

Réduction du risque relié aux inondations dans la ville de Saint-Raymond

Sous-projet 2 : Rapport final sur la quantification du risque actuel lié aux inondations

12 décembre 2017

Travail réalisé pour :
Ministère de la Sécurité publique
À l'attention de monsieur Raynald Chassé, directeur
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

Téléphone : 418 656 2867
Courriel : brian.morse@gci.ulaval.ca

Réalisation des travaux

Benoit Turcotte, Professionnel de recherche

Brian Morse, Professeur

Laurence Marois, Stagiaire et étudiante au baccalauréat

Département de génie civil et de génie des eaux, Université Laval

Pour des fins de citations

Turcotte, B., Morse, B., Marois, L., 2017. Réduction du risque relié aux inondations dans la ville de Saint-Raymond. Sous-projet 2 : Rapport final sur la quantification du risque actuel lié aux inondations, présenté au ministère de Sécurité publique. 12 décembre. 59 p.

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 [CPS 15-16-08] par une contribution financière de 682 700 \$.

Résumé exécutif

La ville de Saint-Raymond est fréquemment affectée par des inondations. L'Université Laval a été contactée par la Ville de Saint-Raymond, puis mandatée par le ministère de la Sécurité publique du Québec (MSP) afin d'identifier des mesures de mitigation efficaces et rentables afin de répondre à ce problème récurrent. Ce rapport présente le calcul du risque lié aux inondations pour la période 1977-2016.

Le risque, ou dommage moyen annuel (DMA), est calculé en combinant la vulnérabilité (courbes Élévation du niveau d'eau – dommages) et l'aléa (courbes Élévation du niveau d'eau - fréquence). Pour réaliser des analyses représentatives, le centre-ville de Saint-Raymond a été divisé en 11 secteurs qui tiennent compte de la distribution spatiale des niveaux d'eau lors d'inondations.

L'analyse des dommages de deux bases de données (MSP et CAPSA) associées à l'inondation de 2014 a mis en évidence que les dommages résidentiels proviennent majoritairement des bâtiments (62-73 %), puis des biens matériels (10-23 %) et des travaux d'urgence (14 %). La rive sud a subi davantage de dommages que la rive nord, majoritairement dans les secteurs Saint-Hubert (23 %), École-Hôtel de Ville (17 %), Saint-Louis Sud (15 %) et Des Ormes Pont Nord (15 %). De plus, une différence importante a été observée entre les dommages répertoriés par le MSP (1 839 k\$) et ceux de la CAPSA (3 485 k\$) pour cet événement. Dans 80 % des cas, les valeurs CAPSA étaient supérieures à celle MSP. Les bases de données ont été combinées pour obtenir des dommages totaux de 4 431 k\$ pour ce seul événement.

Par la suite, des courbes niveaux d'eau - dommages établies pour la province de Québec par Bonnifait (2005) ont été testées et comparées avec les dommages attendus. Puisque les dommages obtenus étaient largement supérieurs aux dommages observés, de nouvelles courbes (Marois) ont été créées et une nouvelle fonction d'applicabilité des courbes a été développée pour tenir compte de l'adaptation déjà en place. L'événement de 2014 a servi à l'ajustement de ces courbes pour différents types de construction. L'événement de 2012 a servi à valider le modèle (les résultats étaient satisfaisants), qui a par la suite été utilisé pour le calcul du DMA.

Du côté de l'aléa, des courbes de niveau d'eau – fréquence ont été développées pour les 11 secteurs du centre-ville pour les inondations à l'eau libre, pour les inondations lors de la formation du couvert de glace et pour les inondations par embâcle lors de la débâcle, principalement printanière. Plusieurs modèles ont été utilisés et une quantité importante de données de terrain ont servi à la conception, à la calibration et à la validation des différentes courbes. Les Figures 10, 15 et 18 présentent les résultats. La Figure 19 présente les courbes superposées et la fréquence combinées des trois aléas pour les 11 secteurs du centre-ville. Il est à noter que ces courbes ne sont pas conçues sur les bases de modélisations hydrodynamiques, mais bien dérivées directement ou indirectement de niveaux d'eau mesurés au cours des dernières années et sur une connaissance exemplaire de la rivière Sainte-Anne suite à plusieurs années d'observation et de suivi.

Le risque, ou dommage moyen annuel (DMA), total pour le centre-ville de Saint-Raymond est calculé à 929 000\$. Les secteurs des Ponts, sur la rive nord et la rive sud de la rivière Sainte-Anne sont les plus à risque (84% du DMA) et ce pour différentes raisons (valeur des structures et bâtiments, élévations relativement basses des premiers planchers, digues relativement inefficaces par leur distribution spatiale et par leur élévation). Le calcul du DMA sert à établir la rentabilité financière des mesures de mitigation selon leur potentiel à le réduire.

Table des matières

Réalisation des travaux	ii
Pour des fins de citations	ii
Note.....	ii
Résumé exécutif.....	iii
Liste des figures.....	vi
Liste des tableaux.....	viii
1. Mise en contexte.....	1
2. Objectifs	1
3. Méthodologie.....	1
3.1 Analyse de la vulnérabilité	2
3.2 Analyse de l'aléa.....	2
3.2.1 Relation niveau d'eau – fréquence à l'eau libre.....	2
3.2.2 Relation niveau d'eau – fréquence lors de la formation du couvert de glace	2
3.2.3 Relation niveau d'eau – fréquence lors de la débâcle	3
4. Analyse et résultats : Relation niveau d'eau - dommages	4
4.1. Analyse de données du MSP	4
4.2 Analyse des données de la CAPSA et du Comité Rivière.....	7
4.3 Comparaison des dommages	10
4.4 Courbes niveau d'eau – dommages pour les résidences et commerces	13
4.5 Courbes niveau d'eau – dommages pour la résidence Estacade.....	16
4.6 Courbes niveau d'eau – dommages pour les ponts et digues	16
4.7 Courbes niveau d'eau – dommages pour les véhicules	17
4.8 Dommages sociaux et risque pour les personnes.....	17
4.9 Dommages totaux et courbe niveau d'eau – dommages par secteur	17
4.10 Test de validation des courbes.....	18
5. Analyse et résultats : Relation niveau d'eau - fréquence	20
5.1 Courbes niveau d'eau – fréquence pour les inondations à l'eau libre.....	20
5.2 Courbes niveau d'eau – fréquence pour les inondations du début de l'hiver.....	22
5.3 Courbes niveau d'eau – fréquence pour les inondations de la débâcle	25

5.4 Courbe globale de niveaux d'eau – fréquence.....	28
6. Analyse et résultats : Risque et dommage moyen annuel.....	31
7. Conclusion et suite du projet	35
Remerciements	37
Références.....	38
Annexe 1 : Programme général d'aide financière lors de sinistres réels ou imminents (MSP, 2015)	39
Annexe 2 : Liste détaillée des exclusions au programme d'aide financière du gouvernement du Québec, Appendice L (MSP, 2015)	41
Annexe 3 : Questions du sondage du comité rivière (CAPSA, 2015)	43
Annexe 4 : Questions du recensement de la CAPSA (CAPSA, 2015)	44
Annexe 5 : Courbes Marois	48
Annexe 6 : Courbes ajustées à la première ouverture.....	50

Liste des figures

Figure 1. Localisation des 11 secteurs du centre-ville de Saint-Raymond	2
Figure 2 : Répartitions des bâtiments et des dommages selon la hauteur de submersion (MSP)	6
Figure 3 : Pourcentage d'endommagement du secteur (MSP).....	6
Figure 4 : Répartition des bâtiments et des dommages selon la hauteur de submersion (CAPSA)	9
Figure 5 : Pourcentage d'endommagement du secteur (CAPSA)	9
Figure 6 : Ratio MSP/CAPSA	11
Figure 7 : Probabilité qu'un bâtiment soit endommagé en fonction de la hauteur de submersion du rez-de-chaussée	15
Figure 8. Courbes de niveaux d'eau – dommages pour les 11 secteurs du centre-ville de Saint-Raymond	18
Figure 9. Courbes de tarage pour les 5 endroits du centre-ville, incluant les données des années passées et les données des crues de l'automne 2017.	21
Figure 10. Courbes niveau d'eau – fréquence pour les 5 endroits de mesure du centre-ville de Saint-Raymond avec la présence du Pont Tessier (clapet École), du Pont Chalifour (Clapet des Ormes) et des digues (situés seulement entre le clapet École et le Clapet St-Louis car les élévations des digues plus en aval sont à des élévations inférieures).....	21
Figure 11. Sortie du modèle de production, transport et déposition de glace dans la rivière Sainte-Anne à un pas de temps journalier pour l'hiver 2015-2016. Le centre-ville est affecté par la glace simulée par la ligne bleu foncé. Il existe 40 graphiques similaires pour les 40 hivers de 1977 à 2017.	22
Figure 12. Accumulation maximale de glace simulée entre novembre et février au centre-ville de Saint-Raymond pour 40 hivers consécutifs.	23
Figure 13. Modélisation des relations Y-Q au clapet Saint-Louis pour différente accumulation de frasil, basé sur des Q estimés et sur des niveaux d'eau mesurés entre 2009 et 2017. Il existe 5 graphiques similaires pour les 5 endroits du centre-ville où des mesures de niveaux d'eau ont été effectuées depuis 2009.	23
Figure 14. Débit (Q) mesuré à Chute-Panet, quantité de glace accumulée telle que simulée par les modèles et niveaux d'eau mesurés et simulés pour l'hiver 2015-2016 au pied du barrage Estacade. Il existe 200 graphiques similaires pour les 5 sites et 40 hivers consécutifs de 1977 à 2017.	24
Figure 15. Courbes niveau d'eau – fréquence au début de l'hiver pour les 5 endroits de mesure du centre-ville de Saint-Raymond avec la présence du Pont Tessier (clapet École), du Pont Chalifour (Clapet des Ormes) et des digues (situées entre le clapet École et le Clapet St-Louis).	25
Figure 16. Modèle de d'intensité de débâcle printanière des glaces montrant deux scénarios passés : le printemps 2013 avec des crues modérées se limitant à la zone verte (intensité 1/5) et le printemps 2014 avec une crue majeure atteignant la zone rouge foncée (intensité de 5/5). Il existe 41 graphiques similaires pour les printemps 1977 à 2017.	26

Figure 17. Relation entre l'indice d'intensité de la débâcle tel qu'évalué au Tableau 18 et les niveaux d'eau mesurés au clapet St-Louis depuis le printemps 2009. Les lignes rouge et verte représentent des limites pour chaque indice. Il existe 5 graphiques identiques pour les 5 endroits du centre-ville où les niveaux d'eau ont été récemment mesurés.	28
Figure 18. Courbe niveau d'eau – fréquence en présence d'embâcles pour le centre-ville de Sainte-Raymond.	28
Figure 19. Relations niveau d'eau – fréquence globale, à l'eau libre, lors de la formation de la glace et lors de la débâcle pour les 11 secteurs du centre-ville.	30
Figure 20. Risque (DMA) distribué et cumulatif pour chaque secteur du centre-ville de Saint-Raymond.....	33
Figure 21 : Taux d'endommagement pour 1 étage sans sous-sol.....	48
Figure 22 : Taux d'endommagement pour 1 étage avec sous-sol	48
Figure 23 : Taux d'endommagement pour 2 étages ou plus sans sous-sol	49
Figure 24 : Taux d'endommagement pour 2 étages ou plus avec sous-sol	49
Figure 25 : Taux d'endommagement pour 1 étage sans sous-sol.....	50
Figure 26 : Taux d'endommagement pour 1 étage avec sous-sol	50
Figure 27 : Taux d'endommagement pour 2 étages ou plus sans sous-sol	51
Figure 28 : Taux d'endommagement pour 2 étages ou plus avec sous-sol	51

Liste des tableaux

Tableau 1 : Niveaux d'eau de 2014 pour chaque zone	4
Tableau 2 : Répartition des différents types de dommages (MSP).....	4
Tableau 3 : Répartition des dommages dans les secteurs (MSP)	5
Tableau 4 : Pourcentage de bâtiments endommagés selon la hauteur de submersion RDC.....	7
Tableau 5 : Répartition des différents types de dommages (CAPSA)	7
Tableau 6 : Répartition des dommages dans les différentes zones (CAPSA).....	8
Tableau 7 : Pourcentage de bâtiments endommagés selon la hauteur de submersion RDC.....	9
Tableau 8 : Comparaison des dommages MSP et CAPSA pour les zones	11
Tableau 9 : Dommages (Dom.) identifiés par le MSP et la CAPSA pour chaque secteur (k\$).....	12
Tableau 10 : Estimation des dommages	13
Tableau 11 : Comparaison des dommages recueillis et simulés (k\$).....	16
Tableau 12 : Comparaison des dommages totaux estimés et simulés	18
Tableau 13 : Niveau d'eau observé en 2012 pour chaque zone	19
Tableau 14 : Dommages simulés totaux pour l'événement de 2012	19
Tableau 15. Débits instantanés de récurrence 2 ans à 100 ans à Chute-Panet.....	20
Tableau 16. Données permettant de tracer les courbes de tarage (niveau d'eau – débit) à 5 endroits du centre-ville de Saint-Raymond sur la rivière Sainte-Anne.....	20
Tableau 17. Échelle d'intensité de la résistance du couvert de glace au centre-ville de Saint- Raymond basé sur la quantité de frasil présente avant la débâcle, tel qu'estimé par le modèle donc les résultats sont présentés à la Figure 12.....	26
Tableau 18. Indice d'intensité de la crue printanière, de la résistance du couvert de glace et de l'intensité de la débâcle pour les printemps 1977 à 2017 (les * sont des ajustements qui tiennent compte d'autres paramètres hivernaux tels que les crues et les degrés-jours de gel cumulés).....	27
Tableau 19. Point bas des digues par secteur.....	31
Tableau 20. DMA de chaque secteur et DMA total pour le centre-ville de Saint-Raymond	33
Tableau 21. Distribution du DMA selon l'aléa inondation.....	34

1. Mise en contexte

La ville de Saint-Raymond est fréquemment affectée par des inondations dues par la rivière Sainte-Anne et/ou la rivière Bras du Nord et qui sont causées par trois aléas :

- Les crues à l'eau libre ;
- Les rehaussements du niveau d'eau au début de l'hiver lors de la formation du couvert de glace ;
- Les rehaussements du niveau d'eau au milieu ou à la fin de l'hiver pendant la débâcle.

Au cours, des dernières années, trois événements ont causé des dommages importants :

- Les inondations par le frasil et les crues du début de l'hiver 2003-2004 ;
- La débâcle printanière de mars 2012 ;
- La débâcle printanière d'avril 2014

L'Université Laval a été contactée par la Ville de Saint-Raymond, puis mandatée par le ministère de la Sécurité publique du Québec (MSP) afin d'identifier des mesures de mitigation efficaces et rentables afin de répondre à ce problème récurrent. Le présent rapport présente le calcul du risque lié aux inondations pour la période 1977-2016 dont les résultats serviront à établir la rentabilité financière des mesures de mitigation à mettre en place.

2. Objectifs

Les objectifs du présent rapport sont de :

- Générer des courbes de niveau d'eau – dommages pour 11 secteurs du centre-ville de Saint-Raymond afin de déterminer la vulnérabilité ;
- Effectuer une analyse de données et de modèles hydrologiques et glaciels afin d'établir des courbes de niveau d'eau - fréquence : (1) à l'eau libre, (2) lors de la formation du couvert de glace et (3) lors de la débâcle pour les 11 secteurs du centre-ville afin de quantifier l'aléa ;
- Combiner ces deux séries de courbes afin de déterminer le risque et le dommage moyen annuel (DMA) global pour le centre-ville de Saint-Raymond

3. Méthodologie

3.1 Secteurs à l'étude

Le centre-ville de Saint-Raymond a été divisé en 11 secteurs pour tenir compte de la distribution spatiale des niveaux d'eau (le niveau d'eau en amont étant plus élevé qu'en aval, peu importe l'aléa). Ces 11 secteurs sont présentés à la Figure 1 :

- | | |
|---------------------------------------|-------------------------------|
| 1. L'Espérance – aval du centre-ville | 5. Saint-Louis |
| 2. Saint-Hubert | 6. Estacade – aval sud |
| 3. Ponts – centre-ville | 7. Saint-Hubert- nord |
| 4. École – Hôtel de Ville | 8. Des Ormes – nord des ponts |

9. École - nord
10. Saint-Louis - nord

11. Estacade – aval nord

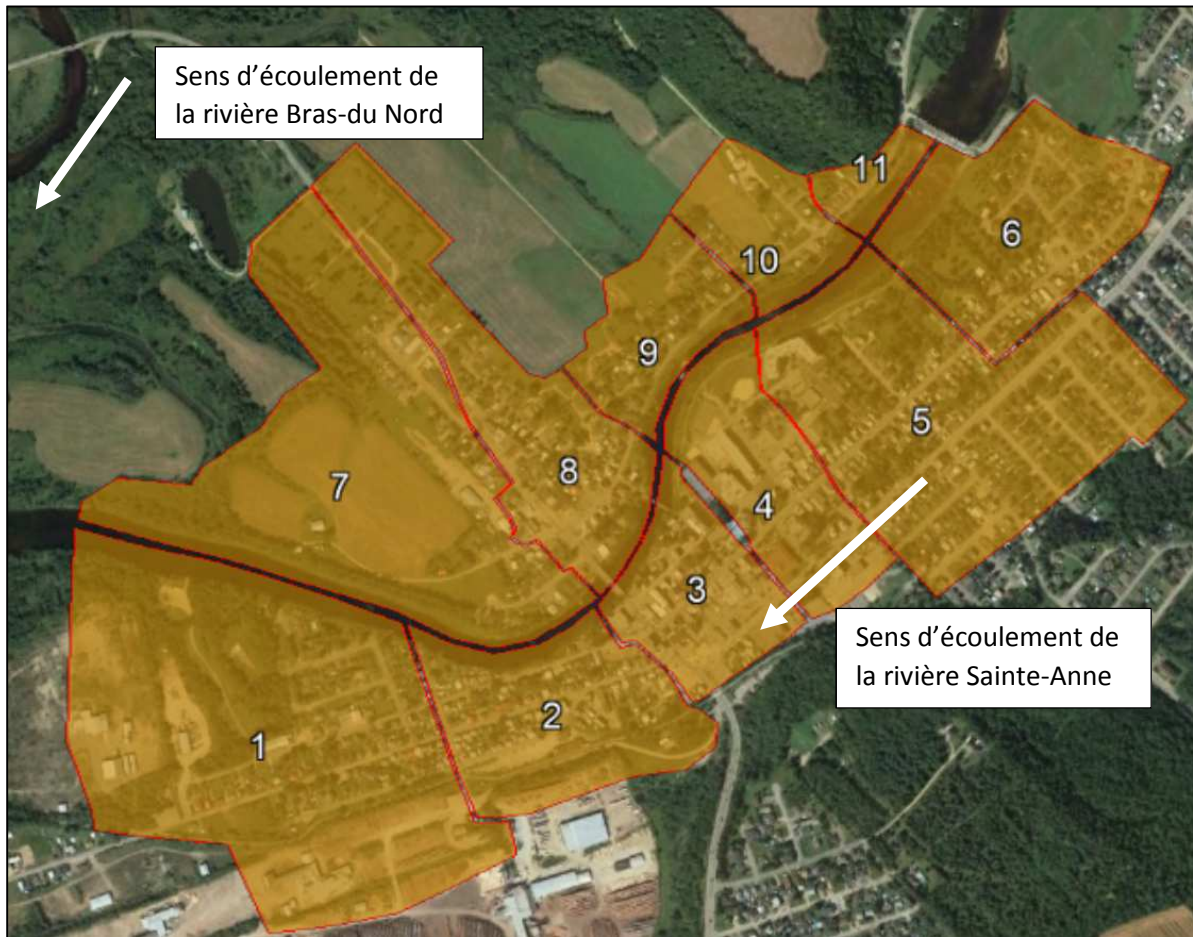


Figure 1. Localisation des 11 secteurs du centre-ville de Saint-Raymond

3.2 Analyse de la vulnérabilité

L'analyse de la vulnérabilité a été faite en réalisant les activités suivantes :

- Utiliser les données d'élévation des premiers planchers et des ouvertures les plus basses de chaque résidence et commerce du secteur du centre-ville, telles que fournies par le MSP (au total 651 bâtiments).
- Utiliser les valeurs foncières de chaque résidence et commerce telles que disponibles en ligne.
- Générer des courbes de submersion - taux d'endommagement à l'aide des données de dommages recueillies par le Comité Rivière et la CAPSA ainsi que des données d'aides financières du MSP pour l'événement de 2014 et ce, pour chaque secteur du centre-ville :
 - Les niveaux d'eau atteints pour chaque secteur sont déterminés avec les relevés effectués par la ville de Saint-Raymond, les photos, les témoignages et la carte topographique;

- La hauteur de submersion (c'est-à-dire la hauteur d'eau) est évaluée par rapport au rez-de-chaussée (valeur positive = eau au-dessus du plancher, valeur négative = eau en-dessous du plancher);
- Le taux d'endommagement est obtenu en divisant les dommages par la valeur foncière du bâtiment.
- Utiliser les données de l'événement de 2012 à des fins de validation.

3.3 Analyse de l'aléa

L'analyse de l'aléa a été faite en réalisant les activités suivantes détaillées dans les paragraphes qui suivent.

