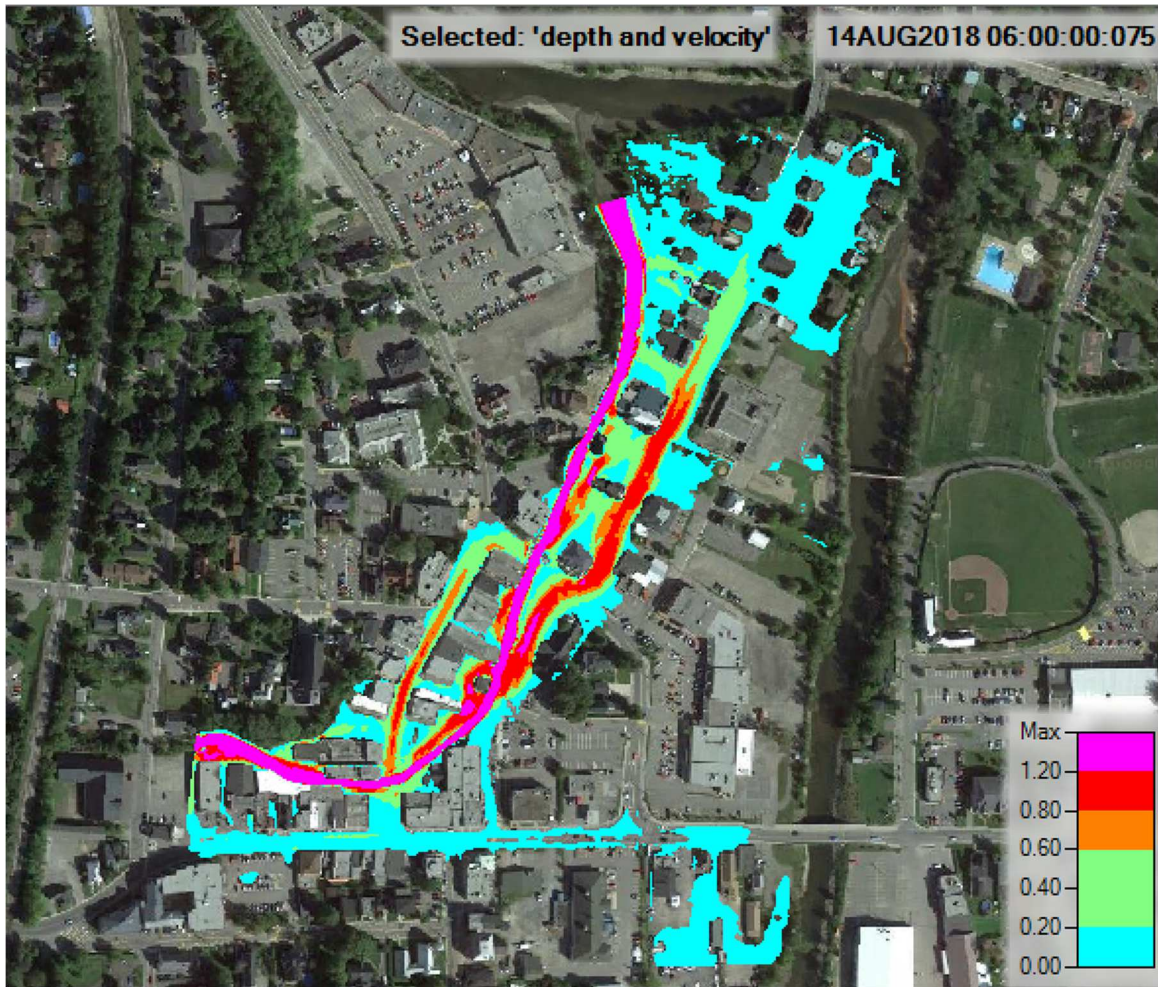


Figure 21 : Carte de vulnérabilité de renversement des piétons - Crue 100 ans (48,9 m³/s)

Les valeurs présentées sur la carte sont celles du débit unitaire (m²/s), soit le produit de la profondeur avec la vitesse ($d \cdot V$). Il s'agit d'un bon indicateur pour évaluer ce type de risque (Ribeiro Neto, 2016). La zone bleue présente un risque faible pour les personnes vulnérables (enfants et personnes âgées). Les zones en vert présentent un risque faible pour les adultes en bonne santé et un risque modéré pour les personnes vulnérables tandis que les zones orange présentent un risque modéré pour les adultes en bonne santé et un risque élevé pour les personnes vulnérables. Enfin, les zones rouges présentent un risque élevé pour tous. Ce résultat met en lumière le potentiel de danger du ruisseau Pratt. Les inondations de ce dernier ne représentent pas seulement un risque pour l'endommagement des bâtiments. Il peut s'avérer une menace pour la sécurité des personnes.

