

**Comité expert visant à identifier des solutions porteuses
pour la réduction de la vulnérabilité des risques liés à
l'inondation par embâcles de glace sur la rivière Chaudière**

Rapport final

Avril 2020

Pour

Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques



Ce rapport a été préparé par :

Pascale Biron, professeure, Université Concordia

Etienne Boucher, professeur, Université du Québec à Montréal

Wael Taha, ingénieur, Lasalle | NHC

Analyse hydrologique

Jean-Luc Martel, ingénieur, Lasalle | NHC

Albéric Fournier, ingénieur junior, Lasalle | NHC

Photographie page frontispice

Inondation à Beauceville en avril 2019 (source : Ministère de la sécurité publique)

Résumé

1. Introduction

Les problèmes d'inondation en eau libre et par embâcles de glace sur la rivière Chaudière sont notoires et documentés depuis le 19^{ème} siècle. Il semble toutefois que la fréquence des inondations ait augmenté dans les dernières années, tant en ce qui a trait aux inondations par embâcle qu'en eau libre, suscitant une inquiétude grandissante pour les riverains et un désir de trouver des solutions durables.

Le mandat du comité expert (CE) est d'identifier, de manière consensuelle, des solutions porteuses à l'échelle du bassin versant de la rivière Chaudière, dans une vision intégrée, visant la réduction de la vulnérabilité des risques liés à l'inondation par embâcle de glace et en eau libre.

2. Synthèse des analyses

L'analyse hydrologique a mis en évidence une légère augmentation des débits maximums annuels et une augmentation plus significative des volumes d'eau dans les dernières décennies. L'hydraulicité de la rivière Chaudière semble donc en croissance, ce qui se traduit par une aggravation des épisodes d'inondation. Toutefois, les tendances futures sont incertaines et devront faire l'objet d'une modélisation hydrologique en climat futur.

L'analyse des hivers glaciologiques a montré que la rigueur des hivers n'a pas été affectée significativement par des changements climatiques récents. Les changements aux températures de l'air ne sont donc pas la cause des épisodes d'inondations par embâcles les plus sévères qui ont lieu au printemps. Toutefois, des redoux hivernaux ont causé des épisodes d'embâcles en début d'hiver ou au cœur de l'hiver dans les 15 dernières années. Bien que moins sévères que les inondations printanières car les volumes de glace y sont moins élevés, ces événements augmentent la fréquence des inondations par embâcles.

L'analyse hydrogéomorphologique a montré que l'aggradation de la rivière Chaudière perçue par les autorités locales ne semble pas évidente, suite à l'analyse des données existantes. Cette conclusion devrait être confirmée ou infirmée par la collecte de données bathymétriques substantielles. Les accumulations de sédiments à l'embouchure des tributaires ont de tout temps été présentes et ne peuvent donc pas être associées à une tendance récente.

L'analyse des inondations en eau libre a permis de conclure que les municipalités de Vallée-Jonction, Sainte-Marie et Scott, et dans une moindre mesure Saint-Joseph, souffrent de problématiques d'inondations en eau libre. Les niveaux d'eau semblent monter rapidement mais baissent ensuite très lentement à cause d'un problème d'évacuation réduite des eaux à la sortie du tronçon et d'un emmagasinage élevé des eaux de crue dans la plaine inondable. L'aléa est le plus sévère à Saint-Joseph mais le risque, représenté par l'ampleur des dommages, est le plus élevé à Scott et Sainte-Marie. Si l'on

considère que le risque est la combinaison de la sévérité de l'aléa et de la vulnérabilité, on constate que les municipalités de Scott et Sainte-Marie sont les plus vulnérables à cause de l'occupation de la plaine inondable.

L'analyse des inondations par embâcles a montré que ce type d'inondation est limité à la partie amont du tronçon à l'étude, soit de Saint-George à Saint-Joseph. Depuis la construction du barrage Sartigan en 1967, Saint-Georges, Notre-Dame-des-Pins et même Beauceville ont noté une amélioration des problématiques d'embâcles. Toutefois, Beauceville subit encore des dommages d'inondation par embâcles élevés et fréquents. Saint-Joseph reçoit les ondes de crue causées par les décrochements d'embâcles dans le secteur de Beauceville, amorçant ainsi les épisodes d'inondation en eau libre. L'aléa consiste en un décrochement d'embâcle similairement à un bris de barrage puis la rétention des eaux d'inondation par l'embâcle qui se reforme en aval de la ville, bouchant ainsi le passage d'évacuation. On peut donc en conclure que le risque d'inondation à Beauceville est élevé à cause d'un aléa très sévère.