3.3.1 Relation niveau d'eau – fréquence à l'eau libre

- Identifier les débits moyens journaliers maximaux à la station Chute-Panet (050408) pour la période 1966-2017.
- Pour les années pour lesquelles le débit instantané est disponible, calculer le facteur de pointe.
- Calculer la moyenne et la plage des facteurs de pointes réels.
- Choisir, au hasard, un facteur de pointe parmi cette plage et l'appliquer aux années pour lesquelles le débit instantané n'était pas disponible.
- Mettre les données de 1966-2017 en ordre croissant et évaluer, visuellement, la meilleure distribution entre les options suivantes : Normal, Log-Normal, Pearson Type III.
- Déterminer un total de 9 séries, en faisant varier le facteur de pointe pour les années durant lesquelles cette information n'est pas disponible, pour évaluer une moyenne des débits de récurrence 2, 5, 10, 20, 50 et 100 ans.
- Obtenir les élévations du niveau d'eau à l'eau libre à 5 endroits du centre-ville (4 clapets instrumentés de la Ville et 1 site instrumenté par l'Université Laval durant 3 ans) pour toutes les crues à l'eau libre possibles (14 à 24 événements depuis 2009 avec des débits de 170 m³/s à 750 m³/s à Chute-Panet).
- Interpoler des relations niveau d'eau – débits à chaque endroit
- Établir la relation niveau d'eau – fréquence à chaque endroit.
- Établir une relation équivalente en rivière vis-à-vis chacun des 11 secteurs du centre-ville (Figure 1).

3.3.2 Relation niveau d'eau – fréquence lors de la formation du couvert de glace

- Utiliser le modèle de Turcotte et Morse (2016) mis à jour afin de produire des séries journalières d'accumulation de glace (frasil, sloche de neige, glace) dans le centre-ville de Saint-Raymond (le long des 11 secteurs présentés à la Figure 1) de l'hiver 1976-1977 à 2016-2017.
- Identifier tous les pics de niveaux d'eau entre novembre et février à 5 endroits du centre-ville (4 clapets instrumentés de la Ville et 1 site instrumenté par l'Université Laval durant 3 ans) à partir de 2009.
- Définir des relations empiriques entre :
 - Les niveaux d'eau et la quantité de frasil pour chaque endroit lorsque le débit est bas;
 - Les niveaux d'eau, la quantité de frasil et le débit lors des crues du début de l'hiver.
- Développer un modèle qui simule le niveau d'eau en fonction de la quantité de glace estimée et du débit estimé à la station 050408 du MDDELCC pour chaque endroit à un pas

de temps journalier de 1976 à 2007, calibrer ce modèle à l'aide des données journalière de 2015-2016, et retirer les niveaux d'eau maximums pour chaque année et pour chaque endroit.

- Mettre les données mesurées et estimées de niveaux d'eau de 1976 à 2017 en ordre croissant et évaluer, visuellement, la meilleure distribution entre les options suivantes : Normal, Log-Normal, Pearson Type III.
- Déterminer les niveaux d'eau de période de retour de 2, 5, 10, 20, 50 et 100 ans au début de l'hiver et établir la relation niveau d'eau – fréquence à chaque endroit.
- Établir une relation équivalente en rivière vis-à-vis chacun des 11 secteurs du centre-ville (Figure 1).

3.3.3 Relation niveau d'eau – fréquence lors de la débâcle

- Utiliser le modèle de prévision des embâcles développé par Morse et Turcotte (2018) pour la rivière Sainte-Anne à Saint-Raymond et définir 6 zones d'intensité de débâcles (de 0 à 5, d'intensité croissante).
- Pour les hivers 1976-77 à 2016-2017, identifier la zone d'intensité maximale correspondant aux séries de données journalières de débit et de degrés jours de dégel cumulés.
- Développer un second indice, celui-ci de résistance potentielle du couvert de glace, de 0 à 5, qui tient compte de la quantité de frasil, de glace et de neige présente au centre-ville au mois de février de chaque hiver et qui affecte la dynamique de la débâcle.
- Pour chaque printemps de 1977 à 2017, définir des indices finaux d'intensité potentielle de la débâcle qui tiennent compte des deux indices définis précédemment.
- En utilisant les données d'élévation du niveau d'eau mesurées à 5 endroits du centre-ville (4 clapets instrumentés de la Ville et 1 site instrumenté par l'Université Laval durant 3 ans) entre 2009 et 2017, définir des plages de niveaux d'eau possibles en fonction de l'intensité potentielle de la débâcle.
- Utiliser ces plages pour évaluer, pour les printemps durant lesquels les données de niveaux n'étaient pas mesurées, un total de 9 simulations de niveaux d'eau possibles.
- Classer les séries de niveaux d'eau mesurés et simulés en ordre croissant et évaluer visuellement, la meilleure distribution entre les options suivantes : Normal, Log-Normal, Pearson Type III.
- Déterminer les niveaux d'eau moyens de période de retour de 2, 5, 10, 20, 50 et 100 ans lors de la débâcle et établir la relation niveau d'eau – fréquence à chaque endroit.
- Établir une relation équivalente en rivière vis-à-vis chacun des 11 secteurs du centre-ville (Figure 1).

4. Analyse et résultats : Relation niveau d'eau - dommages

Les niveaux d'eau moyens observés lors de l'événement 2014 pour chaque secteur sont présentés dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Niveaux d'eau de 2014 pour chaque zone

Numéro	Secteur	Niveau d'eau 2014 (m)
1	L'Espérance – aval du centre-ville	137,0
2	Saint-Hubert	138,2
3	Ponts – centre-ville	138,2
4	École – Hôtel de Ville	138,6
5	Saint-Louis	138,8
6	Estacade – aval sud	139,1
7	Saint-Hubert - nord	136,8
8	Des Ormes – nord des ponts	137,0
9	École - nord	137,5
10	Saint-Louis - nord	137,9
11	Estacade – aval nord	138,0

4.1. Analyse de données du MSP

Pour l'événement de 2014, il y a 124 dossiers (particuliers et entreprises) pour lesquels le MSP a versé une aide financière comprenant des dommages au bâtiment pour un total d'environ 1 839 k\$ (1 839 000\$). La répartition des types de dommages pour ces 127 dossiers est présentée au Tableau 2.

Tableau 2 : Répartition des différents types de dommages (MSP)

Types de dommages	Nombre de dossiers	Dommages (k\$)	% des dommages totaux
Bâtiment	105	1 138	62
Hébergement	24	35	2
Biens et meubles	73	189	10
Mesures préventives	76	12	1
Travaux d'urgence	102	252	14
Autre	19	213	11
Total	s/o	1 839	100

Une description du programme d'aide financière est présentée aux Annexes 1 et 2. Les autres dommages (avant dernière ligne du Tableau 2) comprennent les travaux d'immunisation, la réparation des chemins d'accès, les frais d'ingénierie, le bris mécanique du couvert de glace et d'autres dommages non catégorisés. Les dommages aux bâtiments (62 %) et les travaux d'urgence (14 %) sont les plus importants. Les aides pour mesures préventives sont nombreuses, mais le montant total étant petit, elles représentent une très petite portion des dommages totaux.

Certains secteurs ont été davantage affectés par les inondations que d'autres. La répartition des dommages par secteur est présentée dans le Tableau 3.

Tableau 3 : Répartition des dommages dans les secteurs (MSP)

	Secteur	Nombre de dossiers	Dommages (k\$)	% des dommages totaux
1-2	L'Espérance – aval du centre-ville et Saint-Hubert	24	698	38
3	Ponts – centre-ville	6	52	3
4	École – Hôtel de Ville	11	393	21
5	Saint-Louis	28	260	14
6	Estacade – aval sud	5	97	5
	Total sud	74	1 500	81
7	Saint-Hubert - nord	11	50	3
8	Des Ormes – nord des ponts	23	205	11
9	École - nord	5	12	1
10	Saint-Louis - nord	11	72	4
11	Estacade – aval nord	0	0	0
	Total nord	50	339	19
	Total	124	1 839	100

Trois zones représentent 73 % de l'ensemble des dommages réclamés, soit Saint-Hubert (38 %), École - Hôtel de Ville (21 %) et Saint-Louis (14 %). Les coûts des travaux préventifs et de bris du couvert de glace sont inclus dans la zone École-Hôtel de Ville, d'où le montant élevé. Beaucoup de dossiers (23) sont situés dans la zone Des Ormes Ponts – Nord des ponts. La zone avec le plus haut taux de réclamation est la zone Saint-Louis Nord, où 28 dossiers ont été présentés.

La répartition cumulative des bâtiments endommagés et des dommages associés a été évaluée en fonction de la hauteur de submersion du rez-de-chaussée (Figure 2). Cette figure se lit comme suit : par exemple pour une hauteur de submersion du RDC de -0,50 m (c'est-à-dire que le niveau d'eau est 0,50 m en-dessous du rez-de-chaussée), on constate que 53% cumulatifs des dommages sont atteints pour 60% des bâtiments endommagés.

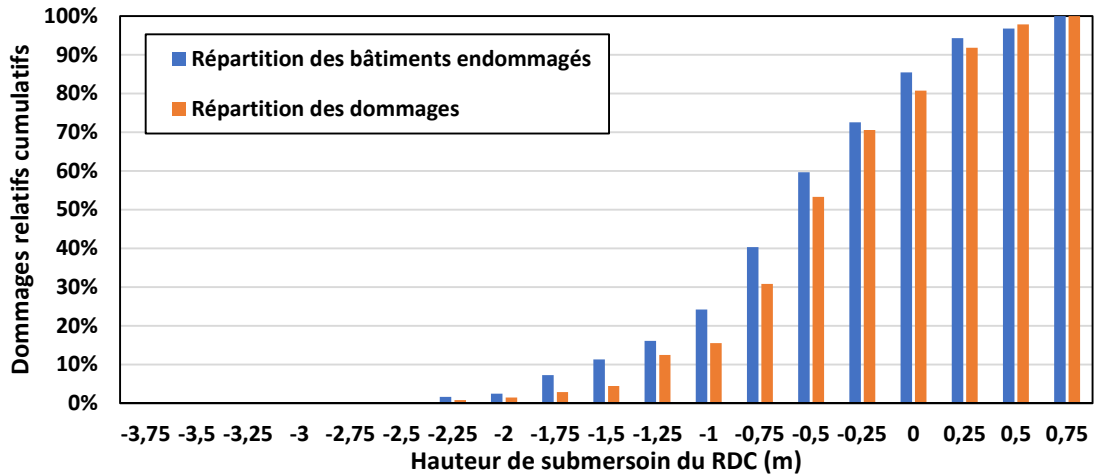


Figure 2 : Répartitions des bâtiments et des dommages selon la hauteur de submersion de 2014 (MSP)

Pour de faibles hauteurs de submersion, les dommages sont faibles par rapport au nombre de dossiers. Le pourcentage des maisons dans différents intervalles de submersion a aussi été évalué (Figure 3 et Tableau 4).

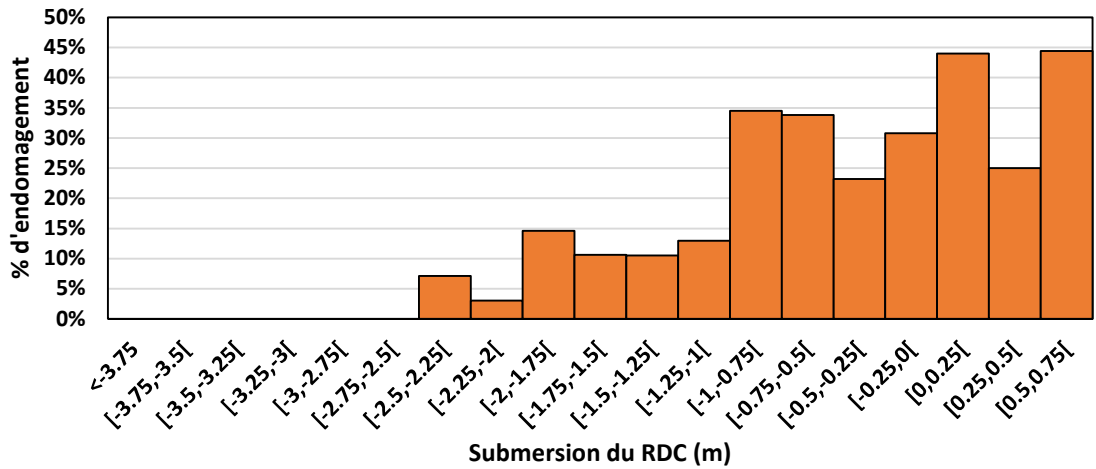


Figure 3 : Pourcentage d'endommagement (MSP)

Tableau 4 : Pourcentage de bâtiments endommagés selon la hauteur de submersion RDC

	Nombre de bâtiments dans les 11 secteurs	Nombre endommagés selon MSP	% endommagés
<-3,75	3	0	0
[-3,75,-3,5 [	6	0	0
[-3,5,-3,25 [	10	0	0
[-3,25,-3 [	22	0	0
[-3,-2,75 [	16	0	0
[-2,75,-2,5 [	15	0	0
[-2,5,-2,25 [	28	2	7
[-2,25,-2 [	33	1	3
[-2,-1,75 [	41	6	15
[-1,75,-1,5 [	47	5	11
[-1,5,-1,25 [	57	6	11
[-1,25,-1 [	77	10	13
[-1,-0,75 [	58	20	34
[-0,75,-0,5 [	71	24	34
[-0,5,-0,25 [	69	16	23
[-0,25,0[	52	16	31
[0,0 .25 [	25	11	44
[0,25, 0,5 [	12	3	25
[0,5, 0,75 [	9	4	44

4.2 Analyse des données de la CAPSA et du Comité Rivière

Pour ce qui est de la base de données de la CAPSA, deux sources d'information ont été combinées. Tout d'abord, le Comité Rivière a effectué un sondage auprès de 254 sinistrés, puis un recensement a été effectué à l'aide de la plateforme ArcGIS Online. Les questionnaires sont présentés aux Annexes 3 et 4. Un total de 246 répondants a déclaré avoir eu des dommages, pour un total d'environ 3 485 k\$. Le Tableau 5 présente la répartition des types de dommages.

Tableau 5 : Répartition des différents types de dommages (CAPSA)

Types de dommages	Nombre de déclarations	Dommages (k\$)	% des dommages totaux
Bâtiment	214	2 581	73
Coût entreprise	10	68	2
Hébergement	9	4	0
Perte de revenu	49	53	2
Autre	68	779	23
Total	s/o	3 485	100

Les dommages aux bâtiments sont les plus importants et représentent 73 % des dommages totaux déclarés. Les dommages de type autre (biens matériels, cabanon, etc.) sont aussi élevés (23 %). Parmi toutes les entrées, 13 maisons ont mentionné avoir eu des problèmes de refoulement d'égout pluvial. La répartition des dommages par zone est présentée dans le Tableau 6.

Tableau 6 : Répartition des dommages dans les différentes zones (CAPSA)

	Zone	Nombre de déclarations	Dommages (k\$)	% des dommages totaux
1-2	L'Espérance – aval du centre-ville et Saint-Hubert	34	613	18
3	Ponts – centre-ville	23	631	18
4	École – Hôtel de Ville	15	518	15
5	Saint-Louis	46	564	16
6	Estacade – aval sud	15	125	4
	Total sud	133	2 451	71
7	Saint-Hubert - nord	28	355	10
8	Des Ormes – nord des ponts	45	535	15
9	École - nord	16	67	2
10	Saint-Louis - nord	17	77	2
11	Estacade – aval nord	0	0	0
	Total nord	106	1 034	29
	Total	239	3 485	100

La grande majorité des dommages se retrouve dans six zones : Saint-Hubert (18 %), Pont - centre-ville (18 %), École - Hôtel de Ville (15 %), Saint-Louis (16 %), Saint-Hubert - nord (10 %) et Des Ormes – Nord des ponts (15 %). Les secteurs Estacade – aval sud, École nord et Saint-Louis nord contiennent un nombre important de déclarations, mais le montant total de celles-ci n'est relativement pas élevé. À l'inverse, les secteurs Ponts – centre-ville et École - Hôtel de Ville ont des dommages relativement élevés par rapport au nombre de réclamations.

La répartition cumulative des bâtiments endommagés et des dommages associés a été évaluée en fonction de la hauteur de submersion du rez-de-chaussée (Figure 4).

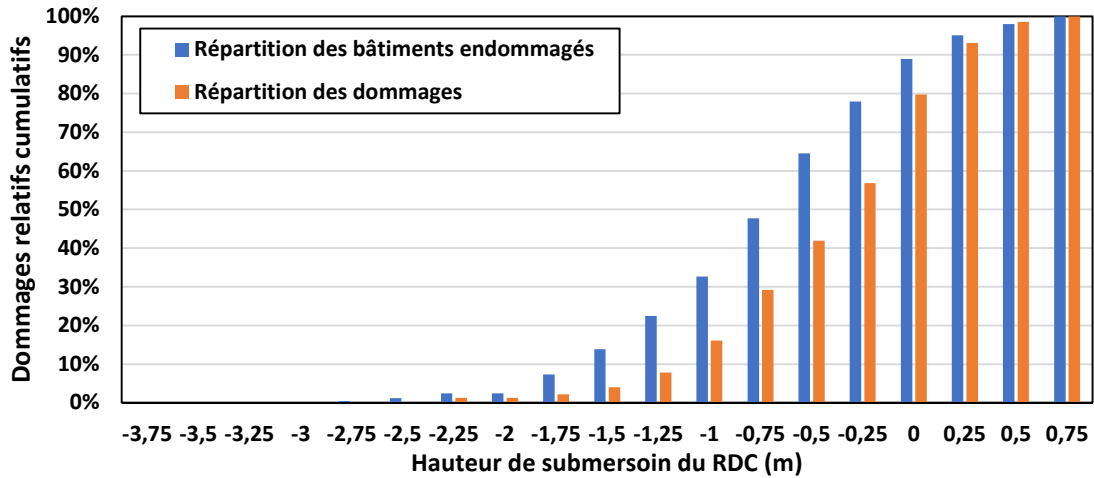


Figure 4 : Répartition des bâtiments et des dommages selon la hauteur de submersion (CAPSA)

Les dommages de la CAPSA ont aussi été évalués selon la hauteur de submersion. Ces résultats sont présentés à la Figure 5 et au Tableau 7. La différence entre la répartition des bâtiments touchés et des dommages est plus marquée que pour les données du MSP. Cela s'explique par un nombre plus élevé de réclamations de faibles dommages (hébergement, perte de salaire, etc.).

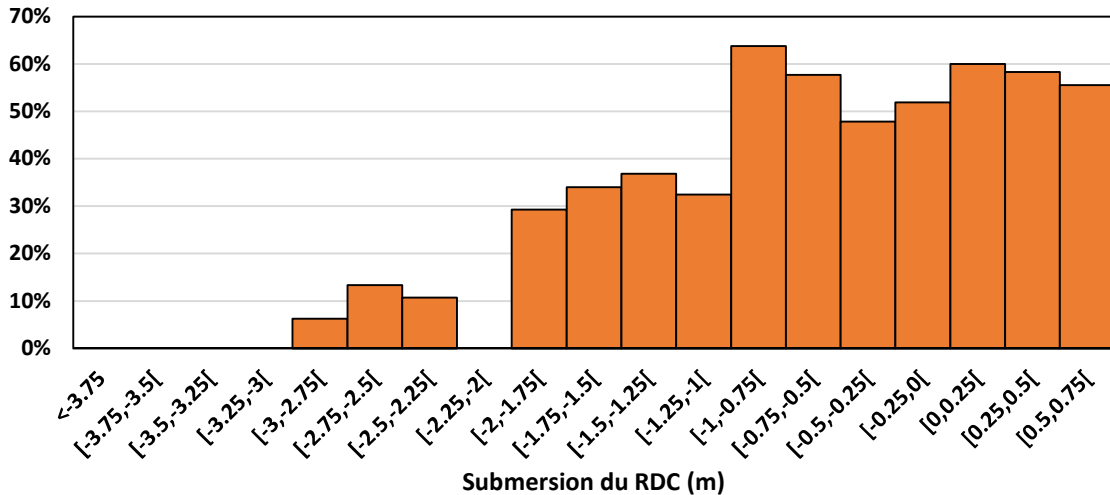


Figure 5 : Pourcentage d'endommagement du secteur (CAPSA)

Tableau 7 : Pourcentage de bâtiments endommagés selon la hauteur de submersion RDC

	Nombre de bâtiments	Nombre endommagés	% endommagés
<-3,75	3	0	0
[-3,75,-3,5 [	6	0	0
[-3,5,-3,25 [	10	0	0
[-3,25,-3 [	22	0	0
[-3,-2,75 [	16	1	6

[-2,75,-2,5 [	15	2	13
[-2,5,-2,25 [	28	3	11
[-2,25,-2 [	33	0	0
[-2,-1,75 [	41	12	29
[-1,75,-1,5 [	47	16	34
[-1,5,-1,25 [	57	21	37
[-1,25,-1 [	77	25	32
[-1,-0,75 [	58	37	64
[-0,75,-0,5 [	71	41	58
[-0,5,-0,25 [	69	33	48
[-0,25,0[	52	27	52
[0,0,0,25 [	25	15	60
[0,25,0,5 [	12	7	58
[0,5,0,75 [	9	5	56

La quantité de bâtiments ayant des dommages est plus élevée pour la banque de données de la CAPSA. Le pourcentage de 30 % observé pour des submersions de -1 m pour les données MSP est plutôt observé à partir de -2 m pour les données CAPSA. Aussi, pour des hauteurs de submersion supérieures à -1 m, environ 55 % des bâtiments sont touchés.