Une analyse approfondie de la vulnérabilité pour les piétons n'a pas été faite à partir des résultats de modélisation. Toutefois, le modèle hydrodynamique est fonctionnel et est à la disposition des organisations gouvernementales. Il s'avère un outil très performant qui pourrait être d'une grande utilité dans des études hydrauliques futures.

Submersion des bâtiments

Afin d'évaluer la submersion des seuils (porte, fenêtre ou porte de garage) des bâtiments du centre-ville, des points de référence au sol sont implantés dans Ras Mapper (figure 22) à proximité des emplacements des seuils qui ont été relevés (Parent, 2018).

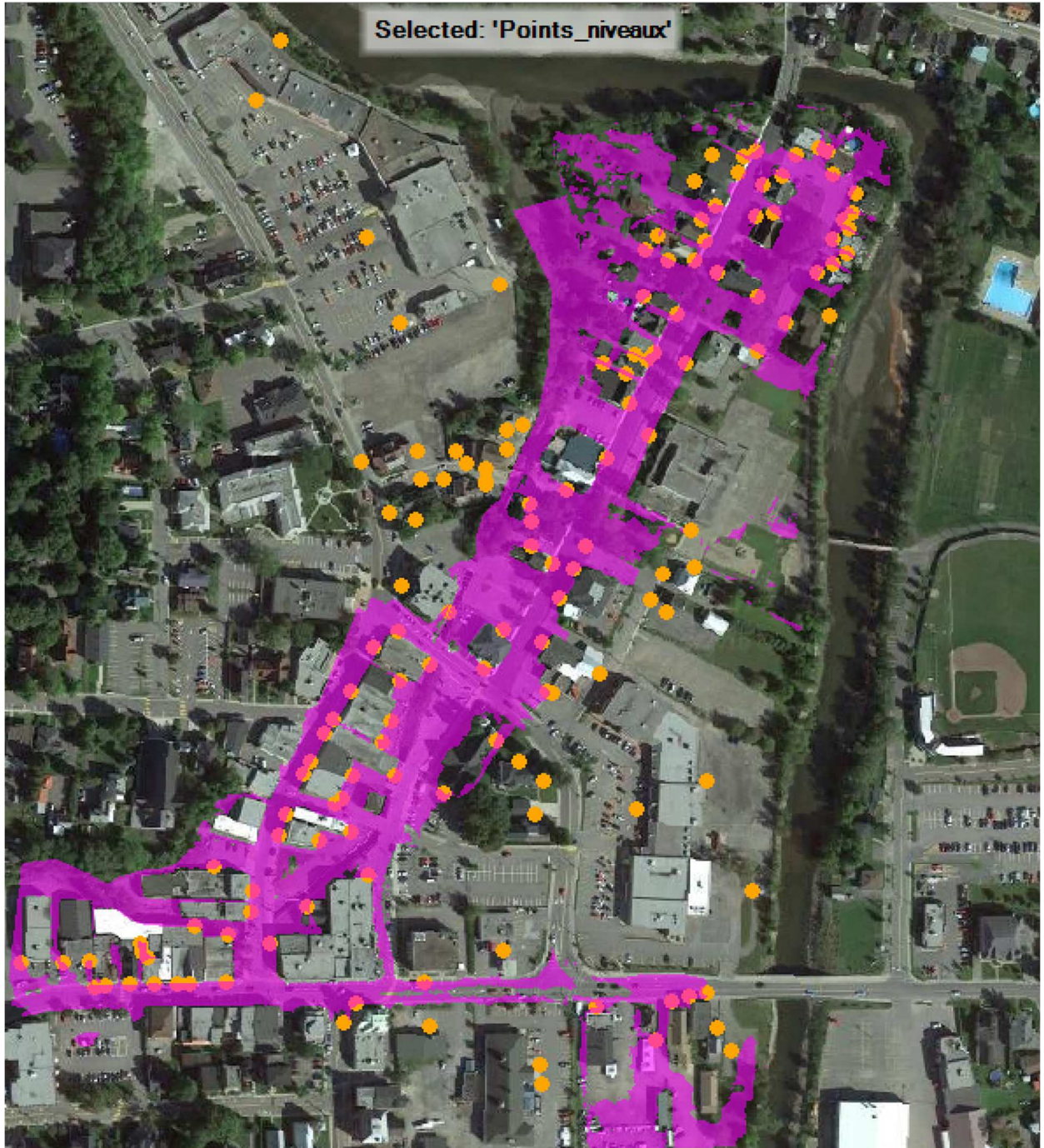


Figure 22 : Position des seuils des bâtiments du centre-ville
(avec couche d'élévation de l'eau de la crue 100 ans en mauve)

Ensuite, l'élévation de l'eau aux points de référence est extraite des cartes d'élévation de surface de l'eau. La différence de ces précédentes valeurs avec les élévations de seuils