3. Solutions examinées et recommandations

Des solutions issues de différentes sources ont été examinées par le comité. Les solutions pour les inondations en eau libre incluent les variantes de dragage, la dérivation de débit, la rétention d'eau, la restauration des tributaires, la délocalisation et l'immunisation par l'endiguement. Les solutions aux inondations par embâcles incluent, quant à elles, les variantes d'estacades, les interventions d'affaiblissement du couvert de glace, les variantes visant à augmenter les vitesses pour favoriser la débâcle en aval de Beauceville, la rétention d'eau, la rétention de glace, la désobstruction et la délocalisation.

Le caractère « porteur » des solutions possibles a été évalué à partir d'une grille d'analyse fondée sur quatre critères, soit la réduction du risque, le coût, l'impact environnemental et l'acceptabilité sociale. De manière concertée entre les membres du comité expert, toutes les solutions retenues ont été évaluées semi-quantitativement et le score de chacune des solutions a été calculé à partir de l'algorithme Prométhée.

Pour les solutions en eau libre, deux groupes de solutions se distinguent comme étant porteuses : le groupe à vocation environnementale, soit la solution de délocalisation, et le groupe des solutions d'ingénierie incluant l'excavation du seuil et du lit de la rivière et l'immunisation par endiguement. Ces deux groupes de solutions soulignent le contraste qui existe à l'heure actuelle entre les écoles de pensée en matière d'aménagement des cours d'eau et de lutte aux inondations. L'une, plus interventionniste, converge typiquement vers des solutions qui visent à contrôler les propriétés de l'aléa inondation, en s'appuyant sur la perception que les systèmes fluviaux, leurs crues et leurs inondations sont « domptables »; qu'il est possible de les contraindre ou de les réduire par des aménagements modifiant le caractère naturel des systèmes. Le dragage d'un lit de rivière sur une distance conséquente, comme ce que propose la solution qui consiste à dynamiter des seuils naturels et surcreuser des lits de rivière pour les abaisser en deçà des niveaux d'ajustement naturels établis au fil des temps géologiques, témoigne bien de cette logique interventionniste. La solution d'immunisation par endiguement, quant à elle,

dénaturerait considérablement le paysage, n'est pas souhaitable sur le plan environnemental, mais surtout, risque de créer un faux sentiment d'immunisation au sein de la communauté. Tout événement dont l'intensité excédera la hauteur des structures d'immunisation risque d'avoir des conséquences catastrophiques sur les habitations et infrastructures qui se croyaient protégées. La solution à vocation environnementale est en opposition avec cette vision interventionniste. Elle propose plutôt la non-intervention, la délocalisation de manière à laisser libre cours aux processus naturels engendrant les inondations, lesquels doivent se dérouler sans entraves anthropiques. Le comité expert ne souhaite pas opposer la première vision à la seconde, mais souligne que le groupe de solutions d'ingénierie qui permettent de réduire significativement le risque d'inondation en eau libre ont un impact environnemental très sévère, ce qui se traduit par un classement moins élevé que la solution à vocation environnementale. De plus, cette dernière est bien alignée sur le plan de protection du territoire face aux inondations rendu public en avril 2020 par le Gouvernement du Québec. C'est donc cette solution que privilégie le comité expert.

Les solutions aux inondations par embâcle sont, dans l'ensemble, moins bien discriminées entre elles qu'elles ne le sont pour les inondations en eau libre. Ceci indique probablement que, non pas une seule solution, mais un ensemble de solutions doit être considéré pour s'attaquer au problème des embâcles de glace dans le secteur de Beauceville / Notre-Dame-des-Pins. Les solutions porteuses sont l'installation de l'Estacade Sud pour réduire la génération et les accumulations de frasil dans le secteur de Beauceville, l'affaiblissement du couvert de glace au printemps pour faciliter la débâcle dans le secteur de Beauceville avant l'arrivée du train de glace de l'amont, la rétention de glace dans les tributaires et sur la rivière Chaudière en amont de Notre-Dame-des-Pins avec des ouvrages légers et la délocalisation du centre-ville de Beauceville.