4.3 Comparaison des dommages

Les données du MSP et de la CAPSA ont d'abord été comparées. Un total de 107 données en commun était disponible à des fins de comparaison. En excluant cinq valeurs ayant un ratio MSP/CAPSA de plus de 4, la moyenne du ratio des dommages MSP sur CAPSA est de 0,75. La Figure 6 présente les ratios obtenus.

Il est possible de remarquer que le MSP a accordé un montant égal ou inférieur dans 80 % des cas. Ces valeurs démontrent que les estimations CAPSA, qui, en principe, devraient être bien au-delà des montants admissibles pour la réclamation au MSP, sont souvent (20 %) inférieures aux valeurs réclamées. On peut alors présumer que les montants CAPSA ne sont pas des estimations exagérées. La comparaison des dommages du MSP et de la CAPSA pour les 107 résidences en commun pour chaque secteur sont présentés au dans le Tableau 8.

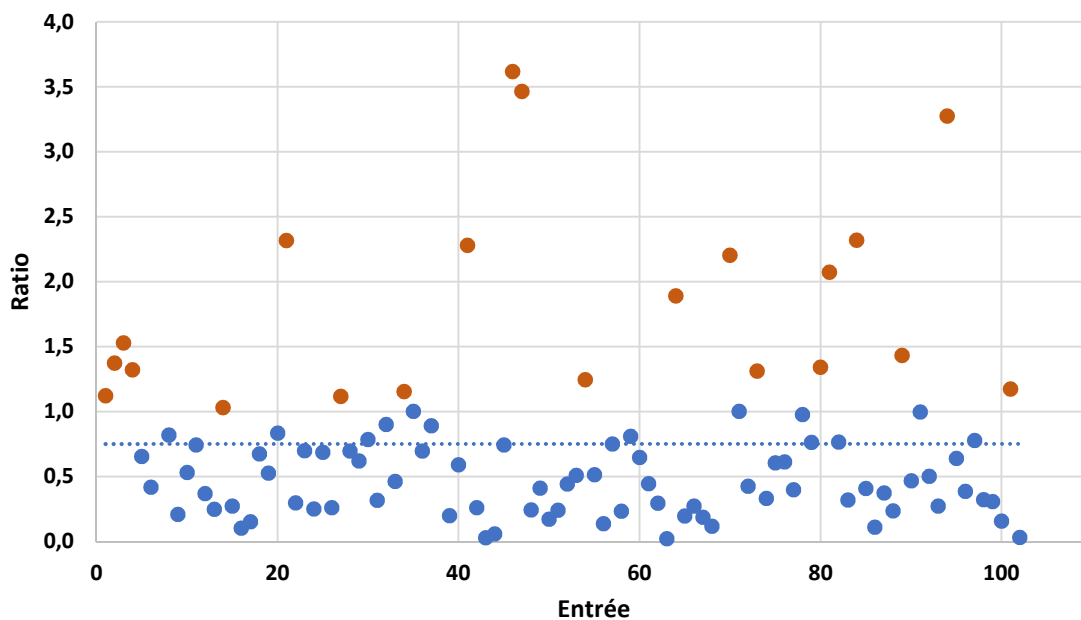


Figure 6 : Ratio MSP/CAPSA

Tableau 8 : Comparaison des dommages MSP et CAPSA pour les zones

	Zone	MSP (k\$)	CAPSA (k\$)
1-2	L'Espérance – aval du centre-ville et Saint-Hubert	587	436
3	Ponts – centre-ville	54	154
4	École – Hôtel de Ville	217	408
5	Saint-Louis	216	423
6	Estacade – aval sud	97	94
	Total sud	1 171	1 515
7	Saint-Hubert - nord	19	73
8	Des Ormes – nord des ponts	198	273
9	École - nord	12	15
10	Saint-Louis - nord	26	45
11	Estacade – aval nord	-	-
	Total nord	255	406
	Total	1 426	1 921

Les dommages utilisés pour ajuster les coûts sont obtenus avec la méthode suivante : pour les adresses ayant deux valeurs disponibles, la valeur la plus élevée est conservée. Pour celles ayant seulement les dommages de la CAPSA, cette valeur est conservée telle quelle et pour les bâtiments ayant seulement les dommages du MSP, ceux-ci ont été divisés par le ratio de 0,75. Les dommages totaux pour chaque zone sont alors présentés dans le Tableau 9.

Tableau 9 : Dommages (Dom.) identifiés par le MSP et la CAPSA pour chaque secteur (k\$)

	Nom	Dom. MSP/0,75	Dom. des deux	Dom. CAPSA	Dom. retenus	% dom. par secteur
1-2	L'Espérance – aval du centre-ville et Saint-Hubert	157	666	177	1 000	23
3	Ponts – centre-ville	1	162	476	639	14
4	École – Hôtel de Ville	240	408	111	758	17
5	Saint-Louis	58	465	140	663	15
6	Estacade – aval sud	-	114	31	145	3
	Total sud	457	1 814	935	3 206	72
7	Saint-Hubert - nord	42	77	282	400	9
8	Des Ormes – nord des ponts	24	351	262	637	15
9	École - nord	-	16	27	43	1
10	Saint-Louis - nord	61	52	32	145	3
11	Estacade – aval nord	-	-	-	-	0
	Total Nord	127	496	603	1 225	28
	Total	583	2 310	1 538	4 431	100

La majorité des dommages pour l'événement de 2014 provient de la rive sud (72 %), en particulier les zones de Saint-Hubert et l'Espérance (23 %) et École - Hôtel de Ville (17 %). Sur la rive nord, la majorité des dommages provient de la zone Des Ormes – Nord des ponts (14,4 %). Le montant total est toutefois conservateur puisque certains résidents ont décliné de répondre au sondage. En effet, environ 45 % des résidents ont refusé de répondre au sondage et au recensement (CAPSA, 2015). Toutefois, une forte majorité de ce nombre n'a pas répondu au sondage puisqu'ils n'ont pas été endommagés et se sentaient donc moins concernés. De plus, ceux ayant été endommagés, mais ayant refusé de répondre ont probablement été moins endommagés. Une augmentation de 5 % a donc été conservée, correspondant à 222 k\$.

Outre les dommages identifiés par les deux sources principales et présentés dans le Tableau 9, d'autres sont pertinents à l'analyse :

- Compte tenu de la structure particulière de la résidence des personnes âgées « Résidence Estacade », l'évaluation des dommages a été effectuée séparément. Suite à des discussions avec la directrice de la résidence, les dommages pour l'événement de 2014 ont été fixés à 400 k\$.
- Les ponts n'ont pas subi de dommages majeurs, mais il y a eu des inspections et de l'entretien. Suite à un échange de courriel avec le MTQ, nous estimons le coût à 12 k\$.
- Plusieurs véhicules ont été endommagés par l'eau. Toutefois, ces dommages ont été réclamés à des assurances privées. Ceux-ci doivent toutefois être inclus dans le calcul. Suite à des discussions avec un courtier d'assurances, nous estimons 50 véhicules endommagés en moyenne à 12 k\$ chacun.
- Les études scientifiques pour identifier des mesures de mitigation contre les inondations se poursuivent sur plusieurs années et, pour Saint-Raymond, pourraient dépasser le 600 k\$.

Par contre, nous les chiffons plutôt à 250 k\$ sachant que les études demandées sont des prototypes et que normalement, le coût total de ces études serait moindre.

- Il y a définitivement eu des dommages au niveau social (santé, etc.). Aucune donnée sur ce type de dommages n'était disponible. Un montant nominal de 50 k\$ a donc été ajouté puisqu'il s'agit d'enjeux très importants pour les résidents.

En considérant tous ces éléments non identifiés par les deux sources de données principales (MSP et CAPSA), les dommages sont estimés à 5 965 k\$ pour l'événement 2014. Ceux-ci sont détaillés dans le Tableau 10.

Tableau 10 : Estimation des dommages

Type	Dommages (k\$)
Bâtiments	4 431
Bâtiments — non répondant	222
Résidence Estacade	400
Pont et infrastructures	12
Véhicules	600
Études	250
Sociaux	50
Total estimé des dommages 2014 à Saint-Raymond	5 965

4.4 Courbes niveau d'eau – dommages pour les résidences et commerces

Des courbes du taux d'endommagement (Txe) en fonction de la hauteur de submersion par rapport au rez-de-chaussée (H) pour le Québec existent déjà dans la littérature pour les bâtiments résidentiels seulement. En effet, Bonnifait (2005) a établi des courbes d'endommagement résidentiel selon le nombre d'étages et la présence ou non d'un sous-sol, ainsi que sa finition.

L'application des courbes de Bonnifait aux dommages retenus pour 2014 a été évaluée. Les comparaisons sur les graphiques montrent que les taux de dommages de 2014 à Saint-Raymond sont généralement inférieurs aux valeurs prédites par les courbes Bonnifait (Annexe 1). Lorsque les équations sont appliquées à l'ensemble des bâtiments du secteur en utilisant la submersion moyenne observée en 2014 pour chaque zone, les estimations Bonnifait des dommages totalisent 22 000 k\$, ce qui représente une surestimation de 500% par rapport au 4 431 k\$ de 2014 (Tableau 9).

De nouvelles courbes ont donc été créées (courbes Marois pour le nom de son auteur). La même tendance que Bonnifait a été conservée, mais les coefficients ont été modifiés pour obtenir un meilleur ajustement en fonction des nuages de données de 2014. Les voici selon le type de bâtiment :

Bâtiment 1 étage avec sous-sol

$$Txe = 0,184 \exp(-0,083 \exp(-1,4H)) \text{ pour } H < -0,4 \quad (\text{Éq. 1})$$

$$Txe = \exp(-1,1 \exp(-1,4H)) \text{ pour } H \geq -0,4m \quad (\text{Éq. 2})$$

Bâtiment 1 étage sans sous-sol

$$Txe = 0,11 \exp(1,1H) \text{ pour } H < 0m \quad (\text{Éq. 3})$$

$$Txe = \exp(-2,35 \exp(-1,8H)) \text{ pour } H \geq 0m \quad (\text{Éq. 4})$$

Bâtiment 2 étages ou plus avec sous-sol

$$Txe = 0,11 \exp(-0,075 \exp(-1,7H)) \text{ pour } H < -0,4m \quad (\text{Éq. 5})$$

$$Txe = 0,795 \exp(-1,1 \exp(-1,8H)) \text{ pour } -0,4m \leq H < 2,5m \quad (\text{Éq. 6})$$

$$Txe = \exp(-0,7 \exp(2,1(H - 2))) \text{ pour } H \leq 2,5m \quad (\text{Éq. 7})$$

Bâtiment 2 étages ou plus sans sous-sol

$$Txe = 0,07 \exp(0,8H) \text{ pour } H < 0m \quad (\text{Éq. 8})$$

$$Txe = 0,82 \exp(-2,5 \exp(-1,9H)) \text{ pour } 0 \leq H < 2,5m \quad (\text{Éq. 9})$$

$$Txe = \exp(-0,8 \exp(-2,4(H - 2))) \text{ pour } H < 2,5m \quad (\text{Éq. 10})$$

Les ajustements de ces courbes sont présentés à l'Annexe 5. En général, les lignes (valeurs modélisées par ces équations) passent bien à travers le milieu des points (observations). Malgré cela, lorsque ces équations sont appliquées sur l'ensemble des 11 secteurs pour toutes les adresses disponibles, les dommages totaux sont simulés à 9 190 k\$, une surestimation de 200% par rapport au 4 431 k\$. L'explication du dépassement réside dans le fait que les courbes ont été établies en n'utilisant que les maisons touchées alors que ce ne sont pas toutes les maisons qui ont été touchées pour diverses raisons (incluant par exemple l'adaptation déjà en place pour certains particuliers).

Une seconde équation est donc introduite pour estimer le pourcentage des maisons qui sont réellement touchées et pour lesquelles les courbes d'endommagement Marois doivent être appliquées. La probabilité qu'un bâtiment soit touché par une inondation a été évaluée en fonction de la hauteur de submersion du rez-de-chaussée. Pour ce faire, le nombre de bâtiments ayant réclamé (MSP ou CAPSA) a été divisé par le nombre de bâtiments se trouvant dans l'intervalle de submersion. En faisant cette analyse, une probabilité (P) qu'un bâtiment soit touché par l'inondation est établie en fonction de la hauteur de sa submersion. Une courbe de tendance a été tracée (Figure 7) et l'équation correspondante est : $P = 0,2 \times H + 0,61$ pour une hauteur de submersion entre -3 m et 2 m. Pour des hauteurs inférieures à 3 m, la probabilité a été fixée à 0 % et pour des hauteurs supérieures à 2 m, 100 %.

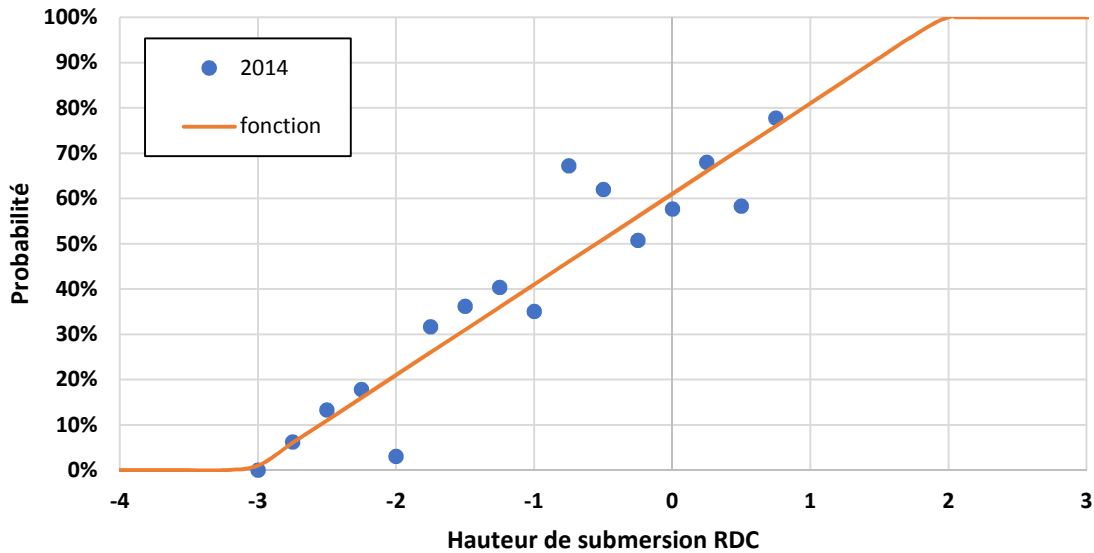


Figure 7 : Probabilité qu'un bâtiment soit endommagé en fonction de la hauteur de submersion du rez-de-chaussée

Cette probabilité est ensuite multipliée avec les courbes Marois pour calculer les dommages totaux pour chacun des secteurs. La combinaison de la fonction de probabilité et des courbes Marois permet d'obtenir des dommages totaux de 4 431 k\$, ce qui est conforme au montant estimé. Le Tableau 11 compare les dommages identifiés et ceux simulés par les courbes multipliées par les probabilités.

L'ajustement de courbes par rapport à la première ouverture au lieu du premier plancher a aussi été testé (mais il n'est pas utilisé dans les calculs). Des courbe en « S » ont été choisies et sont présentées à l'Annexe 6. Pour les bâtiments sans sous-sol, les courbes restent très semblables puisque le rez-de-chaussée est aussi la première ouverture.

Bâtiment 1 étage sans sous-sol

$$Txe = 0,11 \exp(1,1H) \text{ pour } H < 0m \quad (\text{Éq. 11})$$

$$Txe = \exp(-2,35 \exp(-1,8H)) \text{ pour } H \geq 0m \quad (\text{Éq. 12})$$

Bâtiment 1 étage avec sous-sol

$$Txe = \exp(-2 \exp(-1,1H)) \quad (\text{Éq. 13})$$

Bâtiment 2 étages ou plus sans sous-sol

$$Txe = 0,06 \exp(1,1H) \text{ pour } H < 0m \quad (\text{Éq. 14})$$

$$Txe = \exp(-2,8 \exp(-1,4H)) \text{ pour } H \geq 0m \quad (\text{Éq. 15})$$

Bâtiment 2 étages ou plus avec sous-sol

$$Txe = \exp(-3 \exp(-1,6H))$$

(Éq. 16)

Tableau 11 : Comparaison des dommages recueillis et simulés (k\$)

	Zone	Selon MSP	Selon Capsa	Dommages identifiés soit par MSP et/ou CAPSA	Dommages simulés
1-2	Saint-Hubert et L'Espérance aval centre-ville	705	613	1 000	890
3	Ponts - centre-ville	55	631	639	903
4	École Hôtel de Ville	397	518	758	946
5	St-Louis	260	564	663	589
6	Estacade – aval sud	97	125	145	110
	Total Sud	1 514	2 451	3 206	3 438
7	Saint-Hubert - nord	50	355	400	222
8	Des Ormes – nord des ponts	216	535	637	602
9	École Hôtel - nord	12	42	43	92
10	St-Louis - nord	72	77	145	76
11	Estacade – aval nord	0	0	0	1
	Total Nord	350	1 009	1 225	993
	Total	1 864	3 460	4 431	4 431

4.5 Courbes niveau d'eau – dommages pour la résidence Estacade

La fonction de dommages pour la Résidence Estacade a été déterminée avec les informations fournies par la Directrice de l'établissement. Des dommages ont été établis à différents paliers. Lorsque le rez-de-chaussée est tout juste atteint, les dommages potentiels sont de 10 k\$, montant qui passe à 300K\$ lorsque le niveau d'eau atteint 30 cm d'eau, c'est-à-dire, lorsque les équipements commencent à être endommagés (ce montant avait été de 400K\$ en 2014, mais certaines mesures ont été prises pour réduire ces dommages). À 3 m d'eau à partir du plancher du rez-de-chaussée, l'électricité au plafond est atteinte (600 k\$), alors qu'à 3,5 m l'eau atteint le 1^{er} étage (1 000 k\$). Entre ces paliers, les dommages sont interpolés. Au-delà du premier plancher, les dommages potentiels augmentent entre autre à cause de la présence du mobilier des multiples résidents.

4.6 Courbes niveau d'eau – dommages pour les ponts et digues

Les ponts Tessier et Chalifour sont situés au centre-ville de St-Raymond (secteur Ponts et centre-ville). La partie la plus basse du pont Chalifour est située à l'élévation 137.5 m tandis que sa partie centrale se trouve au-dessus de l'élévation 138.5 m. Le pont Tessier est quant à lui situé au-dessus de l'élévation 138.7 m, soit 0.2 m ou plus au-dessus des digues environnantes. La relation niveau-dommage considère qu'une inspection complète et quelques réparations sont requises (environ 100K\$) pour une élévation de 138.3 m. Par contre, pour une élévation de 139.0 m, il est considéré que ces ouvrages sont perdus (soulèvement et poussée des glaces, qui dominant l'aléa à cet endroit). La valeur associée à la perte complète des ponts Chalifour (3 687

101\$ selon le document P06162 Rapport d'inventaire détaillé.pdf du MTQ) et Tessier (2 000 423\$ selon le document P06182 Rapport d'inventaire détaillé.pdf du MTQ) tient compte d'une valeur ajustée évaluée à 9M\$ pour considérer une reconstruction plus durable de ces liens (adaptée à la dynamique des glaces) ainsi que pour considérer tous les inconvénients associés à la déviation du trafic et à la construction de liens temporaires.

Un pont est situé sur la route 367 à la rivière Bras du Nord (valeur de 1 476 372\$ selon le document P06160 Rapport d'inventaire détaillé.pdf du MTQ). Cette route forme également une digue sur la plaine inondable en rive nord de la rivière Sainte-Anne (secteur Des Ormes – nord des ponts) sous laquelle se trouvent quelques ponceaux qui servent de voie d'évacuation d'eau lors des inondations. Il est établi que les dommages potentiels à l'Avenue St-Jacques et à la route 367 commencent à une élévation d'eau dans la rivière Sainte-Anne à 136.5 m et atteignent un maximum de 1M\$ à l'élévation 140 m. Pour leur part, les dommages au pont débutent à l'élévation 137.5 m (élévation approximative du tablier) et la perte totale de l'ouvrage (estimées à 2M\$) survient à un niveau d'eau de 139.5 m. Cette zone de la rivière Bras du Nord présente un écoulement relativement calme, ce qui limite les dommages potentiels et ce seraient plutôt des débris (arbres ou glaces) qui causeraient la perte de l'ouvrage.

Enfin, à trois endroits (dans 3 secteurs), il a été établi que la submersion des digues de plus de 0,2 m d'eau causerait un endommagement par érosion. Dans ce cas, des sections de digue de 100 m à 200 m devraient être remplacées à un coût de 70K\$/100 m.

4.7 Courbes niveau d'eau – dommages pour les véhicules

Une fonction a aussi été déterminée pour les dommages aux véhicules, avec un montant moyen de réclamation de 12 k\$. Pour une hauteur de submersion inférieure à -3 m, il a été déterminé qu'aucun véhicule n'est endommagé. Le pourcentage d'endommagement maximal a été fixé à 70 % et est atteint à une submersion de 2 m. Ce taux prend en considération les véhicules qui sont déplacés en prévention et les évacuations. L'équation correspondant aux dommages pour les véhicules (V [en dollars]) est : $V = (0,143 \times H + 0,414) \times 2500$ (pour H entre -3 et 2 m). Pour l'événement 2014, le montant total pour les véhicules est de 600 k\$.