correspondants est finalement calculée pour identifier la hauteur de submersion des seuils. Dans le cadre de ce projet, le dommage probable au bâtiment est calculé à partir de courbes de dommages qui sont fonction de la submersion du rez-de-chaussée d'un bâtiment. Or, certains bâtiments comportent plus d'un seuil qui n'est pas forcément une porte d'entrée au rez-de-chaussée. Une conversion a donc été effectuée afin de transformer toutes les submersions de seuil en submersion par rapport au rez-de-chaussée. Lorsqu'il y avait plus d'un seuil submergé, la valeur transformée de submersion la plus importante était retenue. Le tableau 1 de l'annexe B montre les hauteurs de submersion associée à chacune des crues. Pour des fins de synthèse, la figure 23 présente la submersion du rez-de-chaussée de 5 seuils représentatifs des secteurs ciblés.

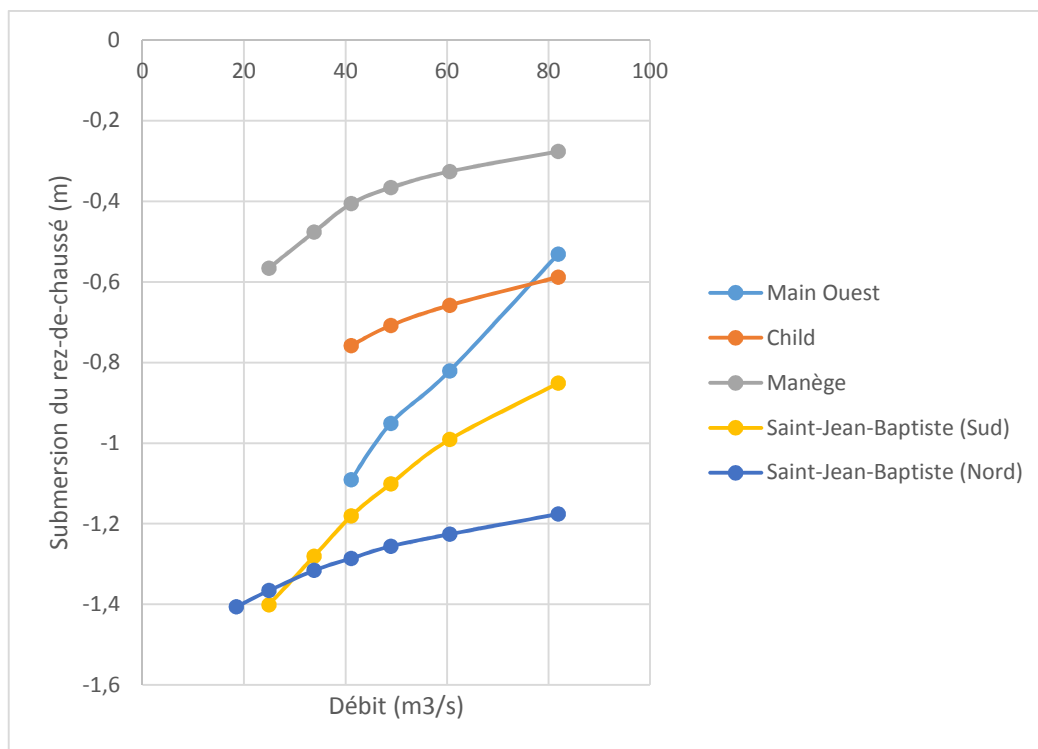


Figure 23 : Submersion du rez-de-chaussée de 5 seuils représentatifs des secteurs du centre-ville