En plus de ces solutions, le comité expert recommande :

- D'entreprendre un programme de mesures détaillées et récurrentes de bathymétrie, idéalement avec la technologie de LiDAR bathymétrique pour obtenir une couverture spatiale complète. Ce programme devrait être initié sur la rivière Chaudière pour bien comprendre s'il y a une tendance généralisée à l'aggradation ou si la rivière demeure dans un état d'équilibre.
- De modéliser l'hydrologie en climat futur afin de déterminer si la tendance récente à l'augmentation des débits maximaux de la rivière Chaudière va se poursuivre dans le futur. La mise au point d'une solution doit être adaptée à des conditions hydrologiques qui doivent être le moins prévisibles sur un horizon déterminé.
- De réaliser un suivi serré des conditions de glace en fin d'hiver et au printemps pour caractériser la sévérité et le séquençage de la débâcle entre Saint-Georges et Saint-Joseph.
- D'amorcer des discussions avec le Ministère des Affaires Municipales au sujet du financement possible de la délocalisation de certaines résidences en lien avec le budget de 75 M\$ annoncé dans le récent plan de protection du territoire face aux inondations du gouvernement du Québec.

Table des matières

Résumé.....	iii
Table des matières	vi
Liste des figures.....	viii
Liste des tableaux.....	xi
1. Introduction.....	1
2 Mandat du comité expert	2
3 Principes directeurs guidant le travail du Comité expert.....	2
4 Méthodologie.....	2
5 Portrait du risque d'inondation sur le tronçon Sartigan-Scott.....	5
5.1 Résultats de la visite du 19 février 2020	5
5.2 Analyse détaillée de la dynamique d'inondation par embâcle	9
5.3 Analyse détaillée du processus d'inondation en eau libre.....	11
6 Analyse hydrologique	12
6.1 Sous-bassins versants analysés	12
6.2 Analyse des mesures de débits	12
6.3 Modélisation hydrologique	13
7 Analyse des hivers glaciologiques	18
7.1 Approche méthodologique	18
7.2 Données météorologiques	18
7.3 Normale climatique et caractéristiques des hivers glaciologiques	18
7.4 Caractéristiques des hivers glaciologiques des années avec inondations par embâcles.....	20
8 Analyse historique et hydrogéomorphologique	21
8.1 Analyse historique.....	21
8.2 Analyse hydrogéomorphologique	26
8.3 Analyse détaillée des zones d'excavation identifiées par les municipalités	27
8.4 Modélisation de scénarios de dragage.....	38
8.5 Espace de liberté	39
9 Examen des solutions possibles	45
10 Analyse multicritère du caractère porteur des solutions.....	55
10.1 Critères retenus par le comité.....	55

10.2	Pondération des critères	57
10.3	L'algorithme PROMETHEE d'analyse multicritère et d'aide à la décision	57
10.4	Intégration de l'incertitude	58
10.5	Solutions en eau libre (tronçon Scott / St-Joseph).....	58
10.6	Solutions par embâcle de glace (tronçon Beauceville / Notre-Dame-des-Pins)	63
11	Analyse du caractère porteur des solutions.....	68
11.1	Résultats de l'analyse multicritère PROMETHEE des solutions aux inondations en eau libre....	68
11.2	Résultats de l'analyse multicritère PROMETHEE des solutions aux inondations par embâcle de glace	72
12	Recommandations et conclusion	76
	Références.....	81
	Annexe A	84