4.8 Dommages sociaux et risque pour les personnes

Les coûts sociaux ont été estimés à 50 \$ par personne lorsque le niveau d'eau est à moins de 1,5 m du rez-de-chaussée. Pour l'événement 2014, cela correspond à 369 maisons plus la Résidence Estacade. En utilisant une moyenne de 2,25 habitants par maison et les 170 logements de la Résidence, il s'agit d'un total d'environ 1000 personnes qui sont touchées (total estimé de 50 k\$).

4.9 Dommages totaux et courbe niveau d'eau – dommages par secteur

Les dommages simulés pour l'événement 2014 totalisent 5 865 k\$, ce qui est légèrement inférieur au total estimé de 5 965 k\$. Cette différence provient en partie des dommages plus élevés de la résidence Estacade. En effet, des travaux visant à réduire les dommages des inondations futures ont été effectués en 2014. Les dommages estimés et simulés sont comparés dans le Tableau 12. La Figure 8 montre les courbes de niveau d'eau – dommages pour les 11

secteurs du centre-ville, excluant les véhicules (qui peuvent être déplacés et qui sont assurés par le privé) et les dommages sociaux (qui sont difficiles à confirmer et qui peuvent être évalués autrement) et le risque pour les personnes seront évalués ultérieurement.

Tableau 12 : Comparaison des dommages totaux estimés et simulés

Type	Dommages estimés (k\$)	Dommages simulés (k\$)
Bâtiments	4 431	4 431
Bâtiments — non répondant	222	222
Résidence Estacade	400	300
Pont et infrastructures	12	12
Véhicules	600	600
Études	250	250
Sociaux	50	50
Total estimé des dommages 2014 à Saint-Raymond	5 965	5 865

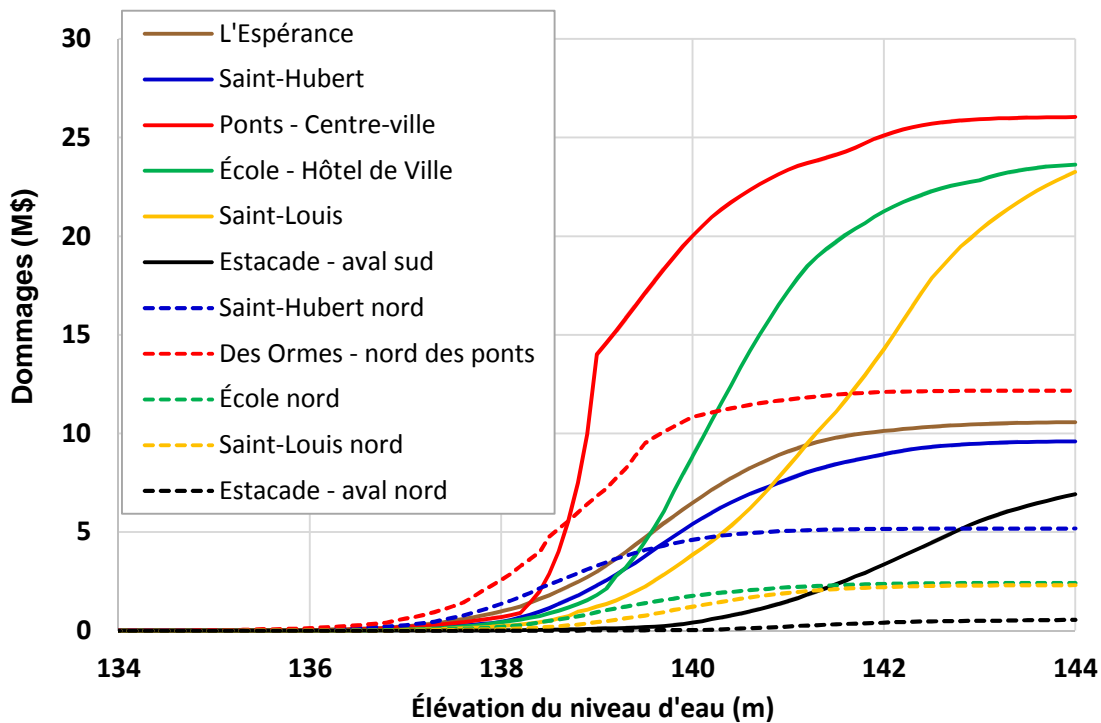


Figure 8. Courbes de niveaux d'eau – dommages pour les 11 secteurs du centre-ville de Saint-Raymond

4.10 Test de validation des courbes

L'événement de 2012 a été utilisé pour valider le modèle. Le Tableau 13 présente les niveaux d'eau estimés durant l'événement et utilisés pour calculer les dommages avec les courbes.

Tableau 13 : Niveau d'eau observé en 2012 pour chaque zone

Numéro	Nom	Niveau d'eau 2012 (m)
1	L'Espérance aval centre-ville	137,2
2	Saint-Hubert	137,5
3	Pont - centre-ville	137,5
4	École - Hôtel de Ville	137,6
5	St-Louis	137,8
6	Estacade – aval sud	138,0
7	Saint-Hubert - nord	136,4
8	Des Ormes – nord des ponts	136,5
9	École - nord	137,0
10	St-Louis- nord	137,2
11	Estacade – aval nord	137,4

Les dommages recueillis par le MSP totalisent 0,7 M\$ pour cet événement. Les dommages MSP ont été multipliés par 2,38 pour estimer les dommages totaux aux bâtiments, soit 1 663 M\$. Ce ratio provient des dommages aux bâtiments totaux estimés en 2014 (4,43 M\$) divisés par les dommages recueillis par le MSP (1,86 M\$). Les différentes courbes Marois ont été appliquées aux niveaux d'eau de 2012 pour calculer les dommages totaux. Les dommages obtenus avec les courbes Marois totalisent 1 793 k\$, environ 8 % supérieur au montant estimé (1 663 k\$), ce qui est raisonnable. Les dommages obtenus pour l'ensemble des types de coûts avec les courbes ajustées et les niveaux d'eau de 2012 totalisent 2 379 k\$ (Tableau 14). Ces résultats confortent la confiance dans la représentativité des courbes et des résultats présentés à la Figure 8.

Tableau 14 : Dommages simulés totaux pour l'événement de 2012

Type	Dommages simulés (k\$)
Bâtiments	1 793
Bâtiments non réclamés	90
Résidence Estacade	4
Pont et infrastructures	2
Véhicules	300
Études	150
Sociaux	40
Total estimé des dommages 2014 à Saint-Raymond	2 379

5. Analyse et résultats : Relation niveau d'eau - fréquence

5.1 Courbes niveau d'eau – fréquence pour les inondations à l'eau libre

Le Tableau 15 présente les débits instantanés (Q) de récurrence 2 ans à 100 ans à la station 050408. Lors d'événements hydrologiques importants, le ratio de débit provenant de la rivière Bras du Nord est normalement de 35% à 45% du débit total à Chute-Panet. La valeur de la distribution a très peu d'effet sur les niveaux d'eau en amont de la confluence, surtout dans la partie aval du centre-ville. Par contre, lors de crues exceptionnelles, la distribution pourrait générer des différences mesurables.

Tableau 15. Débits instantanés de récurrence 2 ans à 100 ans à Chute-Panet

2 ans	518 m ³ /s
5 ans	682 m ³ /s
10 ans	786 m ³ /s
20 ans	882 m ³ /s
50 ans	1004 m ³ /s
100 ans	1093 m ³ /s

Il est à noter que ces débits sont légèrement supérieurs (15%) à ce qui avait été calculé lors d'études précédentes (ex. : CEHQ 2003) pour deux raisons principales : l'inclusion des données hydrologiques des années récentes et la prise en compte d'un facteur de pointe mesuré ou estimé de manière rigoureuse (ce facteur variant normalement de 1.05 à 1.40 avec certains événements mesurés à 1.75 alors qu'il avait été fixé à environ 1.2 lors d'études précédentes).

L'analyse des niveaux d'eau (Y) en fonction du débit instantané (Q) a mené à l'interpolation de courbes de tarage de la forme suivante pour 5 endroits du centre-ville:

$$Y = aQ^b + c \quad (\text{Éq. 17})$$

Les résultats sont présentés au Tableau 16 et à la Figure 9. Les points présentés à la Figure 9 représentent des mesures qui sont considérés pour la calibration, incluant, en rouge, des données obtenues lors de la crue du 3 novembre 2017 (650 m³/s).

Tableau 16. Données permettant de tracer les courbes de tarage (niveau d'eau – débit) à 5 endroits du centre-ville de Saint-Raymond sur la rivière Sainte-Anne.

Endroit	Km à partir de Chute-Panet	a	b	c
Clapet St-Hubert	4.2	0.0550	0.65	132.3
Clapet des Ormes	5.1	0.0565	0.65	132.5
Clapet École	5.5	0.0410	0.70	132.7
Clapet St-Louis	5.8	0.0161	0.83	133.4
Aval du barrage	6.1	0.0093	0.90	133.8

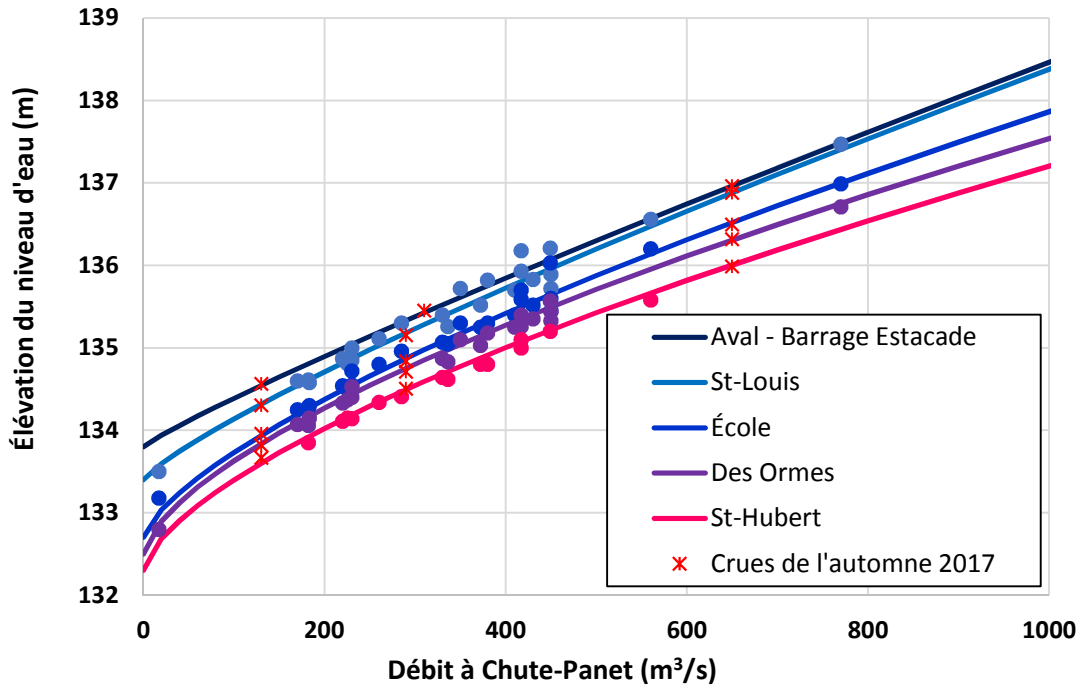


Figure 9. Courbes de tarage pour les 5 endroits du centre-ville, incluant les données des années passées et les données des crues de l'automne 2017.

La combinaison de ces informations (fréquence des crues et courbes de tarage) a permis de déterminer la récurrence des niveaux d'eau pour les crues à l'eau libre (Figure 10). Une combinaison spécifique de ces différentes courbes est utilisée pour chaque secteur du centre-ville (Figure 1).

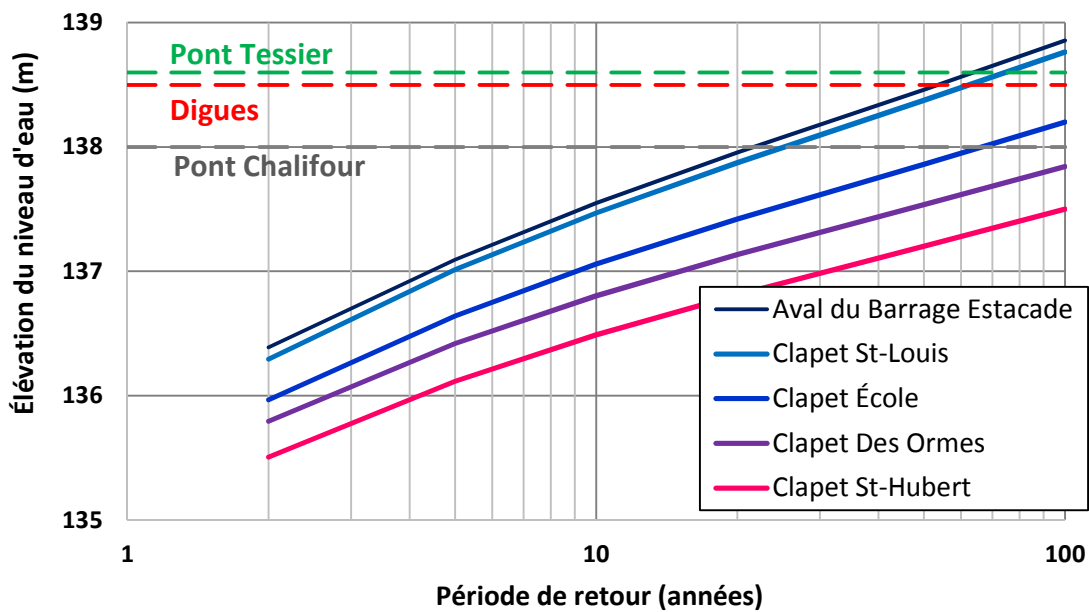


Figure 10. Courbes niveau d'eau – fréquence pour les 5 endroits de mesure du centre-ville de Saint-Raymond avec la présence du Pont Tessier (clapet École), du Pont Chalifour (Clapet des Ormes) et des digues (situés seulement entre le clapet École et le Clapet St-Louis car les élévations des digues plus en aval sont à des élévations inférieures).

5.2 Courbes niveau d'eau – fréquence pour les inondations du début de l'hiver

Établir des relations niveaux d'eau – fréquence en présence d'accumulations importantes de frasil et de glace avec un débit variable n'est pas si simple que pour les cas à l'eau libre et une telle information a été dérivée de manière indirecte, empirique, mais tout à fait objective.

Le modèle de Turcotte et Morse (2016) a été mis au point suite à une intense campagne de collecte de données glacielles durant l'hiver 2014-2015. Le modèle, qui a pour objectif de simuler la production, le transport et la déposition de glace et de neige sur 30 km de la rivière Sainte-Anne à un pas de temps journalier, a été retravaillé et re-calibré avec des données d'observations des hivers 2015-2016 et 2016-2017. La Figure 11 présente les résultats d'accumulations de frasil, de bloc de glace et de sloche de neige dans le secteur du centre-ville de Saint-Raymond pour l'hiver 2015-2016 tandis que la Figure 12 présente les résultats d'accumulation maximale pour 40 hivers consécutifs et durant la plupart desquels aucune donnée glacielle ou d'élévation de niveau d'eau n'était disponible. À titre indicatif, lorsque l'accumulation dépasse plus de 300 000 tonnes (300 KT) de glace au centre-ville des inondations mineures peuvent survenir, même à bas débit. Par contre, si le débit augmente, une quantité d'aussi peu que 150 KT peut causer un blocage d'écoulement suffisant pour engendrer une inondation.

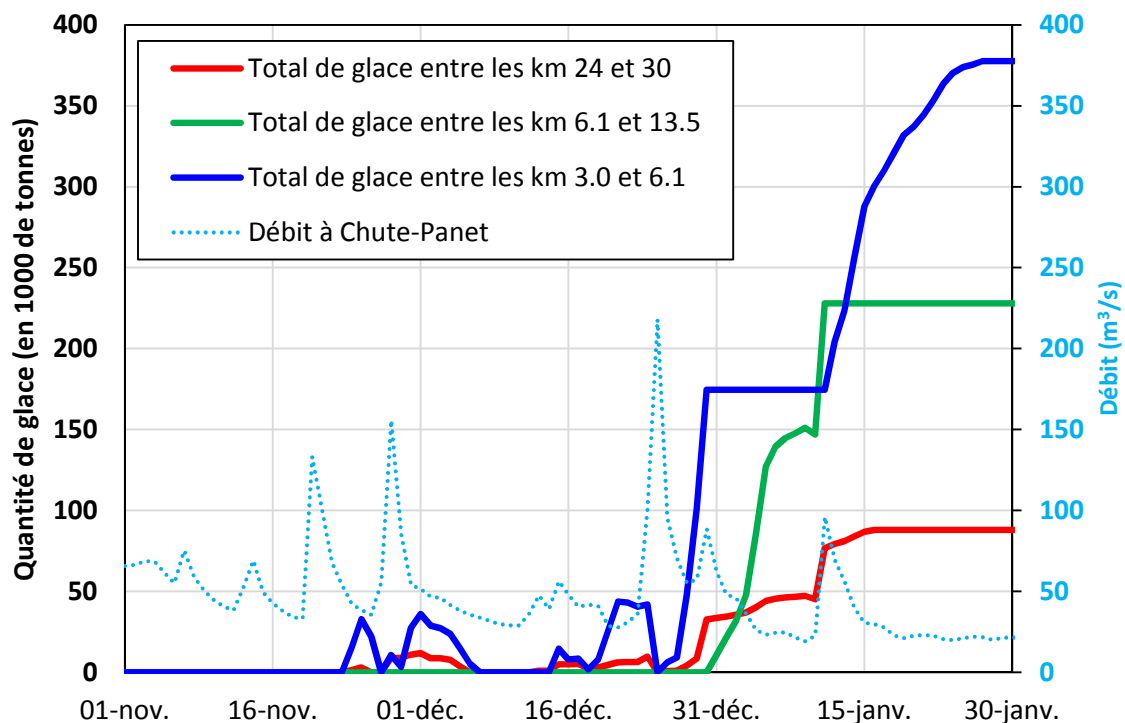


Figure 11. Sortie du modèle de production, transport et déposition de glace dans la rivière Sainte-Anne à un pas de temps journalier pour l'hiver 2015-2016. Le centre-ville est affecté par la glace simulée par la ligne bleu foncé. Il existe 40 graphiques similaires pour les 40 hivers de 1977 à 2017.

Des niveaux d'eau mesurés à 5 endroits au centre-ville de Saint-Raymond à partir de 2009, mais de manière plus intensive à partir de 2014, ont été utilisés pour développer des relations empiriques de niveaux d'eau en fonction du débit et de la quantité de glace accumulée.

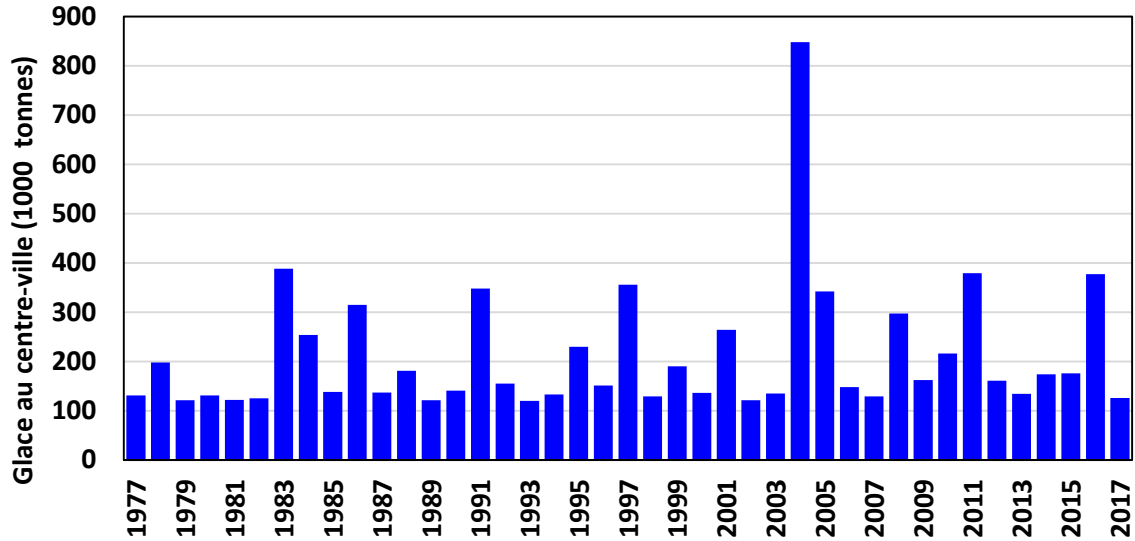


Figure 12. Accumulation maximale de glace simulée entre novembre et février au centre-ville de Saint-Raymond pour 40 hivers consécutifs.

La Figure 13 montre un exemple de courbes développées à l'endroit du clapet St-Louis. Cette figure indique qu'il y a deux processus complexes qui définissent la relation approximative entre Y et Q selon les accumulations de glace :

- En période de froid, alors que Q est bas et en récession, l'accumulation continue de frasil et de sloche de neige provoque un rehaussement marqué (points plus hauts que les courbes). Lorsque cette accumulation cesse, Y redescend parce que l'eau, qui transporte de la chaleur, se fond littéralement un chemin à travers l'accumulation.
- Si Q augmente suite à ce processus, la relation Y-Q (lignes pleines) dépend de la quantité de glace accumulée. Suite à la crue, Y redescend en quelques jours. (Un Q supérieur à 250 m³/s devrait normalement générer une débâcle générale et un retour aux conditions d'eau libre.)