Il est possible de remarquer que les bâtiments les plus exposés sont ceux près de la rue du Manège (arrière des bâtiments de la rue Child). Ils sont suivis des bâtiments sur Child puis de ceux sur Main Ouest et finalement de ceux au sud de la rue Saint-Jean-Baptiste puis de ceux au nord de la même rue. Bien entendu, certains bâtiments d'un secteur en moyenne moins exposée peuvent être plus exposés que ceux d'un secteur généralement plus exposé. De plus, un bâtiment d'une valeur marchande élevée peut générer plus de dommage qu'un bâtiment de valeur marchande faible, même si le premier est moins submergé et vice et versa. C'est d'ailleurs pour cette raison qu'il est difficile de faire une analyse spécifique du risque d'un

secteur à partir de la submersion uniquement. L'analyse du risque à partir de l'ensemble des bâtiments du centre-ville est définitivement préférable.

L'analyse de risque est présentée dans le rapport Morse et coll. 2019.

Conclusion

Le modèle hydraulique HEC-RAS-2D développé par l'Université Laval est complet et permet de produire des simulations d'écoulements satisfaisantes. Bien qu'il pourrait être amélioré une fois que plus de données de terrain deviennent disponibles, la reproduction de l'événement de 2015 est satisfaisante et le modèle est jugé adapté à la modélisation d'inondation en milieu urbain. Dans un contexte d'évaluation du risque, les résultats de simulation des crues fournissent toutes les données requises au calcul du dommage en fonction de la submersion.

Références

- Arcement, G. J., & Schneider, V. R. (1989). Guide for Selecting Manning's Roughness Coefficients for Natural Channels and Flood Plains. *United States Geological Survey Water-Supply Paper 2339*. Denver, CO, U.S.: United States Government Printing Office.
- Centre d'expertise hydrique du Québec. (2008). *Rivière Coaticook - Ville de Coaticook - Détermination des cotes de crues*. Québec: Bibliothèque et Archives nationales du Québec.
- Forest, T., & Morse, B. (2019). *Réduction du risque relié aux inondations du ruisseau Pratt dans la ville de Coaticook. Caractérisation de l'aléa*.
- Google. (2018, Janvier 15). *Coaticook*. Récupéré sur Google Maps: <https://www.google.com/maps/place/Coaticook,+QC/@45.1333784,-71.8076358,1173m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x4cb658b77f6dd3f9:0x47dd602da166ee76!8m2!3d45.1336856!4d-71.8039462>
- Morse, B., Forest, T., Roy-Poulin, G., & Ladouceur, J.-R. (2019). *Réduction du risque relié aux inondations du ruisseau Pratt dans la ville de Coaticook. Rapport préliminaire*.
- Parent, D. (2018). *Relevé d'altitude de bâtiments dans le centre-ville de Coaticook*. Coaticook.
- Ribeiro Neto, A. B. (2016). Methodologies for generation of hazard indicator maps and flood prone areas: municipality of Ipojuca/PE. *RBRH*, pp. 377-390.
- Roche Itée, Groupe-conseil. (2013). *Travaux d'aménagement du ruisseau Pratt*. Québec.
- US Army Corps of Engineers. (2016). *HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual*. Davis: US ARMY CORPS OF ENGINEERS.