Liste des figures

Figure 1 : Débits journaliers de la rivière Chaudière durant les inondations d’avril 2019.....	8
Figure 2 : Niveaux d’eau à Beauceville le 16 avril 2019	9
Figure 3 : Débits de débâcles en fonction des caractéristiques météorologiques (extrait de Morse et Turcotte (2018)).	10
Figure 4 : Ligne d’eau durant l’inondation du 21 avril 2019	11
Figure 5 : Séries des maxima annuels des différentes variables du bilan hydrique pour le sous-bassin aval (Saint-Lambert). Les traits pointillés et pleins indiquent respectivement les tendances non significatives et significatives entre 1950 et 1984 puis 1985 et 2019.	15
Figure 6 : Séries des maxima annuels des différentes variables du bilan hydrique pour le sous-bassin amont (Saint-Georges). Les traits pointillés et pleins indiquent respectivement les tendances non significatives et significatives entre 1950 et 1984 puis 1985 et 2019.....	16
Figure 7 : Normales climatiques à Beauceville et hiver glaciologique	19
Figure 8 : Rigueurs des 31 derniers hivers à Beauceville (bleu: hivers sans inondations, violet: inondation en cours d’hiver ; rouge: inondation printanière sévère, jaune: inondation printanière modérée). Les lignes pointillées représentent \pm un écart-type.	19
Figure 9: Embouchure de la rivière des Fermes à St-Joseph-de-Beauce en 1960 et 2019. Les anciens méandres de la rivière des Fermes sont visibles sur la photographie de 1960, de même que l’accumulation de sédiments qui ont été dragués en 1965. À noter que cette accumulation est aussi visible sur les photos de 1979 et est toujours présente.	21
Figure 10: Présence de batardeaux et de chemins d’accès dans la rivière Chaudière à l’aval de Beauceville en 1979 (les chiffres indiquent les points kilométriques (PK) à partir de St-Lambert, et correspondent aux valeurs utilisées dans le rapport de Tecslut (1994)).	23
Figure 11 : Plusieurs sources de sédiments se trouvent à proximité de l’embouchure des rivières Nadeau et Lessard, où une forte accumulation est notable.	24
Figure 12 : Interventions anthropiques autour du confluent des rivières Nadeau-Lessard, affectant l’apport de sédiments.	24
Figure 13 : Secteur à l’aval du confluent avec les rivières Nadeau-Lessard en 1960, 1979 et 2019	25
Figure 14 : Anciens bras de méandres de la rivière des Fermes à St-Joseph visibles en 1960, favorisant le transit sédimentaire vers l’embouchure (PK 45).	26
Figure 15 : A) Rivière Pouliot à St-Joseph-de-Beauce - photographie de l’été 2015 du document présenté par la municipalité (gauche) et même secteur en 2019 (photographie de Google Map) à un niveau d’eau plus élevé, ne montrant pas de banc d’accumulation au confluent (droite); B) Bras Victor (Beauceville) en 2015 (étiage) à gauche montrant des accumulations de sédiments qui n’apparaissent pas sur la photographie de 2019, où le tracé de 1935 est aussi superposé en bleu (droite); C) Rivière des Plantes et ruisseau Fraser (Beauceville) en 2015 (étiage) à gauche montrant des accumulations de sédiments qui n’apparaissent pas sur la photographie de 2019, où le tracé de 1935 est aussi superposé en bleu (droite)	28
Figure 16 : Points de dragage (points en jaune) suggérés par la municipalité de Sainte-Marie au Ruisseau Dupuis et Ruisseau Carter (gauche) et photographie aérienne de 1935 pour le même secteur montrant des accumulations de sédiments aux confluent (droite).	29

Figure 17 : Point de dragage (point en jaune) suggéré par la municipalité de Sainte-Marie au confluent de la rivière Du Bois (Savoie) (gauche) et photographie aérienne de 1935 pour le même secteur montrant des accumulations de sédiments au confluent (droite)29

Figure 18 : Accumulation de sédiments considérée problématique par la municipalité de Vallée-Jonction au ruisseau Lessard (haut)) et photographies aériennes de 1935 (centre) et de 1960 (bas) pour le même secteur montrant des accumulations de sédiments. À noter qu’il s’agit du secteur identifié à la Figure 12 comme ayant des sources de sédiments importantes à proximité.30

Figure 19 : Zone d’accumulation identifiée par la municipalité de Saint-Joseph-des-Érables à l’embouchure de la rivière Cliche (haut)) et photographies aériennes de 1935 (centre) et de 1960 (bas) pour le même secteur montrant des accumulations de sédiments.31

Figure 20 : Rivière Pouliot (aussi présentée à la Figure 15) en 1935 (haut) indiquant encore d’anciens méandres qui stockaient les sédiments; Photo de 1960 (centre) après linéarisation, avec plus d’accumulation de sédiments; Photo de 1979 (bas) avec de nouveaux travaux de linéarisation, et un banc d’accumulation plus important au confluent.32