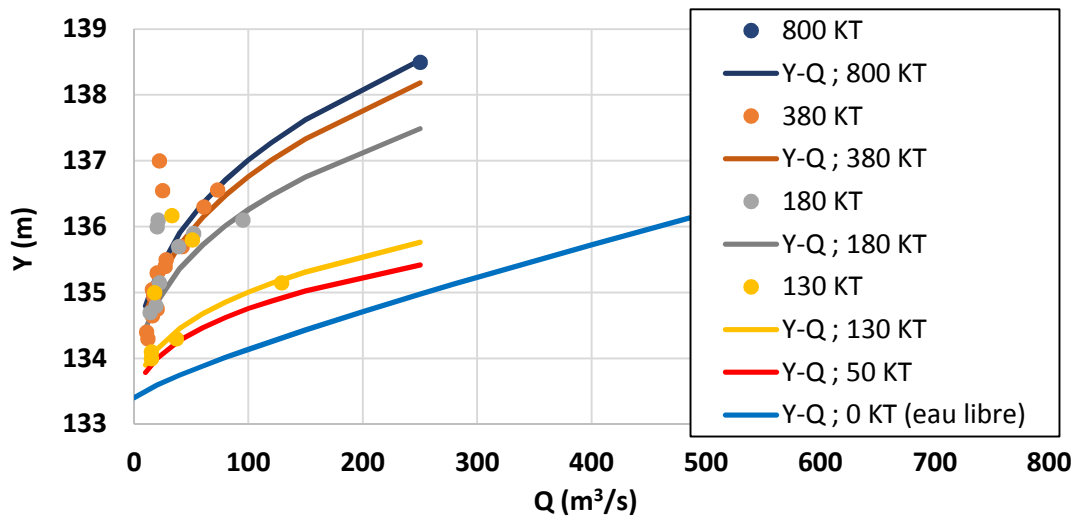


Figure 13. Modélisation des relations Y-Q au clapet Saint-Louis pour différente accumulation de frasil, basé sur des Q estimés et sur des niveaux d'eau mesurés entre 2009 et 2017. Il existe 5 graphiques similaires pour les 5 endroits du centre-ville où des mesures de niveaux d'eau ont été effectuées depuis 2009.

La pire situation possible du point de vue des inondations du début de l'hiver survient lorsqu'une crue qui amène des glaces de l'amont suit immédiatement la fin d'une accumulation massive de frazil alors que Y demeure élevé et qu'il n'y a pas de voie d'évacuation dans l'accumulation de glace du centre-ville. Dans ce cas, la relation Y-Q est ajustée à la hausse. Il est à noter que l'hiver 2003-2004 durant lequel une quantité très importante de glace s'était déposée au centre-ville (environ 800 000 tonnes selon le modèle) représente un plafond. En effet, lorsque les digues sont submergées, le niveau d'eau ne peut plus vraiment augmenter puisque l'eau est évacuée par la plaine inondation (incluant le centre-ville lui-même). Aussi, les données indiquent que la différence entre les relations Y-Q pour des accumulations de 130 000 tonnes (130 KT) et 180 000 tonnes (180 KT) est significative d'où l'importance d'éventuellement limiter l'accumulation au centre-ville à moins de 150 000 tonnes de glace et frazil.

Des relations similaires à celle présentée à la Figure 13 ont été calibrées pour les 5 endroits du centre-ville où des mesures de niveau d'eau (Y) étaient disponibles. Par la suite, un modèle de simulation de Y en fonction de la quantité de glace et du débit (Q) a été développé à un pas de temps journalier. La Figure 14 montre un exemple au pied du Barrage Estacade pour l'hiver 2015-2016, avec des données continues de mesures de niveaux d'eau qui ont servi à la calibration finale des équations. Il est à noter que bien que le modèle repose essentiellement sur des relations empiriques (exemple à la Figure 13), il est basé sur une physique rigoureuse et sur une compréhension des phénomènes forte de 3 hivers d'observations et de suivi.

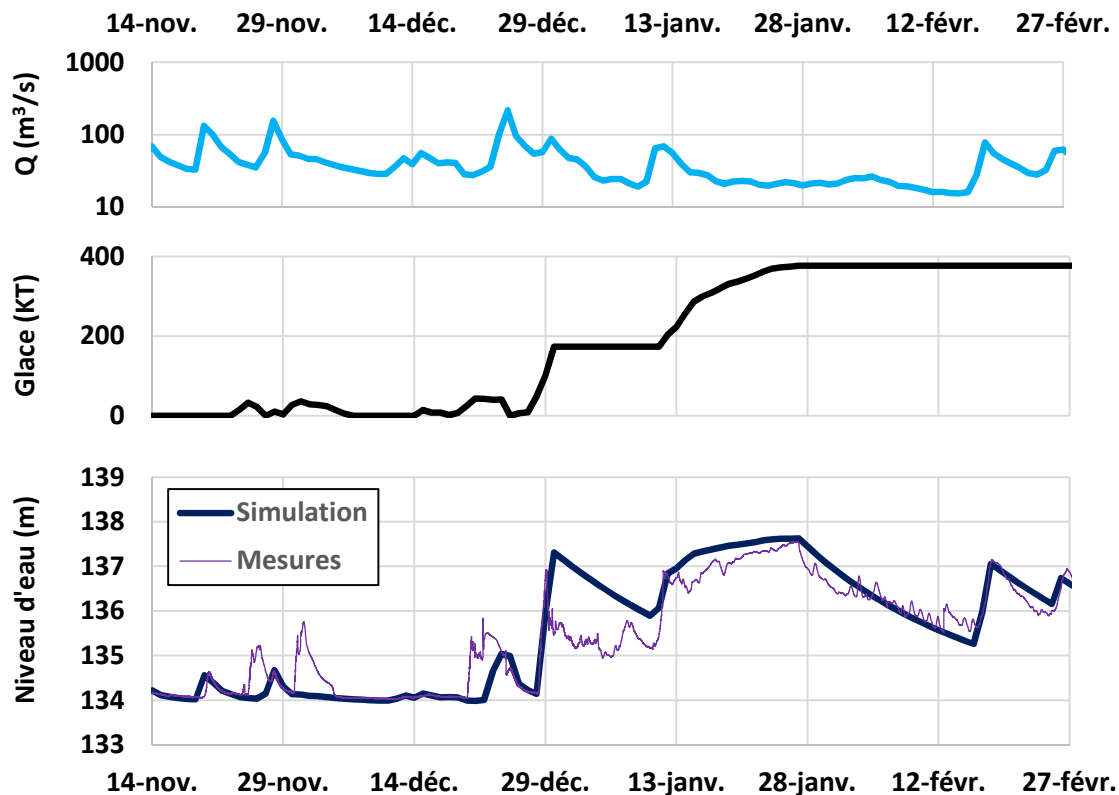


Figure 14. Débit (Q) mesuré à Chute-Panet, quantité de glace accumulée telle que simulée par les modèles et niveaux d'eau mesurés et simulés pour l'hiver 2015-2016 au pied du barrage Estacade. Il existe 200 graphiques similaires pour les 5 sites et 40 hivers consécutifs de 1977 à 2017.

Par la suite, tous les hivers de 1977 à 2017 ont été simulés aux 5 endroits du centre-ville et les niveaux d'eau maximum (excluant l'eau libre et les débâcles hivernales définitives [comme ne février 1981 où les glaces ne se sont pas reformées par la suite]) ont été retenus pour une analyse fréquentielle. Lorsque disponible, les données mesurées ont été considérées (entre 2009 et 2016) au lieu des données simulées. La Figure 15 présente les résultats. Une combinaison spécifique de ces courbes, la même que pour les crues à l'eau libre, a été utilisée pour obtenir la relation niveaux d'eau – fréquence en période de production de glace dans tous les secteurs du centre-ville.

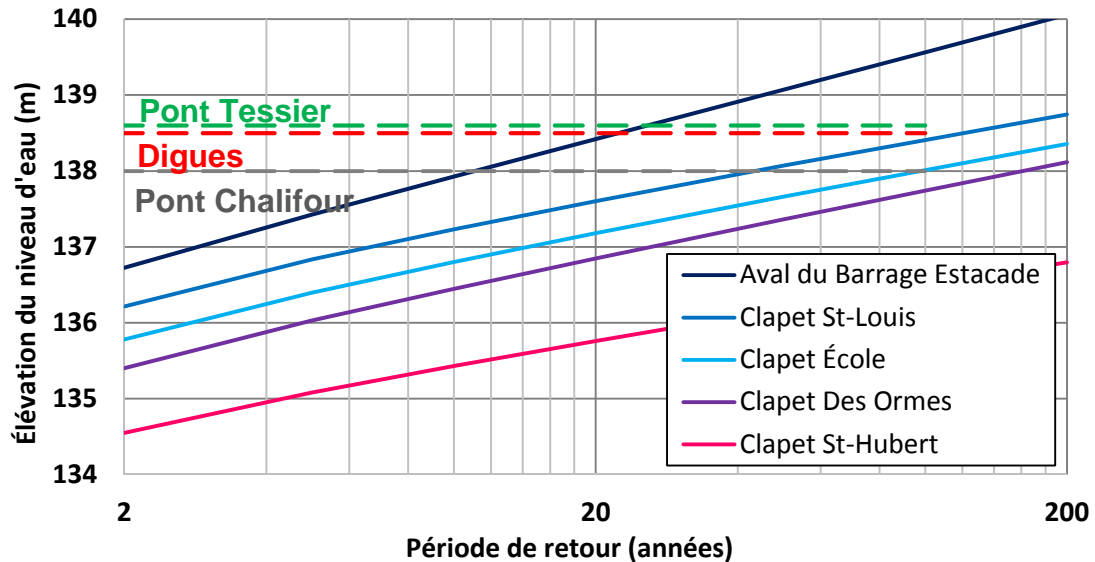


Figure 15. Courbes niveau d'eau – fréquence au début de l'hiver pour les 5 endroits de mesure du centre-ville de Saint-Raymond avec la présence du Pont Tessier (Clapet École), du Pont Chalifour (Clapet des Ormes) et des digues (situées entre le Clapet École et le Clapet St-Louis).

5.3 Courbes niveau d'eau – fréquence pour les inondations de la débâcle

L'analyse fréquentielle de niveaux d'eau atteints en présence d'embâcles de glace est le sujet de plusieurs articles scientifiques récents (ex. : Aaltonen et Huokuna, 2017; Lindenschmidt, 2017). Dans plusieurs cas, la stratégie consiste à modéliser des embâcles à l'aide d'un outil hydrodynamique en considérant une distribution normale ou aléatoire de paramètres d'entrée qui déterminent les niveaux d'eau atteints. Or, dans plusieurs cas, on ne tient pas compte de l'interdépendance de certains paramètres d'entrée et donc de l'illégitimité possible de certaines combinaisons et de la non-représentativité de certains embâcles simulés. La présente analyse est plus simple, mais considère la combinaison aggravante ou apaisante de certains paramètres ainsi que la plausibilité des scénarios simulés.

La Figure 16 montre un modèle d'intensité potentielle de la débâcle qui est dictée, dans ce cas, par la rapidité avec laquelle le débit (Q) atteint des seuils critiques par rapport à la rapidité de dégradation du couvert de glace représentée par les degrés-jours de dégel cumulé au-dessus de -5°C (DJDC-5). Cette figure montre l'hydrogramme du printemps 2013 où pratiquement aucun embâcle n'a été observé ainsi que celui du printemps 2014 où un embâcle majeur avait affecté le centre-ville de Saint-Raymond (le losange blanc représente un embâcle rapporté).

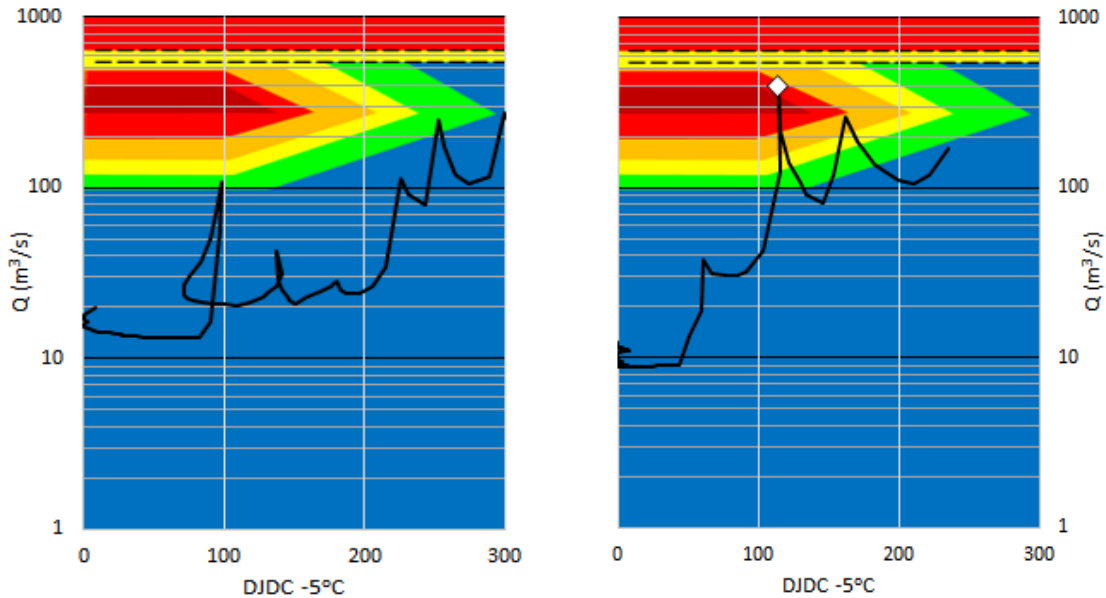


Figure 16. Modèle de d'intensité de débâcle printanière des glaces montrant deux scénarios passés : le printemps 2013 avec des crues modérées se limitant à la zone verte (intensité 1/5) et le printemps 2014 avec une crue majeure atteignant la zone rouge foncée (intensité de 5/5). Il existe 41 graphiques similaires pour les printemps 1977 à 2017.

Pour chaque printemps depuis 1977 à 2017, l'indice d'intensité maximale de la débâcle atteint (de 0 à 5), selon la couleur traversée par les données Q et DJDC-5, a été identifié. Par la suite, un indice secondaire, aggravant ou atténuant, celui-ci moins dominant, a été considéré, soit la quantité de glace présente dans le centre-ville de Saint-Raymond avant la débâcle, qui représente un facteur de résistance à la débâcle. Les résultats de la Figure 12 ont été utilisés à cette fin (résultat du modèle de production, transport et déposition de glace). Plus la résistance est élevée, plus le couvert en place a la capacité de retenir les glaces et de résister à l'augmentation de débit pour causer une inondation. Le Tableau 17 montre les indices d'intensité relativement à la quantité de frasil en aval du Barrage Estacade.

Tableau 17. Échelle d'intensité de la résistance du couvert de glace au centre-ville de Saint-Raymond basé sur la quantité de frasil présente avant la débâcle, tel qu'estimé par le modèle donc les résultats sont présentés à la Figure 12.

Quantité de glace et frasil	Indice d'intensité
Moins de 100 KT	0
Entre 100 et 150 KT	1
Entre 150 et 200 KT	2
Entre 200 et 250 KT	3
Entre 250 et 350 KT	4
Plus de 350 KT	5

La combinaison de ces deux indices donne un indice final variant de 0 à 5. Le Tableau 18 montre les résultats de la combinaison des indices. Il est à noter que dans certains cas (* au Tableau 18), la quantité de degrés-jours de gel et l'occurrence de crues durant l'hiver précédent la débâcle a également été considérée comme facteur aggravant ou atténuant qui influence le résultat final.

Tableau 18. Indice d'intensité de la crue printanière, de la résistance du couvert de glace et de l'intensité de la débâcle pour les printemps 1977 à 2017 (les * sont des ajustements qui tiennent compte d'autres paramètres hivernaux tels que les crues et les degrés-jours de gel cumulés).

Printemps	Q-DJDC-5	Glace-frasil	Résultat
2017	3	0	1.5
2016	4	4	4
2015	3	2	2.5*
2014	5	2	5
2013	1	1	1
2012	5	2	5
2011	1	5	2
2010	0	3	0
2009	4	2	4
2008	3	4	3.5*
2007	2	1	1.5*
2006	2	1	2
2005	3	4	4
2004	3	5	4
2003	3	1	3
2002	4	1	4
2001	1	4	1
2000	1	1	1
1999	1	2	1
1998	3	1	3
1997	0	5	1

Printemps	Q-DJDC-5	Glace-frasil	Résultat
1996	3	2	3
1995	1	3	1
1994	4	1	4
1993	3	1	3
1992	4	2	3.5*
1991	4	4	4
1990	3	1	3
1989	1	1	1
1988	3	2	3
1987	4	1	4
1986	3	4	3
1985	3	1	3
1984	3	4	3
1983	2	5	3
1982	4	1	3
1981	5	1	5
1980	3	1	2
1979	5	1	5
1978	0	2	0
1977	1	1	1

Des niveaux d'eau avaient été mesurés à 5 endroits au centre-ville de Saint-Raymond lors des débâcles des hivers 2009 à 2017. Il a donc été possible de classer ces niveaux d'eau en fonction de l'intensité de la débâcle. La Figure 17 montre un exemple d'une telle relation pour le clapet St-Louis. Dans tous les cas, une marge de 1 m d'incertitude a été introduite pour tenir compte du comportement chaotique et non-reproductible d'un embâcle, même avec des conditions hydrologiques et glacielles identiques ou semblables.

Par la suite, pour chacun des 5 endroits du centre-ville de Saint-Raymond, un total de 9 simulations (choix aléatoire d'un niveau dans la plage respective selon l'indice obtenu) a été effectué et les niveaux d'eau obtenus ont été classés en ordre croissant, puis introduit dans un programme d'analyse fréquentielle. La moyenne des niveaux d'eau pour une fréquence donnée ont été calculé. Les résultats sont présentés à la Figure 18. Une combinaison spécifique de ces courbes, la même que pour les crues à l'eau libre et pour la période de formation de glace, a été utilisée pour obtenir la relation niveaux d'eau – fréquence en période de débâcle dans tous les secteurs du centre-ville.

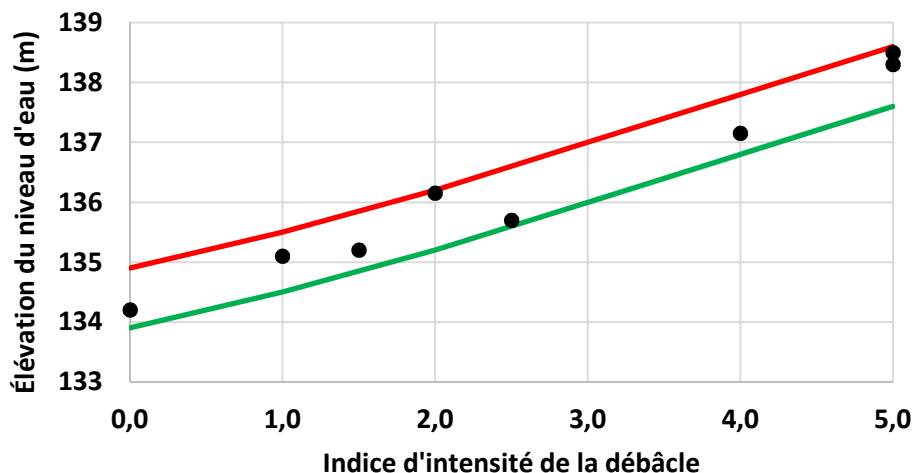


Figure 17. Relation entre l'indice d'intensité de la débâcle tel qu'évalué au Tableau 18 et les niveaux d'eau mesurés au clapet St-Louis depuis le printemps 2009. Les lignes rouge et verte représentent des limites pour chaque indice. Il existe 5 graphiques identiques pour les 5 endroits du centre-ville où les niveaux d'eau ont été récemment mesurés.