Annexe B

Tableau 1 : Hauteur de submersion des rez-de-chaussée des bâtiments pour chacune des crues

Lot	Adresse	Q (m ³ /s)							
		10,6	18,5	24,9	33,8	41,1	48,9	60,5	81,9
0200-40-0665	S/O								-1,656
0200-10-4626	13 à 15 rue Child Coaticook			-0,545	-0,405	-0,315	-0,205	-0,105	0,085
0200-10-5745	35 rue Child Coaticook			-0,444	-0,314	-0,234	-0,164	-0,084	0,046
0200-00-8845	24 à 30 rue Child Coaticook			-0,574	-0,404	-0,324	-0,244	-0,144	0,026
0200-20-6727	87 rue Main Est Coaticook						-2,978	-2,948	-2,928
0100-90-9639	103 rue Main Ouest Coaticook						-1,17	-1,11	-0,95
0200-21-8668	99 rue Wellington Coaticook							-0,295	-0,145
0200-10-0319	29 rue Main Ouest Coaticook			-0,507	-0,357	-0,257	-0,177	-0,057	0,123
0200-00-9022	37 rue Main Ouest Coaticook	-2,405	-1,275	-0,535	-0,305	-0,165	-0,055	0,085	0,325
0200-00-6131	45 rue Main Ouest Coaticook				0,183	0,243	0,293	0,383	0,663
0200-00-8768	36 à 38 rue Child Coaticook					-0,758	-0,708	-0,658	-0,588
0200-22-6969	52 à 54 rue Chartier Coaticook		-0,159	-0,059	0,061	0,161	0,241	0,311	0,421
0200-34-4659	310 à 312 rue Saint-Jean-Baptiste Coaticook		-1,406	-1,366	-1,316	-1,286	-1,256	-1,226	-1,176
0200-43-3666	277 rue Saint-Pierre Nord Coaticook		-1,622	-1,582	-1,542	-1,512	-1,482	-1,452	-1,402
0299-39-6935	148 à 152 rue Main Est Coaticook					-0,565	-0,505	-0,425	-0,305

0299-39-8168	166 à 170 rue Main Est Coaticook									-0,345	-0,145
0200-22-2672	18 à 20 rue Chartier Coaticook										-4,265
0200-33-1968	246 rue Saint-Jean-Baptiste Coaticook			-1	-0,95	-0,91	-0,88	-0,84	-0,84	-0,77	
0200-33-1758	242 à 244 rue Saint-Jean-Baptiste Coaticook			-0,78	-0,72	-0,67	-0,64	-0,6	-0,6	-0,54	
0200-33-0209	196 à 216 rue Saint-Jean-Baptiste Coaticook		-0,757	-0,697	-0,617	-0,557	-0,507	-0,447	-0,447	-0,327	
0200-33-4594	264 rue Saint-Jean-Baptiste Coaticook		-1,046	-0,996	-0,956	-0,916	-0,886	-0,836	-0,836	-0,766	
0200-34-1130	284 rue Saint-Jean-Baptiste Coaticook			-0,909	-0,899	-0,889	-0,879	-0,859	-0,859	-0,819	
0200-34-2549	294 rue Saint-Jean-Baptiste Coaticook					-1,278	-1,248	-1,218	-1,218	-1,158	
0200-34-6979	328 à 330 rue Saint-Jean-Baptiste Coaticook						-0,762	-0,732	-0,732	-0,682	
0200-44-6265	333 rue Saint-Pierre Nord Coaticook		-1,092	-1,052	-1,012	-0,992	-0,962	-0,942	-0,942	-0,892	
0200-44-6226	315 rue Saint-Pierre Nord Coaticook			-0,706	-0,666	-0,636	-0,616	-0,586	-0,586	-0,536	
0200-44-5613	309 rue Saint-Pierre Nord Coaticook		-1,108	-1,068	-1,028	-0,998	-0,978	-0,948	-0,948	-0,898	
0200-43-4795	287 à 289 rue Saint-Pierre Nord Coaticook			-1,287	-1,247	-1,217	-1,197	-1,167	-1,167	-1,117	
0200-44-6737	321 rue Saint-Pierre Nord Coaticook					0,216	0,246	0,266	0,266	0,316	
0200-44-3576	341 à 345 rue Saint-Jean-Baptiste Coaticook					-1,238	-1,218	-1,188	-1,188	-1,138	
0200-44-1220	301 à 309 rue Saint-Jean-Baptiste Coaticook		-1,25	-1,21	-1,17	-1,14	-1,11	-1,09	-1,09	-1,04	
0200-33-9787	279 à 285 rue Saint-Jean-Baptiste Coaticook		-1,257	-1,217	-1,177	-1,137	-1,117	-1,087	-1,087	-1,037	
0200-32-9611	173 à 175 rue Saint-Pierre Sud Coaticook							-1,177	-1,177	-1,087	
0200-32-6711	165 rue Saint-Pierre Sud Coaticook							-1,236	-1,236	-1,176	