Figure 21 : Zone d’accumulation identifiée par la municipalité de Saint-Joseph-de-Beauce à l’embouchure du ruisseau St-Jacques (haut)) et photographies aériennes de 1935 (centre), montrant ce qui semble être un chemin d’accès au banc d’accumulation, et de 1960 (bas) pour le même secteur montrant aussi des accumulations de sédiments. Les modifications majeures de l’ancien parcours du tributaire en méandres sont particulièrement évidentes dans la photo du centre droit. La photo de 1960 montre aussi bien les anciens méandres.33

Figure 22 : Accumulations de sédiments identifiées par la municipalité de Beauceville dans le Bras Victor (haut). Photo de 1935 (centre) et 1960 (bas) montrant un tracé divagant avec une forte charge sédimentaire (présence de nombreux bancs d’accumulation qui stockent les sédiments).34

Figure 23 : Modifications de tracé près de l’embouchure de la rivière des Plantes et du ruisseau Fraser (identifié à la Figure 15C par la municipalité de Beauceville comme étant problématique) en 1935 (haut), 1960 (centre) et 1979 (bas), avec le tracé de 1935 superposé en bleu sur celui de 1979.35

Figure 24 : Suivi historique du banc d’accumulation à l’embouchure de la rivière du Moulin à Beauceville montrant peu de changements majeurs depuis au moins 1935 dans ce secteur.36

Figure 25 : Secteur problématique identifié par la municipalité de Notre-Dame-des-Pins à l’Île aux Oies (gauche) avec le tracé de 1935 superposé en bleu à droite, illustrant des modifications majeures de tracé.36

Figure 26 : Île aux Oies (Notre-Dame-des-Pins) en 1935 (haut), 1960 (centre) et 1979 (bas) illustrant un tracé divagant caractérisé par des anabranes et une charge sédimentaire élevée.....37

Figure 27 : Accumulations de sédiments identifiées par la municipalité de Notre-Dame-des-Pins (points en jaune) à l’embouchure de la rivière Gilbert (en haut à gauche); Photo de 1935 (en haut à droite), 1960 (en bas à gauche) et de 1979 (en bas à droite). L’espace de liberté de l’embouchure de la rivière Gilbert est présenté dans la section 8.5.....38

Figure 28 : Modèle Numérique d’Élévation (MNE) LIDAR autour du confluent de la rivière Gilbert (gauche) montrant une large plaine alluviale autour de la rivière Gilbert. Le MNE est aussi superposé, en transparence partielle, à droite, à la photographie aérienne de 1935 afin de tracer les limites approximatives de l’espace de liberté de la rivière Gilbert.39

Figure 29 : A) MNE LiDAR en amont de Beauceville (aval des rapides du Diable) montrant l'espace que la rivière Chaudière occupait auparavant (zones de faible élévation en brun); B) Photo de 1935, où des modifications du chenal sont déjà visibles (on voit l'ancien bras de la rivière sur la berge gauche); C) LiDAR en partie transparent superposé à la photo de 1935 montrant la section qui était sans doute occupée auparavant par la rivière sur la berge gauche; D) zone inondée au printemps 2019 (ligne noire) selon les photos prises par hélicoptère (qui s'arrêtaient avant les rapides du Diable). La ligne rouge représente la limite approximative d'espace de liberté.40

Figure 30 : Limites approximatives d'espace de liberté (en rouge) pour le secteur de Beauceville. Les chiffres indiquent les points kilométriques du rapport de Tecsalt (1994).41

Figure 31 : Limites approximatives d'espace de liberté (en rouge) pour le secteur du Bras Victor. Les chiffres indiquent les points kilométriques du rapport de Tecsalt (1994).41

Figure 32 : Limites approximatives d'espace de liberté (en rouge) pour le secteur de St-Joseph. Les chiffres indiquent les points kilométriques du rapport de Tecsalt (1994).42

Figure 33 : Limites approximatives d'espace de liberté (en rouge) pour le secteur de Vallée-Jonction. Les chiffres indiquent les points kilométriques du rapport de Tecsalt (1994).42