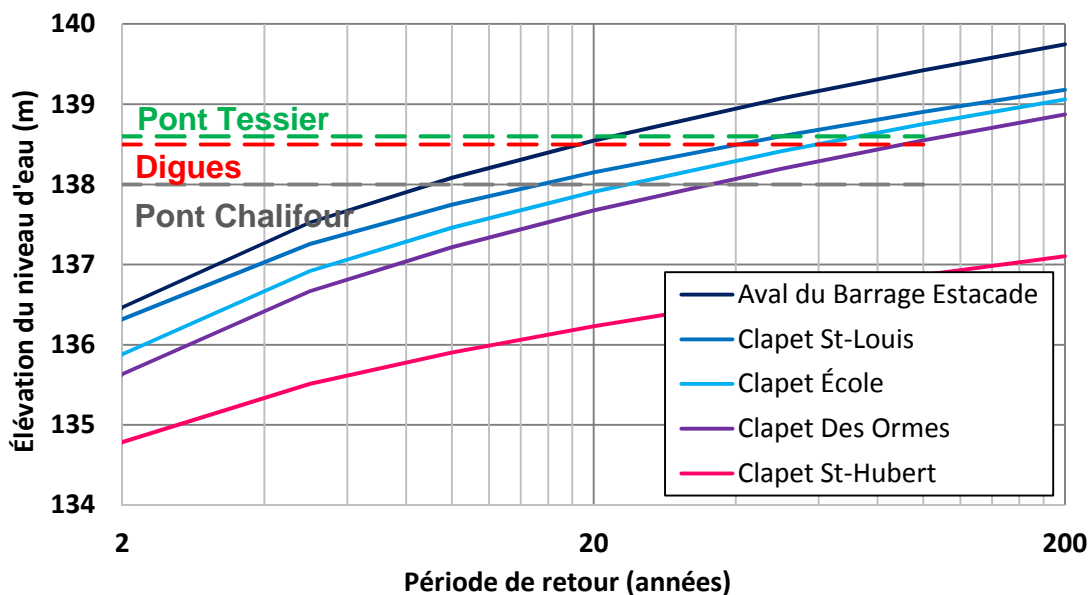
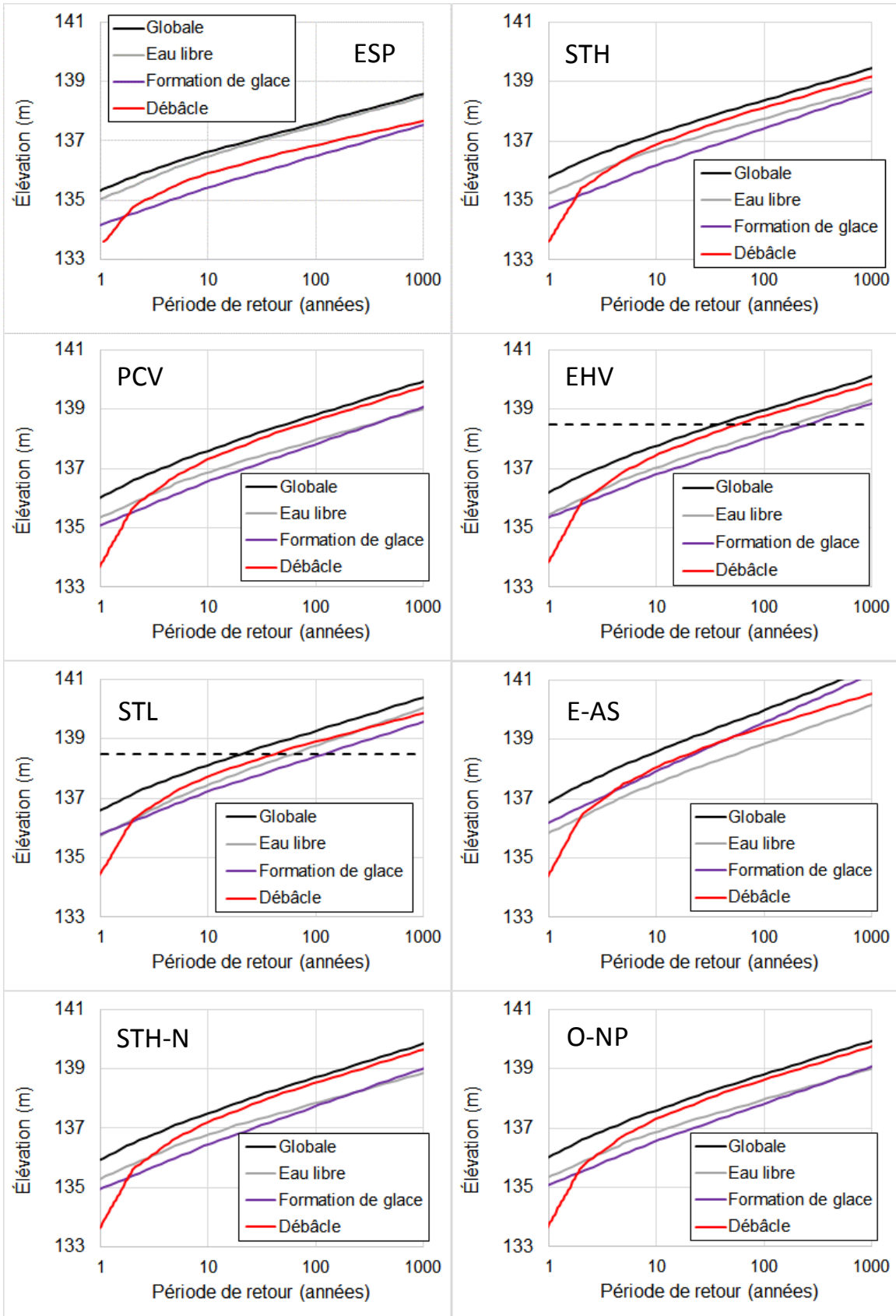


Figure 18. Courbe niveau d'eau – fréquence en présence d'embâcles pour le centre-ville de Sainte-Raymond.

5.4 Courbe globale de niveaux d'eau – fréquence

Après avoir développé des relations niveau d'eau – fréquence pour les 11 secteurs du centre-ville présentés à la Figure 1 et ce pour les 3 aléas d'inondations, une courbe globale a été calculée (sommées des fréquences pour tous les niveaux d'eau atteints). Les résultats sont présentés à la Figure 19 pour chaque secteur. Il est à noter que pour certains secteurs, les crues à l'eau libre dominent la relation niveau d'eau – fréquence globale (ex. : Secteur 1, L'Espérance, ESP) tandis que pour d'autres secteurs, ce sont plutôt les embâcles (ex. : Secteur 3, Pont – Centre-ville, PCV). Dans certains cas, en amont du centre-ville, le frasil et les glaces du début de l'hiver semblent représenter le processus dominant (ex. : Secteur 6, Estacade – aval sud, EAS).



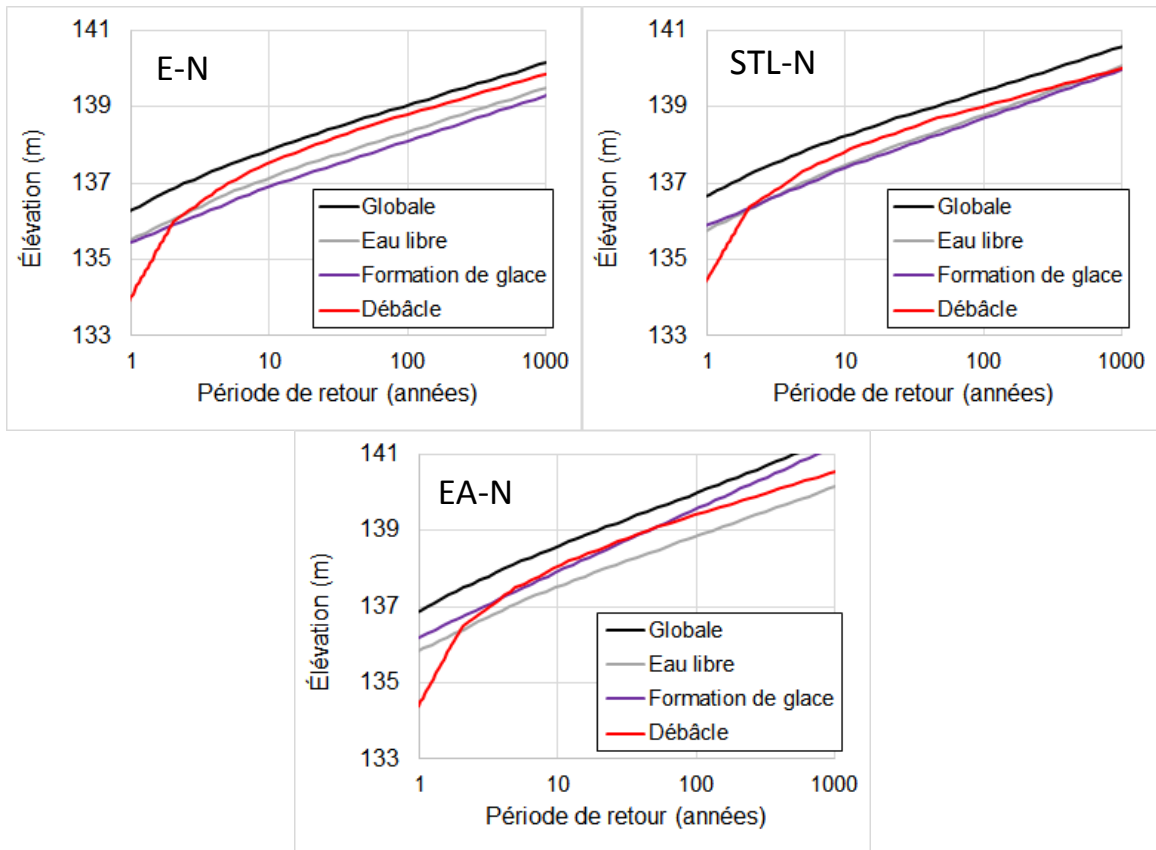


Figure 19. Relations niveau d'eau – fréquence globale, à l'eau libre, lors de la formation de la glace et lors de la débâcle pour les 11 secteurs du centre-ville.

La Figure 19, secteurs EHV (École – Hôtel de Ville) et STL (St-Louis), la ligne pointillée indique le niveau de la digue local. Cette digue, qui était conçue pour résister à un événement de 100 ans avec une revanche, serait plutôt submergée tous les 20 à 50 ans.

6. Analyse et résultats : Risque et dommage moyen annuel

La combinaison des courbes niveaux d'eau – dommage (Section 4) et des courbes niveaux d'eau – fréquence (Section 5) servent à évaluer la fréquence des dommages, donc le risque qui peut être exprimé sous la forme d'un dommage moyen annuel. Par contre, avant d'effectuer ce calcul, il est nécessaire de prendre en considération les digues qui protègent partiellement les édifices et infrastructure dans les différents secteurs du centre-ville de Saint-Raymond.

Deux fonctions ont été générées pour tenir compte des digues :

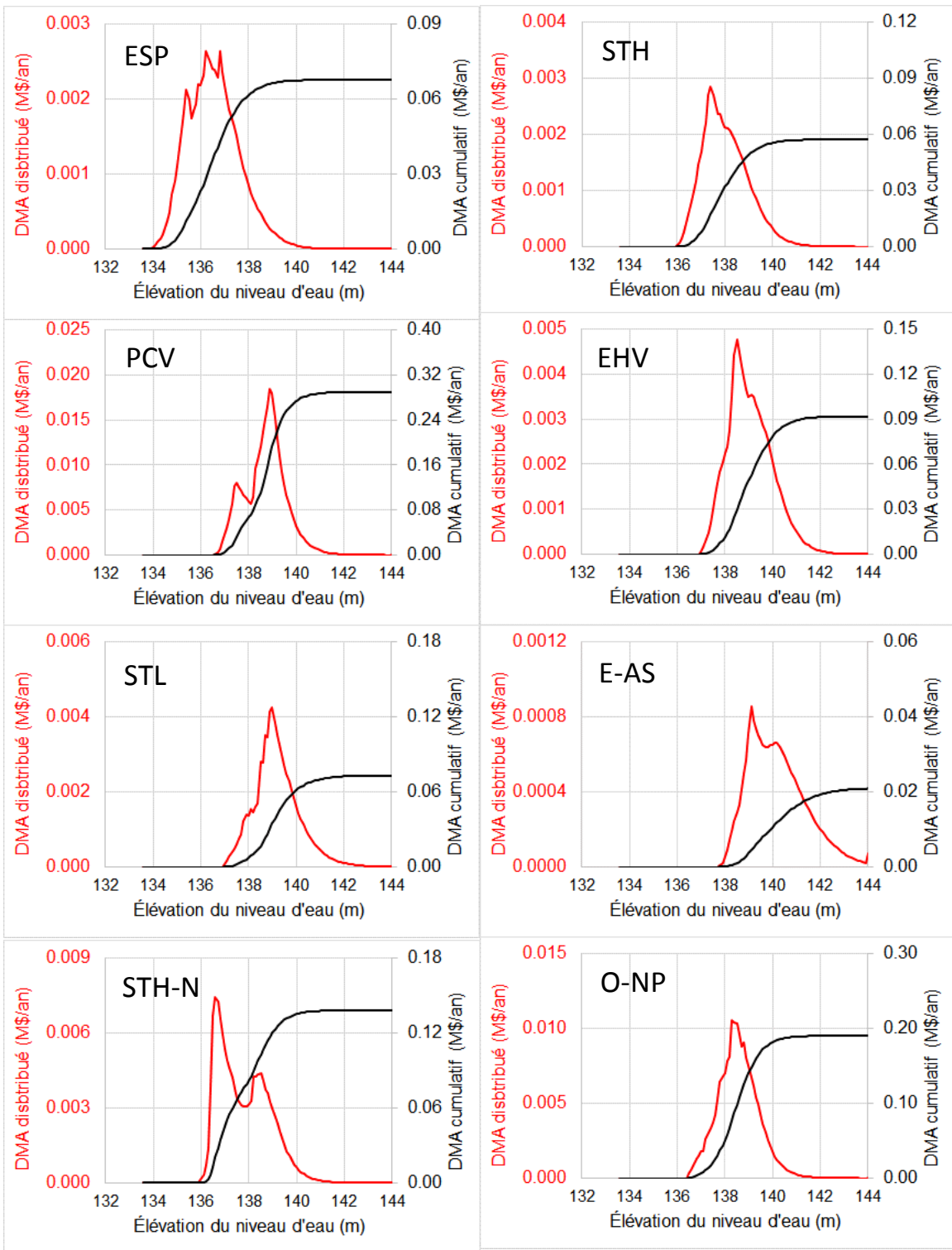
- Une première fonction propose que les dommages ne commencent qu'au-delà d'une certaine élévation, soit celle de la surface des digues (dont le niveau a été relevé à plusieurs dizaines d'endroits par l'équipe des Travaux publics de la ville, Tableau 19), mais qu'une partie des dommages en deçà de cette élévation surviendrait puisque les digues peuvent être contournées par l'amont ou l'aval. Cette fonction considère que les 4 clapets et les pompes du centre-ville seraient pourtant fonctionnels.
- Une seconde fonction tient compte du fait que la surface de l'eau qui s'accumulerait ou qui s'écoulerait du côté de la plaine inondable des digues serait à une élévation inférieure à l'eau confinée dans le chenal par les digues. Cette réalité s'applique spécialement aux inondations par les glaces, lorsque le débit est assez faible. Cette seconde fonction repose également sur des simulations avec le modèle HEC-RAS-2D de tous les secteurs du centre-ville

Tableau 19. Point bas des digues par secteur

No.	Nom	Élévation des digues (m)			No.
1	L'Espérance aval centre-ville	137.0			
2	Saint-Hubert	137.4	136.6	Saint-Hubert - nord	7
3	Pont - centre-ville	137.4	137.5	Des Ormes – nord des ponts	8
4	École - Hôtel de Ville	138.4	138.5	École - nord	9
5	St-Louis	138.5	138.6	St-Louis- nord	10
6	Estacade – aval sud	139.1	138.7	Estacade – aval nord	11

Les deux fonctions, qui simulent la réduction partielle des niveaux d'eau par la présence des digues, contribuent à faire diminuer le risque et le dommage moyen annuel (DMA).

La Figure 20 présente la distribution du risque (DMA distribué, en million de dollars par an) en fonction des niveaux d'eau pour chaque secteur du centre-ville ainsi que le DMA cumulatif (qui représente l'aire sous la courbe du DMA distribué). Il est à noter que les échelles sur les axes verticaux de la Figure 20 changent considérablement d'une section à l'autre à cause des différences entre les courbes de niveau d'eau – dommages (Figure 8) et niveau d'eau – fréquence (Figure 19) en plus de la présence des digues.



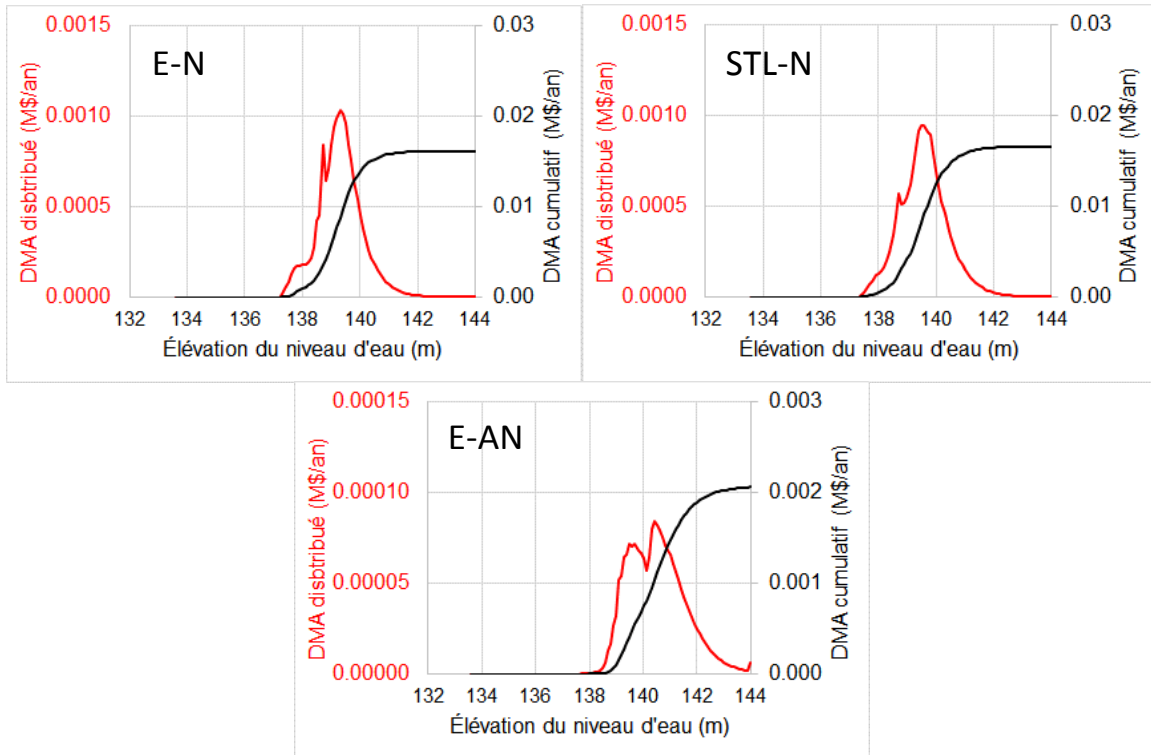


Figure 20. Risque (DMA) distribué et cumulatif pour chaque secteur du centre-ville de Saint-Raymond

Le Tableau 20 présente un résumé du DMA pour chaque secteur et le calcul total du DMA pour le centre-ville de Saint-Raymond qui se chiffre à 929 000 \$/an. Les secteurs les plus à risque sont proches des ponts.

Tableau 20. DMA de chaque secteur et DMA total pour le centre-ville de Saint-Raymond

Numéro	Nom	Code	DMA (M\$/an)	%
1	L'Espérance – aval du centre-ville	ESP	0,033	4
2	Saint-Hubert	STH	0,057	15
3	Ponts – centre-ville	PCV	0,290	31
4	École – Hôtel de Ville	EHV	0,092	10
5	Saint-Louis	STL	0,073	8
6	Estacade – aval sud	E-AS	0,021	2
Total Sud			0,566	70
7	Saint-Hubert - nord	STH-N	0,138	6
8	Des Ormes – nord des ponts	O-NP	0,190	20
9	École - nord	E-N	0,016	2
10	Saint-Louis - nord	STL-N	0,017	2
11	Estacade – aval nord	E-AN	0,002	0.2
Total Nord			0,363	30
DMA Total			0,929	

Finalement, le Tableau 21 présente la distribution du DMA selon l'aléa. Il est possible de constater que les embâcles dominent l'aléa selon les calculs et modèles. Les inondations à l'eau libre ne représentent que 29% du DMA.

Tableau 21. Distribution du DMA selon l'aléa inondation.

Aléa	DMA (M\$/an)	Ratio
Inondations à l'eau libre	0.266	29%
Inondations lors de la formation du couvert de glace	0.140	15%
Inondations lors de la débâcle printanière	0.524	56%

7. Conclusion et suite du projet

La ville de Saint-Raymond est exposée aux inondations et plusieurs de ses édifices, infrastructures et résidences sont à risque. Le présent rapport souligne quelques points qui n'avaient pas été envisagés avant d'entreprendre cette étude :

- Le risque annuel moyen ou dommage annuel moyen (DMA) associé aux inondations pour le centre-ville (divisé en 11 secteurs dans la présente étude) est de 929 000\$/an, en considérant les digues construites en 2009, le Barrage Estacade construit en 1976 et toutes les autres mesures mises en place à ce jour. Il est à noter que quelques résidences et chalets sont exposés en amont du centre-ville, ce qui représente probablement un montant additionnel de moins de 1%.
- La digue construite en 2009 et les 4 clapets, qui avaient été conçus pour résister à une crue à l'eau libre de récurrence de 100 ans (malgré qu'elle ait été construite suite à une inondation par le frasil), pourraient en fait être submergés, en moyenne, une fois à tous les 60 ans par des crues à l'eau libre et, en moyenne, une fois à tous les 20 ans si toutes les formes d'inondations sont considérées (données du Clapet St-Louis, le plus contraignant). En sommes, il y a 87% de probabilité que les digues soient submergées au moins une fois sur les 40 prochaines années.
- Les secteurs les plus vulnérables en termes de valeur et dommages potentiels sont situés de part et d'autre des ponts et jusqu'au secteur St-Louis sur la rive sud. Par contre, sous la loupe du DMA, 35% du risque est situé sur l'avenue St-Jacques et l'avenue St-Émilien, sur la rive nord, principalement à cause de leur basse élévation et par le fait que ces secteurs peuvent être affectés par un refoulement de la rivière Sainte-Anne par la rivière Bras du Nord de même que par la rivière Sainte-Anne par-dessus les digues et murets qui sont assez bas dans les secteurs des ponts.
- Les ponts Chalifour et Tessier, inclus dans le Secteur Pont – Centre-ville, présentent un risque relativement élevé de plus de 100 000\$ annuellement (33% du risque du secteur). Bien qu'ils ne subissent pas de dommage majeur sous la cote 138.5 m (récurrence de 50 ans), ils seraient possiblement perdus à la cote 139.0 m (récurrence de 150 ans).
- L'imposante résidence Estacade, bien que située à une basse élévation dans un secteur où les digues sont également basses, ne représente qu'un risque annuel d'environ 10 000\$. La raison principale tient du fait que tout ce dommage annuel moyen surviendrait au premier étage seulement.