0200-21-4736	116 rue Wellington Coaticook								-0,74	-0,48
0299-19-9077	34 rue Main Est Coaticook							-0,56	-0,43	-0,23
0299-39-7576	158 à 164 rue Main Est Coaticook						-1,004	-0,894	-0,764	-0,564
0200-00-6714	51 à 53 rue Main Ouest Coaticook						-1,091	-0,951	-0,821	-0,531
0200-23-5802	41 à 43 rue Chartier Coaticook								-1,209	-1,089
0200-23-6914	49 rue Chartier Coaticook								-1,64	-1,5
0200-22-4976	30 à 36 rue Chartier Coaticook								-1,9	-1,78
0200-22-7449	164 rue Saint-Jean-Baptiste Coaticook			-1,401	-1,281	-1,181	-1,101	-0,991	-0,851	
0200-22-4535	155 rue Child Coaticook			-2,565	-2,395	-2,305	-2,275	-2,255	-2,375	
0200-33-1343	228 à 236 rue Saint-Jean-Baptiste Coaticook		-0,537	-0,467	-0,377	-0,307	-0,247	-0,177	-0,057	
0200-34-5410	288 rue Saint-Jean-Baptiste Coaticook		-1,015	-0,975	-0,925	-0,895	-0,865	-0,825	-0,765	
0200-32-8278	211 rue Saint-Jean-Baptiste Coaticook				-1,027	-0,987	-0,947	-0,897	-0,817	
0200-33-7744	249 rue Saint-Jean-Baptiste Coaticook					-1,107	-1,067	-1,027	-0,947	
0200-44-2443	317 à 321 rue Saint-Jean-Baptiste Coaticook		-1,525	-1,245	-1,205	-1,175	-1,155	-1,125	-1,085	
0200-21-1088	137 rue Child Coaticook			-0,591	-0,481	-0,411	-0,381	-0,351	-0,311	
0200-00-5517	65 à 69 rue Main Ouest Coaticook						-0,844	-0,764	-0,494	
0200-32-1216	161 rue Saint-Jean-Baptiste Coaticook				-2,94	-2,86	-2,78	-2,68	-2,54	
0200-21-9988	133 à 137 rue Saint-Jean-Baptiste Coaticook				-1,262	-1,162	-1,062	-0,942	-0,772	
0200-21-4995	119 à 127 rue Wellington Coaticook				-1,012	-0,922	-0,832	-0,722	-0,522	

0299-29-5912	96 rue Main Est Coaticook								-0,32	-0,14
0200-21-0680	125 à 129 rue Child Coaticook				-0,39	-0,28	-0,19	-0,14	-0,09	-0,04
0200-11-8633	93 à 95 rue Child Coaticook				-0,566	-0,476	-0,406	-0,366	-0,326	-0,276
0200-11-9044	103 rue Child Coaticook					-0,481	-0,431	-0,371	-0,331	-0,271
0200-11-9762	111 à 123 rue Child Coaticook					-0,545	-0,455	-0,405	-0,355	-0,305
0200-11-8819	85 à 91 rue Child Coaticook					-0,396	-0,316	-0,256	-0,206	-0,146
0200-11-6913	79 à 83 rue Child Coaticook					-0,59	-0,51	-0,45	-0,39	-0,31
0200-10-6793	65 à 69 rue Child Coaticook					-0,566	-0,496	-0,436	-0,366	-0,286
0200-10-6285	57 à 63 rue Child Coaticook					-0,589	-0,479	-0,399	-0,289	-0,159
0200-00-4318	75 à 77 rue Main Ouest Coaticook							-1,791	-1,741	-1,651
0200-00-2337	85 à 93 rue Main Ouest Coaticook							-0,603	-0,493	-0,363
0299-29-2577	58 rue Main Est Coaticook						-1,021	-0,951	-0,901	-0,801