Figure 34 : Limites approximatives d'espace de liberté (en rouge) pour le secteur entre Vallée-Jonction et Sainte-Marie. Les chiffres indiquent les points kilométriques du rapport de Tecsalt (1994).43

Figure 35 : Limites approximatives d'espace de liberté (en rouge) pour le secteur de Sainte-Marie. Les chiffres indiquent les points kilométriques du rapport de Tecsalt (1994).43

Figure 36 : Limites approximatives d'espace de liberté (en rouge) pour le secteur de Scott. Les chiffres indiquent les points kilométriques du rapport de Tecsalt (1994).44

Figure 37 : Histogrammes représentant les valeurs sur une échelle de 0 à 10 pour chacun des critères pour les inondations en eau libre. Les couleurs des barres représentent les groupes de solution : rouge = dragage, rose = dérivation, jaune = rétention d'eau, vert = restauration des tributaires, cyan= espace de liberté et bleu = immunisation.59

Figure 38 : Histogrammes représentant les valeurs sur une échelle de 0 à 10 pour chacun des critères pour les inondations par embâcle. Les couleurs correspondent aux groupes de solutions : rouge = estacades, rose = affaiblissement, jaune = augmentation des vitesses, vert = barrage réservoir, cyan = rétention des glaces, bleu= désobstruction, noir = délocalisation.63

Figure 39 : Diagramme en « boîtes à moustaches » montrant les résultats du score PROMETHEE II (Φ) pour les inondations en eau libre. Les solutions L1 à L7 sont décrites dans le Tableau 1. Les couleurs correspondent à des groupes de solutions : rouge = dragage, rose = dérivation, jaune = rétention d'eau, vert = restauration des tributaires, cyan= espace de liberté et bleu = immunisation.69

Figure 40 : Diagramme en « boîtes à moustaches » montrant les résultats du score PROMETHEE II (Φ) pour les inondations embâcle. Les solutions E1 à E14 sont décrites dans le Tableau 2. Rouge = estacades, rose = affaiblissement, jaune = augmentation des vitesses, vert = barrage réservoir, cyan = rétention des glaces, bleu= désobstruction, noir = délocalisation.73

Liste des tableaux

Tableau 1 : Solutions examinées par le CE pour les inondations en eau libre.....	45
Tableau 2 : Solutions examinées par le CE pour les inondations par embâcle.....	49

1. Introduction

Les problèmes d'inondation en eau libre et par embâcles de glace sur la rivière Chaudière sont notoires et documentés depuis le 19^{ème} siècle (COBARIC, 2014). Par exemple, le pont de Sainte-Marie, construit en 1885, a été emporté par la crue de 1896, qui a aussi emporté le pont à Scott, le pont ferroviaire à Vallée-Jonction et le pont à Beauceville (lui-même reconstruit après la crue de 1885). Les tributaires ont aussi un historique d'inondations, avec par exemple le pont à Saint-Côme-Linière sur la rivière du Loup construit en 1892 et détruit la même année par un orage violent. D'après le COBARIC (2014), « l'inondation du 30 et 31 juillet 1917 est considérée comme la plus importante survenue dans la région beauceronne. Cette dernière a causé pour plus d'un million de dollars en dégâts. L'eau est montée de 26,3 pieds [8,02 m] en raison d'une pluie diluvienne. Sur le cours de la rivière, 43 ponts se sont détachés et plusieurs bâtisses ont été emportées. En tout, 98 maisons furent détruites et 113 maisons et bâtiments ont été déplacés. » Le premier pont couvert à Notre-Dame-des-Pins, construit en 1927, s'est fait emporter par une débâcle en 1928. En plus de ces événements, des inondations majeures sont aussi survenues en 1957, 1991, 2002, 2006, 2011 (ouragan Irene) et 2019.

Le bassin de la rivière Chaudière couvre une superficie de drainage de 5650 km² avec un débit moyen (celui rencontré 50% du temps) de 60 m³/s. Il se compare en taille à celui de 5150 km² du bassin de la rivière Coulonge (affluent de la rivière des Outaouais dans le Pontiac), dont le débit moyen est de 40 m³/s. Toutefois, le débit de la crue centennale de ce bassin, estimé en 1994 dans le rapport de Tecsalt, était de 803 m³/s en comparaison avec 2140 m³/s pour la rivière Chaudière. Le bassin de la rivière Coulonge se différencie de celui de la rivière Chaudière par :

- la présence de plus d'une douzaine de lacs importants qui régularisent les débits pendant l'année;
- des pentes moins fortes et un sol moins imperméable;
- un territoire presque entièrement boisé (Tecsult, 1994).