Les résultats de cette étude de risque matériel actuel serviront à évaluer les montants financiers qu'il est rentable d'investir pour protéger le centre-ville de Saint-Raymond contre les inondations. Plusieurs mesures ont été proposées, certaines peu coûteuses et potentiellement efficaces pour réduire le risque. Les prochaines étapes du projet consisteront à :

- Évaluer l'efficacité et la réduction du risque associées à une ou plusieurs mesures de mitigation à la fois à l'aide de différents modèles (ex. : Turcotte et Morse, 2017)
- Confirmer les mesures de mitigation prioritaires
- Émettre des recommandations finales
- Appuyer les différents ministères et intervenants dans la réalisation des mesures recommandées.

Cette étude n'a chiffré que les dommages matériels. Néanmoins, lors des inondations, il existe également un risque pour les personnes. Ce dernier dépend du nombre de personnes sur le territoire et dans chaque secteur, de leur vulnérabilité, des systèmes d'alerte précoce, de la résilience de la communauté, de l'efficacité des interventions par des membres de la famille, des voisins et des autorités, de l'efficacité des plans d'urgence ainsi que des conditions lors de l'inondation (nuit ou jour, la température de l'air et de l'eau, la présence ou non de blocs de glace, le nombre d'endroits ou de routes impassables, la profondeur et la vitesse de l'eau ainsi que la vitesse à laquelle les niveaux montent). Les méthodes d'analyse de ce risque ne sont pas bien développées, mais il demeure important d'en faire une évaluation, même qualitative, afin d'identifier des mesures efficaces pour réduire ce risque et d'évaluer l'impact des mesures proposées sur la réduction du risque non seulement matériel (DMA), mais également pour les personnes.

Remerciements

Les auteurs de ce rapport désirent souligner la contribution de différents intervenants à ce projet :

- M Pascal Marceau et ses collègues du MSP, client de ce projet, pour leurs idées, leur collaboration et leur proactivité pour faire avancer ce dossier
- Les nombreux étudiants et membres du personnel de l'Université Laval pour leur assistance sur le terrain, pour l'analyse de données et pour la modélisation hydrodynamique
- La Ville de Saint-Raymond pour sa disponibilité et pour son assistance sur le terrain
- L'équipe du professeur Isabelle Thomas de l'Université de Montréal pour la préparation des données de vulnérabilité
- Les membres du Comité Rivière de Saint-Raymond pour leur intérêt et pour leur participation au dialogue pour identifier des dommages et les mesures de mitigation des inondations
- Les citoyens de la ville de Saint-Raymond pour leur patience et leur compréhension.

Références

Aaltonen, J., Huokuna, M. 2017. Flood mapping of river ice breakup jams in River Kyrönjoki delta. Présenté lors de la 19^e Conférence du CGU HS Committee on River Ice Processes and the Environment, Whitehorse, Yukon, 9-12 Juillet 2017.

Bonnifait, L. 2005. Développement de courbes submersion-dommages pour l'habitat résidentiel québécois. Mémoire. Québec, Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique, maîtrise en sciences de l'eau, 80 p.

CAPSA, 2015. Portait historique et des enjeux associés aux inondations. Québec, 63 p.

Centre d'expertise hydrique du Québec, CEHQ, 2003, Service de la connaissance et de l'expertise hydrique, Programme de détermination des cotes de crues de récurrence de 20 ans et de 100 ans (PDCC). *Rivière Sainte-Anne, Ville de Saint-Raymond, Programme de détermination des cotes de crues*. PDCC 03-006.

Larouche-Couture, J. 2017. Analyse des coûts liés aux dommages causés par les inondations : Le cas de la ville de Saint-Raymond, Portneuf. Essai de Maîtrise, Université de Montréal.

Lindenschmidt, K-E., 2017. Modelling probabilities of ice jam flooding from artificial breakup of the Athabasca River ice cover at Fort McMurray. Présenté lors de la 19^e Conférence du CGU HS Committee on River Ice Processes and the Environment, Whitehorse, Yukon, 9-12 Juillet 2017.

Ministère de la sécurité publique (MSP), 2015. Programme général d'aide financière lors de sinistres réels ou imminents. En ligne. Repéré à <https://www.securitepublique.gouv.qc.ca/securite-civile/aide-financiere-sinistres/programmes/programme-general-daide-financiere-lors-de-sinistres-reels-ou-imminents/en-ligne.html>

Morse, B., Turcotte, B., 2018. Risque d'inondations par embâcles de glaces et estimation des débits hivernaux dans un contexte de changements climatiques (volet A). Mars. 74 p.

Turcotte, B., Morse, B., 2017. Sous-projet 4 : Techniques structurelles visant à inciter la formation d'un couvert de glace à l'amont de la ville, Rapport sur le bilan des recommandations, présenté au ministère de la Sécurité publique. 31 mars. 9 p.

Turcotte, B., Morse, B., 2016. A simple 1-D river ice model to simulate frazil jam formation and mitigation strategies. Dans: 23^e Symposium international de l'IAHR. Ann Arbor, MI, 31 mai au 3 juin 2016.

Annexe 1 : Programme général d'aide financière lors de sinistres réels ou imminents (MSP, 2015)

Particulier

Pour les propriétaires d'une résidence principale, une aide financière est disponible pour les éléments suivants :

- Mesures préventives temporaires, jusqu'à concurrence de 3 000 \$ (Ex. : surélévation des meubles, placardage des ouvertures, préparation et installation des sacs de sables, érection d'un remblai, etc.)
- Hébergement suite à des évacuations (20 \$/jour entre le 4^e et 100^e jour)
- Habillement si la personne n'a pas le temps de partir avec (50 \$/personne ou 150 \$ par temps froid)
- Réparation ou remplacement des biens et meubles essentiels (Ex. : réfrigérateur, table et chaise, mobilier de salon, téléviseur, mobilier de chambre, laveuse et sècheuse, vêtements, tondeuse, poubelle extérieure, etc.)
- Frais de déménagement ou entreposage jusqu'à concurrence de 1000 \$
- Travaux d'urgence et temporaires (Ex. : pompage de l'eau, démolition, décontamination, location d'équipement, disposition des débris, etc.). Ces travaux sont admissibles pour les composantes essentielles (structure, toiture, ouverture, électricité, plomberie, etc.) et pour les pièces essentielles, soit le salon, la cuisine, la salle de bain, la salle de lavage et les chambres occupées en permanence.
- Chemin d'accès essentiel
- Immunisation ou déplacement d'une résidence principale, stabilisation de terrain
- Allocation de départ

Entreprise

Pour les entreprises avec un revenu annuel inférieur à 500 00 \$, une aide financière est disponible pour les éléments suivants :

- Mesures préventives temporaires, jusqu'à concurrence de 5 000 \$
- Frais de déménagement ou d'entreposage, jusqu'à concurrence de 2 500 \$.
- Dommages aux biens essentiels à l'exploitation de l'entreprise (Terrains, bâtiments, infrastructures, équipements, stocks, chemin d'accès et terres agricoles), jusqu'à concurrence de 200 000 \$
- Travaux d'urgence et temporaires (Ex. : Pompage, démolition, disposition des débris, décontamination, location d'équipement).
- Immunisation ou déplacement des bâtiments essentiels à l'exploitation d'une entreprise, stabilisation de terrain, allocation de départ

Municipalité

- Mesures préventives temporaires (Ex. : fermeture d'une route, creusage d'un fossé temporaire, préparation et installation des sacs de sables, érection d'une digue ou remblai, etc.)
- Bris d'un couvert de glace ou d'un embâcle (location de machinerie, main-d'œuvre, coûts des travaux réalisés par un entrepreneur spécialisé, honoraires professionnels pour la surveillance des cours d'eau lors de l'imminence d'une inondation)
- Dommages à des biens essentiels (bâtiments essentiels, infrastructures d'égouts sanitaires et pluviaux, système d'alimentation en eau potable, véhicule ou machinerie municipale, etc.)
- Travaux d'urgence et temporaires (Ex. : Pompage, démolition, disposition des débris, décontamination, location d'équipement, dragage de sédiments, stabilisation des berges, etc.).
- Mesure d'intervention et de rétablissement (Centre d'hébergement, évacuation et sauvetage, surveillance, main-d'œuvre additionnelle et heures supplémentaires, construction d'infrastructures temporaires, location de machinerie, etc.).
- Aménagement de sites d'accueil
- Travaux de protection des berges
- Mesures d'intervention lors de l'imminence de submersion, d'érosion ou de mouvements de sol, jusqu'à concurrence de 5 000 \$.

Annexe 2 : Liste détaillée des exclusions au programme d'aide financière du gouvernement du Québec, Appendice L (MSP, 2015)

Pour les sinistrés et les organismes

Sont expressément exclus de ce programme :

1. La franchise d'une assurance ainsi que l'excédent des limites de cette assurance ;
2. Les dommages aux automobiles et aux véhicules récréatifs ;
3. La perte de revenu ;
4. la perte de valeur marchande d'un bien ;
5. la perte de terrain ;
6. les pertes et les dommages dont un sinistré ou un organisme est responsable ;
7. les mesures d'urgence, les mesures préventives temporaires, les mesures d'intervention et de rétablissement, ainsi que les dommages aux biens essentiels qui ont fait ou pourraient faire l'objet d'une aide financière en vertu d'un programme existant établi sous le régime d'une autre loi, d'un programme du gouvernement fédéral, d'organismes publics ou communautaires ou d'associations sans but lucratif ;
8. les articles de sport et de loisir, les jouets, les bibelots, les objets d'art, les articles de décoration, les bijoux, les antiquités, qui ne sont pas essentiels à l'exploitation d'une entreprise ;
9. les intérêts sur les obligations financières contractées en raison du sinistre ;
10. l'achat de nouveau matériel ou de nouveaux équipements réutilisables

Pour les particuliers

Sont expressément exclus de ce programme :

1. les dommages à un bâtiment autre qu'une résidence principale, notamment à un chalet et à tout bâtiment utilisé par le particulier à des fins récréatives ;
2. les dommages à un abri d'auto, à un garage et à d'autres dépendances non essentielles ou ne faisant pas partie intégrante de la structure de la résidence principale ;
3. la perte d'animaux et tous les frais résultant d'une maladie ou d'une blessure subie par un animal ;
4. les dommages à un boisé, à une plantation d'arbres et à tout équipement ou infrastructure liés à leur exploitation ;
5. les dommages à une piscine ou à d'autres installations ou équipements récréatifs ;
6. les dommages aux vêtements de luxe et aux appareils de climatisation ;
7. les frais d'expertise, à l'exception de ceux pour lesquels une aide financière est expressément prévue par le présent programme ;

8. les dommages au terrain, à son aménagement ainsi qu'aux ouvrages conçus pour les protéger de façon permanente ;
9. les dommages aux digues et aux barrages ;
10. les dommages aux clôtures ;
11. les dépenses relatives au nettoyage d'un cours d'eau.

Pour les entreprises

Sont exclus de ce programme, selon l'article 42, 2^e paragraphe :

- les dommages relatifs aux biens liés à un culte religieux, aux animaux de ferme ou aux animaux qui ne sont pas essentiels à l'exploitation d'une entreprise, à l'aménagement d'un terrain, aux cultures sur pied, à la croissance d'une récolte ou à l'impossibilité de semer ainsi qu'aux dommages à un boisé ou à une plantation d'arbres.

Pour les municipalités

Sont expressément exclus de ce programme :

1. les dommages aux chemins appartenant à une municipalité, et à ceux dont elle est responsable de l'entretien qui donnent accès uniquement à des propriétés qui ne sont pas des résidences principales, à des installations récréatives qui n'appartiennent pas à la municipalité, à des zones de villégiature qui n'appartiennent pas à la municipalité, à des zones forestières ou des zones minières, de même qu'à des territoires appartenant à un organisme public ou parapublic ;
2. les dommages aux clôtures, sauf si elles sont essentielles à la sécurité des personnes ;
3. les dommages à un boisé, à une plantation d'arbres ou à tout équipement ou infrastructure liés à leur exploitation.

Annexe 3 : Questions du sondage du comité rivière (CAPSA, 2015)



Nous sommes venus vous visiter pour compléter un sondage suite à l'inondation 2014.

Étant donné que vous étiez absents, nous vous proposons 2 options :

Appeler : Carole Lépine au 418 337-4701 ou Lisette Bédard au 418 337-2586

Ou

Vous pouvez compléter le sondage et le déposer en tout temps dans la chute de la porte avant de l'hôtel de ville.

- 1- Avez-vous été inondé ? _____
- 2- Si oui, combien de dommage environ ? _____
- 3- Avez-vous réclamé à la sécurité publique ? _____
- 4- Avez-vous été évacué ? _____ Si oui, combien de personnes ? _____
- 5- Avez-vous déménagé ? _____ Combien de temps ? _____

Nom : _____ Adresse : _____

Sécurité publique : 418 643-2433

Sans frais : 1 888 643-2433

Merci de votre collaboration

Annexe 4 : Questions du recensement de la CAPSA (CAPSA, 2015)

Questionnaire sur les coûts engendrés par les conséquences de l'inondation de 2014 à Saint-Raymond



Veillez répondre au meilleur de vos connaissances. Si vous êtes dans l'impossibilité de répondre à l'une des questions ou que celle-ci ne vous concerne pas, passez à la suivante.

Si vous avez des difficultés, vous pouvez appeler un employé de la CAPSA au 418-337-1398 sur les heures de bureau, soit du lundi au vendredi de 8h30 à 16h30 ou en nous écrivant par courriel à capsa@capsa-org.com

Nous vous assurons que toutes les mesures ont été prises pour que les renseignements personnels que vous fournirez demeurent parfaitement *confidentiels* et que ceux-ci ne seront en aucun cas diffusés sans votre approbation.

RECENSEMENT

Q1- Nom

Prénom

--	--

Q2- Adresse et code postal

--

Q3- Numéro de téléphone

--

Q4- Avez-vous été affectés (perte ou dommage matériel, arrêt de travail, perte de revenu, conséquence physique ou mentale, etc.) par l'inondation? / Votre entreprise, organisme ou administration publique a-t-il été affecté (perte ou dommage matériel, arrêt de travail, perte de revenu, conséquence physique ou mentale, etc.) par l'inondation?

(Si vous avez répondu non, vous n'avez pas à remplir le formulaire. Vous pouvez le remettre.)

- Oui	- Non
-------	-------

Q4b- Est-ce que les activités courantes de l'entreprise, de l'organisme ou de l'administration publique ont été perturbées durant et/ou après l'inondation?

(Si vous avez répondu non, vous n'avez pas à remplir le formulaire. Vous pouvez le remettre.)

- Oui les activités ont fonctionné au ralenti
- Oui les activités ont complètement arrêté
- Non

Q4c- À combien estimez-vous la perte de revenu de ces perturbations due à l'inondation?

--

Q5- Est-ce que vous habitez dans une zone qui a été affectée par l'inondation? / Est-ce que votre entreprise, organisme ou administration publique est situé dans une zone qui a été affectée par l'inondation?

- Oui, je suis propriétaire
- Oui, je suis locataire
- Non, mais je suis propriétaire
- Non, je n'habite pas dans l'une de ces zones

Q6- Si vous étiez propriétaires, est-ce que votre propriété (bâtiment/terrain) a subi des dommages en raison de l'inondation? / Si votre entreprise, organisme ou administration publique était propriétaire d'un bâtiment et/ou d'un terrain dans l'une de ces zones, est-ce que cette propriété a subi des dommages en raison de l'inondation?

- Oui	- Non
-------	-------

Q7- Si oui, à combien estimez-vous le coût des dommages au niveau de la propriété?

--

Q8- Si vous habitez dans l'une des zones qui a été inondée, combien de personne résidait dans votre domicile au moment de l'inondation? *(en vous incluant)*

--

Q8b- Si votre entreprise, organisme ou administration publique était situé dans l'une des zones qui ont été inondées, combien de personnes étaient à l'emploi lors de l'inondation? (en vous incluant)

Q9- Si vous habitez le secteur, combien de personnes de votre ménage ont eu recours à un professionnel de la santé pour un problème provoqué ou amplifié par l'inondation (stress élevé, grande fatigue, etc.)? (Mettre 0, si aucune personne n'a eu recours à ces services)

Q10- Avez-vous (l'ensemble des personnes de votre ménage) eu d'autres dommages (ex. bien matériel, ameublement, véhicule motorisé, cabanon, etc.)? / Avez-vous (l'entreprise et l'ensemble des employés) subi d'autres dommages (ex. bien matériel, ameublement, véhicule motorisé, cabanon, etc.)? (Encercler la réponse)

Q11- Si oui, à combien estimez-vous le coût des autres dommages?

Q12- Avez-vous été évacué de ce bâtiment lors de l'inondation? / Avez-vous été évacués de votre entreprise, organisme ou administration publique lors de l'inondation? (Encercler la réponse)

Q13- Si oui, par quel moyen avez-vous été évacués?

Q14- Si vous avez été évacué, où avez-vous été hébergé durant l'inondation?

(Encercler la réponse)

Q15- À combien estimez-vous le coût d'un tel hébergement? (si applicable)

Q16- Combien de personnes à votre domicile ont dû s'absenter du travail durant et après la période de l'inondation? / Combien de personnes à votre entreprise, organisme ou administration publique ont dû s'absenter du travail durant et après la période de l'inondation?

Q17- À combien estimez-vous la perte de ces revenus due à l'arrêt de travail? / À combien estimez-vous la perte de revenus pour ces employés qui ont dû s'absenter du travail?

(si applicable)

Q18- Si vous avez reçu de l'aide de votre entourage pendant et après l'inondation, combien d'heures estimeriez-vous que ces gens vous ont donné?

(Mettre 0, si vous n'avez reçu aucune aide)

Q19- Avez-vous réclamé de l'argent à vos assurances suite à l'inondation?

Oui
Non, mon assurance ne couvre pas ce type de dommage
Non

Q20- Avez-vous réclamé de l'argent au ministère de la Sécurité publique suite à l'inondation?

Oui
Non
Non, mes dommages n'étaient pas couverts par le service d'aide du ministère

Q21- Comment avez su pour la première fois qu'une inondation été en cours ?

J'ai constaté l'eau monter
Par l'appel d'un proche ou d'un voisin
Par les services d'urgences (Pompiers, policiers)
Par un message à la télévision
Par un message à la radio
Par un message de la ville
Par un message sur Internet ou les réseaux-sociaux

Q22- Avez-vous des commentaires, des suggestions ou toutes autres choses à nous mentionner?

Q23- Autorisez-vous le ministère de la Sécurité publique à utiliser les données transmises, à des fins de recherche, d'amélioration de la connaissance et de traitement des risques reliés aux inondations, aux mouvements de terrain et aux phénomènes d'érosion?

Merci pour votre collaboration

Annexe 5 : Courbes Marois

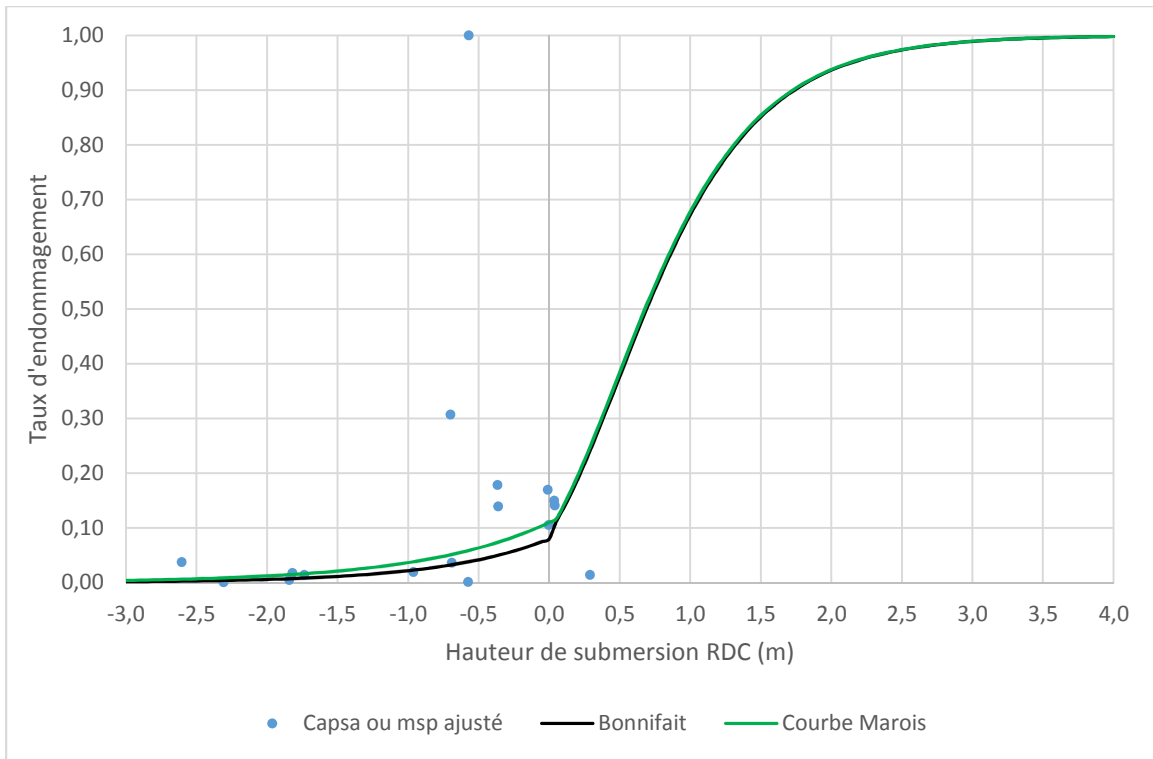


Figure 21 : Taux d'endommagement pour 1 étage sans sous-sol

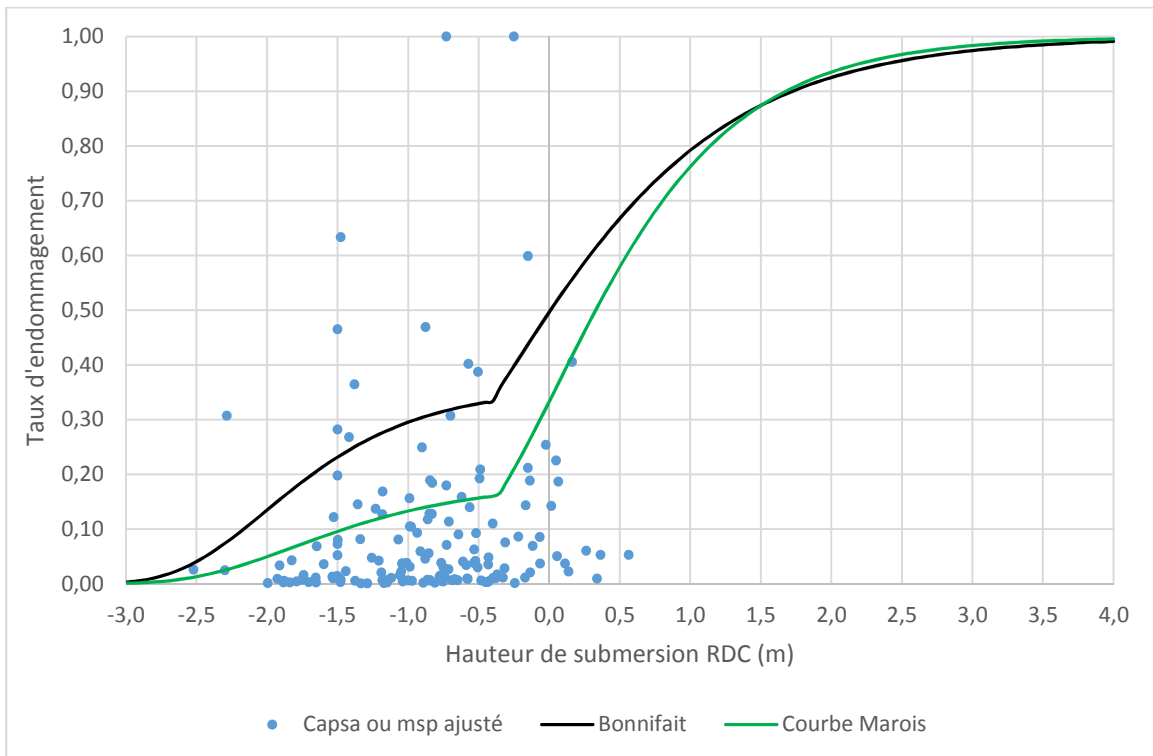


Figure 22 : Taux d'endommagement pour 1 étage avec sous-sol

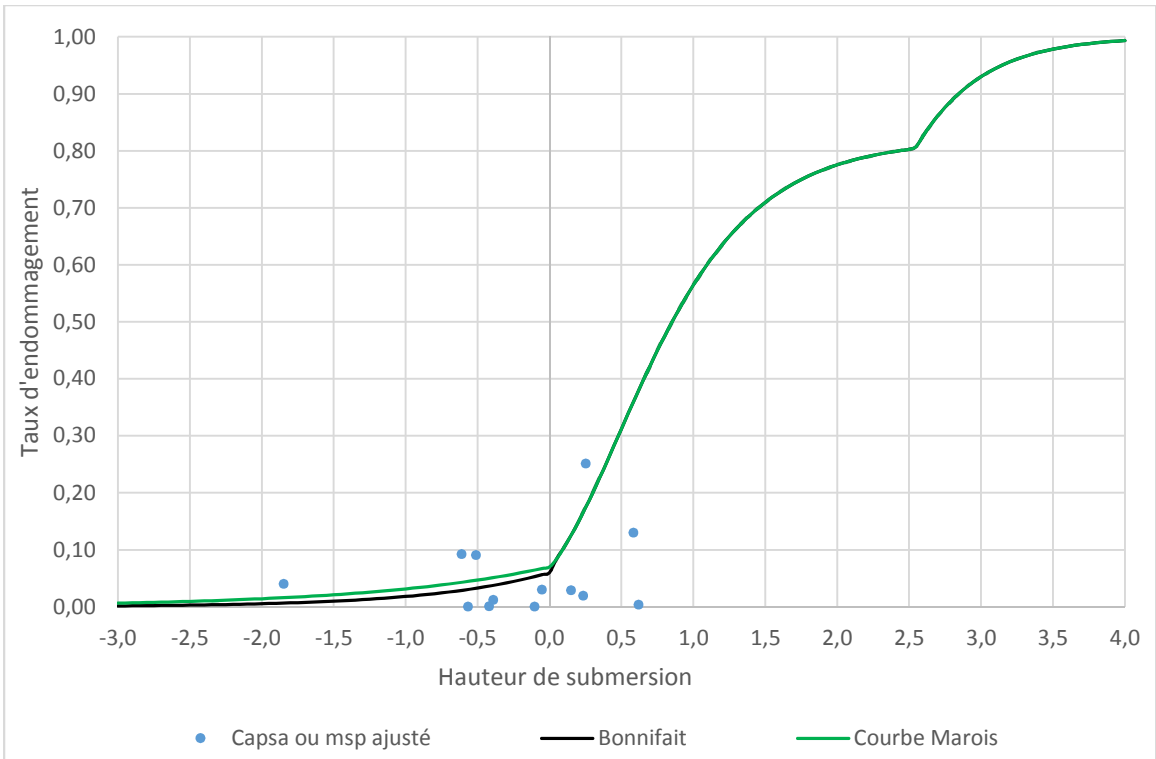


Figure 23 : Taux d'endommagement pour 2 étages ou plus sans sous-sol

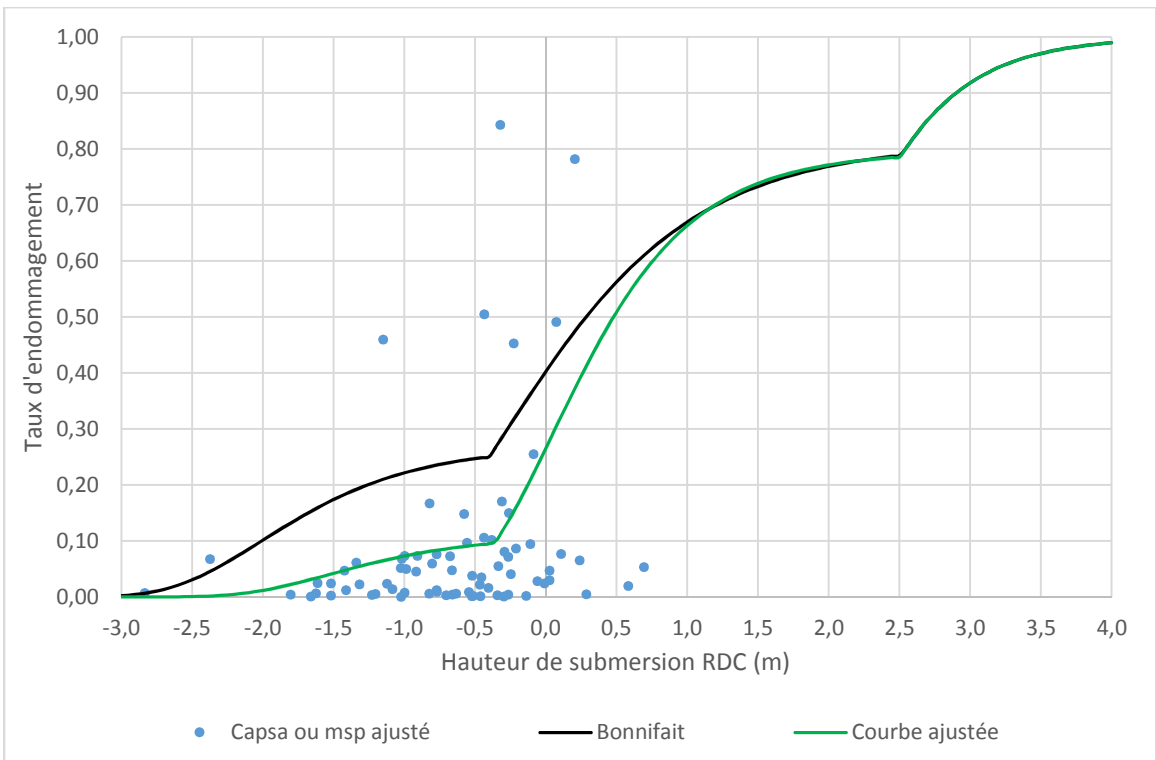


Figure 24 : Taux d'endommagement pour 2 étages ou plus avec sous-sol

Annexe 6 : Courbes ajustées à la première ouverture

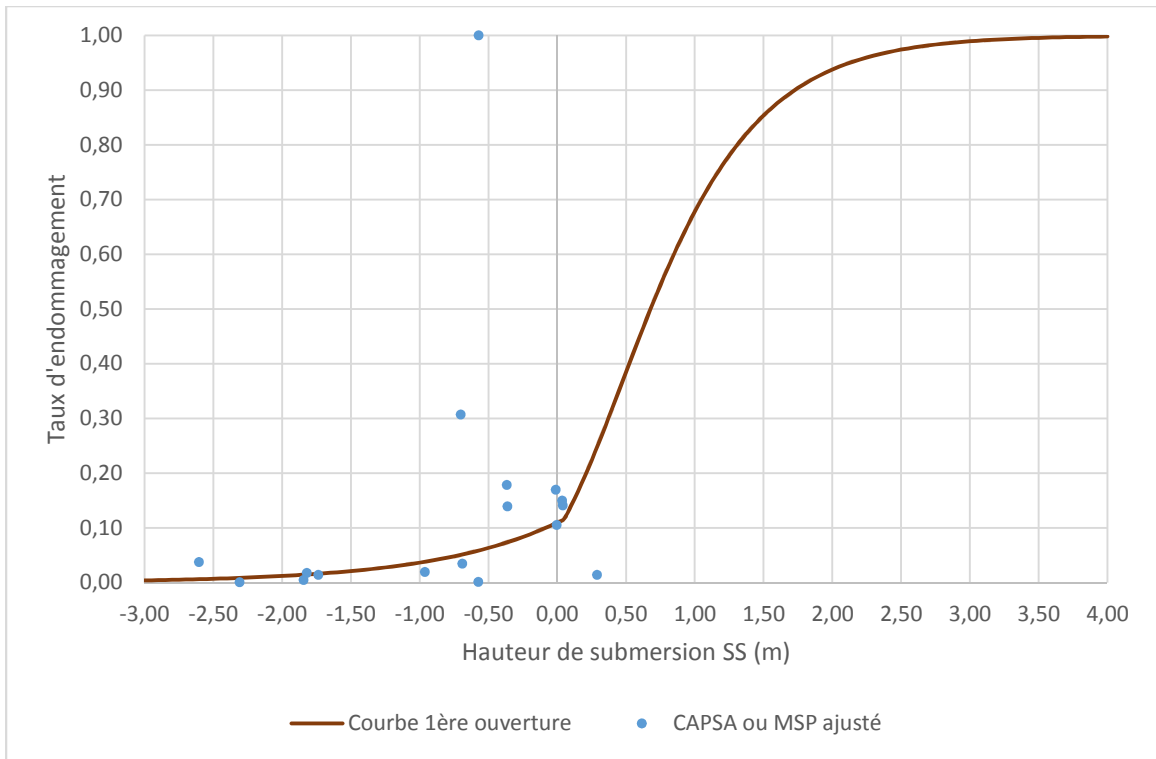


Figure 25 : Taux d'endommagement pour 1 étage sans sous-sol

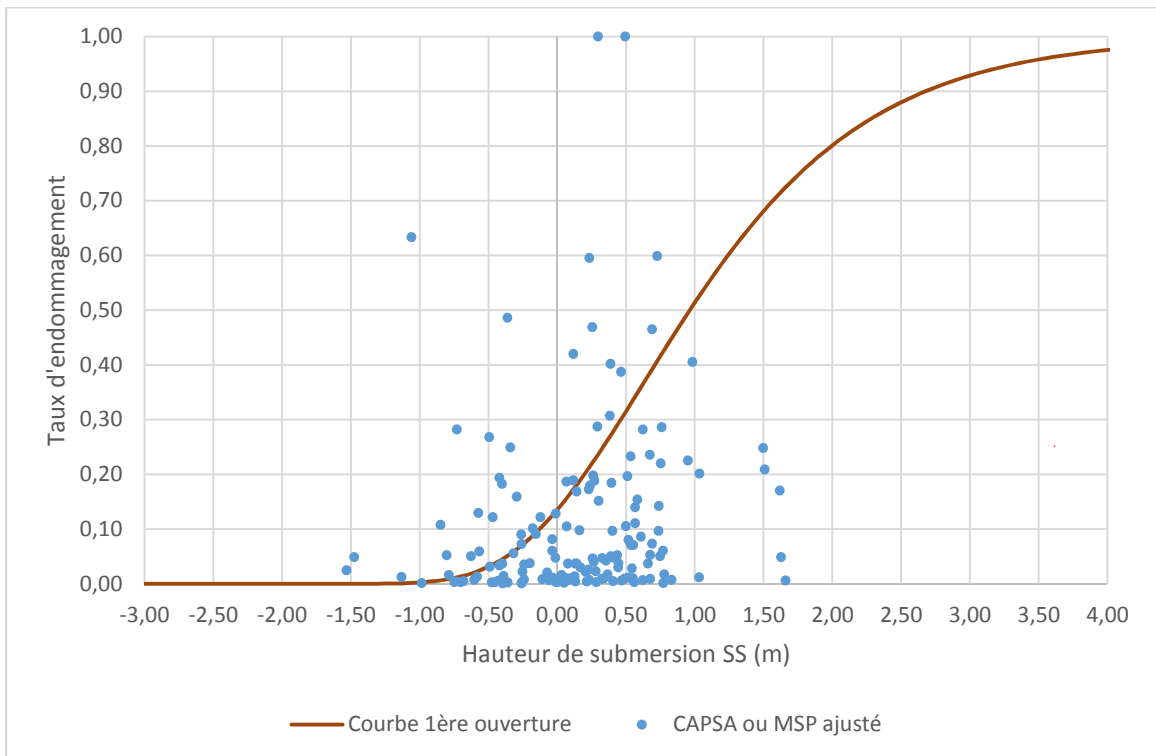


Figure 26 : Taux d'endommagement pour 1 étage avec sous-sol

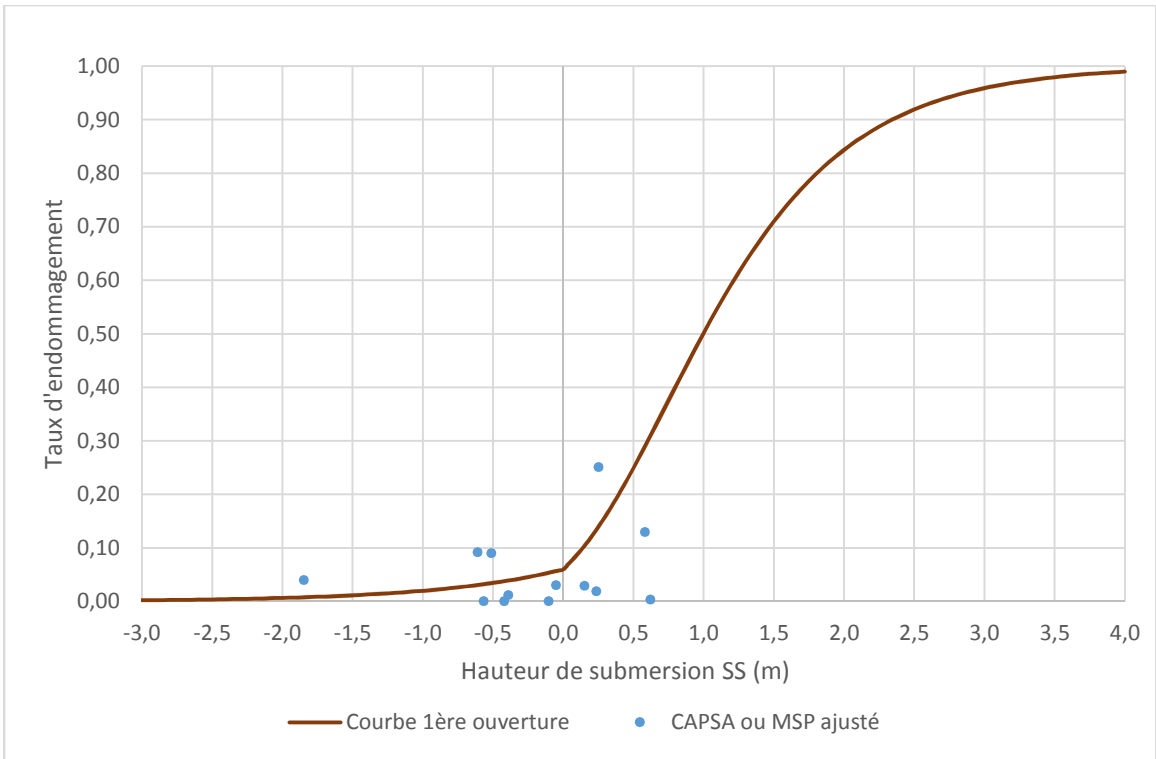


Figure 27 : Taux d'endommagement pour 2 étages ou plus sans sous-sol

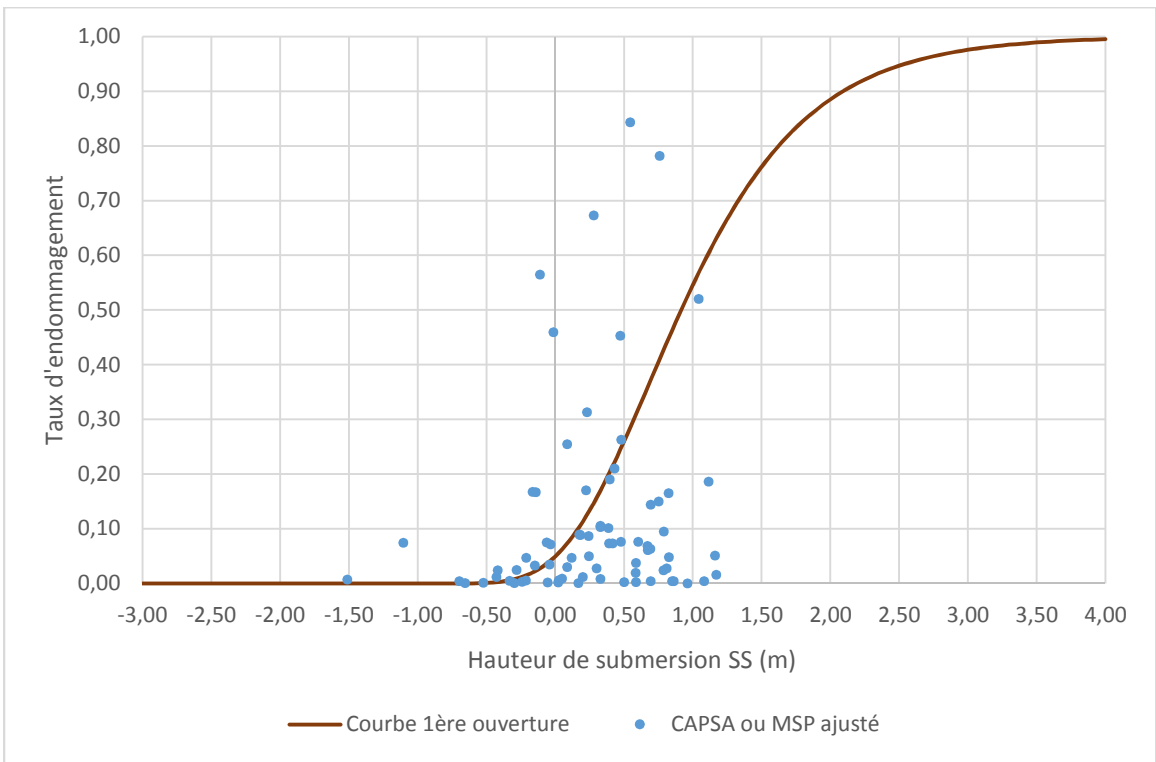


Figure 28 : Taux d'endommagement pour 2 étages ou plus avec sous-sol