La rivière Chaudière est donc un cas spécial caractérisé par des débits de crues très élevés par rapport à son débit moyen, ainsi qu'une très forte proportion (60%) du volume d'eau qui passe pendant la crue du printemps (cette proportion est de 40% sur la rivière Coulonge – Tecsalt, 1994).

Une autre particularité du tronçon sujet aux inondations entre Beauceville et Scott est sa pente, qui explique son appellation de « zone des eaux mortes ». Il existe donc un fort contraste entre la pente élevée des tributaires, capables de transporter une très forte charge sédimentaire, et celle du cours d'eau principal.

2 Mandat du comité expert

Le mandat du comité expert (CE) est le suivant :

Identifier, de manière consensuelle, des solutions porteuses à l'échelle du bassin versant de la rivière Chaudière, dans une vision intégrée, visant la réduction de la vulnérabilité des risques liés à l'inondation par embâcle de glace.

Le mandat initial, tel qu'inclus dans l'entente de partenariat, ne concernait que les inondations par embâcles de glace. Cependant les directives régionales du MELCC de même que les préoccupations soulevées par les autorités locales touchent également les inondations en eaux libres. Ainsi, le CE abordera l'aléa inondation dans son ensemble, et inclura à la fois les inondations en eaux libres et par embâcle.

3 Principes directeurs guidant le travail du Comité expert

Afin d'orienter l'examen de solutions porteuses pour la rivière Chaudière, le CE s'est doté de principes directeurs :

- a. Le CE examinera les solutions porteuses dans un cadre spatialement et temporellement intégré. Par conséquent, le CE tiendra compte des processus naturels et des changements / transformations historiques qui ont affecté le bassin versant, de même que l'incidence de ces processus et transformations sur les problèmes d'inondation actuels.
- b. Le CE prendra en considération les éléments de vulnérabilité du territoire, de même que les enjeux socio-territoriaux.
- c. Le CE considérera le savoir et l'expérience des autorités locales en matière de solutions et de gestion du risque d'inondation.
- d. Le CE ne considérera pas comme porteuse une solution efficace localement, mais qui a pour effet d'amplifier le problème pour les communautés situées plus en aval.
- e. Le CE prendra en compte les avis et les mesures formulés par les experts précédents, tentera d'en actualiser le contenu, et confirmera (ou non) la cohérence de ces mesures en lien avec les « bonnes pratiques » courantes.

4 Méthodologie

Dans sa recherche de solution porteuses, l'équipe d'experts a adopté une approche collaborative avec des personnes-ressources du milieu (notamment les autorités municipales) ayant acquis au fil des années une expérience terrain pointue et pertinente sur les différents enjeux liés aux inondations par embâcles

de glace et aux inondations en eau libre sur la rivière Chaudière. Le Comité expert a d'abord pris connaissance de la cartographie des zones de gravier de la rivière Chaudière, compilée par les autorités municipales locales et transmises par la suite au MAMH. Cette cartographie a été produite dans un contexte de demande d'intervention de dragage par les municipalités, supposément pour atténuer les risques d'inondations.

Le comité a procédé à la rencontre de différents experts ayant travaillé sur les risques d'inondation de la rivière Chaudière, dont l'équipe du Professeur Brian Morse réalisant actuellement des travaux concernant la prévention des sinistres, financés par le MSP et dans le cadre de la subvention du MAMH sur la cartographie des zones inondables et des risques associés aux inondations (aléa combinatoire eau-glace). Le professeur Brian Morse a échangé avec le comité, mais n'a pas discuté explicitement des solutions de mitigation d'embâcles sur lesquelles il travaille pour la municipalité de Beauceville, car il n'avait pas reçu au moment de l'entrevue l'autorisation écrite que le MELCC devait obtenir du MSP. Selon l'avis du professeur Brian Morse, d'un point de vue hydraulique le dragage peut réduire l'intensité des inondations entre Saint-Georges et Scott. Aussi, en appui au comité expert, M. Jean-Robert Ladouceur, de l'équipe de recherche du professeur Brian Morse, a accompagné lors d'une visite détaillée les experts du comité aux fins d'une meilleure compréhension des enjeux et problématiques des inondations de la rivière Chaudière. Les autres experts rencontrés sont M. Pierre-Richard Tremblay, l'ingénieur en charge du rapport Tecsub (1994) sur la modélisation du bassin versant de la rivière Chaudière, et M. Jacques Francoeur, qui a œuvré pendant 16 ans à titre de directeur général et coordonnateur des mesures d'urgence à Beauceville. Ces rencontres ont aidé le comité à comprendre en profondeur certains enjeux.

Une visite hivernale de la rivière Chaudière a eu lieu le 19 février 2020 pour constater, lorsque possible, les caractéristiques du régime des glaces et rencontrer les autorités municipales locales. La visite a permis de parcourir le tronçon intermédiaire de la rivière Chaudière incluant les municipalités de Saint-Georges, Notre-Dame-des-Pins, Beauceville, Saint-Joseph, Vallée-Jonction, Sainte-Marie et Scott où les intervenants des différentes municipalités ont relaté leurs expériences portant sur les épisodes d'inondation et leurs perceptions sur les solutions envisageables. Une réunion récapitulative a eu lieu en fin de journée aux bureaux de la direction régionale du MELCC à Sainte-Marie avec les représentants de la majorité de ces municipalités. La grande majorité des représentants municipaux semblent convaincus que la rivière subit un processus d'aggradation dont la cause est encore incertaine (drainage agricole, déboisement, déstabilisation de l'équilibre sédimentaire à cause d'un phénomène extrême comme l'ouragan Irene, arrêt des activités d'exploitation du gravier depuis les années 90) mais qui devrait être contré, selon eux, par des interventions de dragage pour atténuer l'intensité des épisodes d'inondations, aussi bien en eau libre qu'en présence de glace.

Le comité a également effectué une revue de littérature sur la problématique des inondations sur la rivière Chaudière. Un certain nombre de documents techniques produits dans le contexte des inondations de 1991, 1993 et 2019 ont été consultés et analysés par le comité. Le comité a porté une attention particulière au rapport Tecsub produit en 1994, qui inclut des rapports d'étape (mars 1993 : état de la situation; janvier 1994 : solutions aux inondations en eau libre; avril 1994 : solutions aux inondations avec glace). Il s'agit d'une étude (plus de 800 pages au total) qui présente une très bonne vue d'ensemble des

problématiques liées aux inondations en eau libre dans la rivière Chaudière. L'analyse des inondations par embâcle présente des éléments intéressants, mais se limite à des processus de glace simplifiés.

Une analyse statistique sommaire des caractéristiques des hivers glaciologiques et des précipitations a été également effectuée par le comité afin de mettre en contexte les régimes hydrologiques et glaciologiques de la rivière avec les conditions hydrauliques. Les données hydrométriques fournies par le COBARIC ont été également analysées pour mieux comprendre le régime hydrologique et hydraulique de la rivière durant les épisodes d'inondation d'avril 2019.

Pour ce qui est de la dynamique morphologique et sédimentaire de la rivière Chaudière, le comité ne disposait que des données bathymétriques aux 123 sections transversales recueillies par le CEHQ en 2001. De nouvelles mesures bathymétriques ont été prises par l'équipe de Brian Morse à l'hiver 2020, mais seules deux sections correspondaient approximativement à celles de 2001. Des photographies aériennes historiques de 1960 et 1979 ont aussi été obtenues de l'Université de Sherbrooke (pour le secteur de Scott à Saint-Georges), et des photographies aériennes de 1935 ont été achetées à la photothèque nationale de l'air (secteur de Sainte-Marie à Notre-Dame-des-Pins). Ces photographies ont été géoréférencées dans le logiciel ArcGIS® afin de comparer la situation passée aux conditions actuelles et examiner la question de l'équilibre sédimentaire de la rivière.

Le comité a procédé à l'inventaire (non exhaustif) des journaux locaux depuis 1917 (ex. Le Soleil, ou encore l'Éclaireur) pour y recenser toute information sur la localisation, l'intensité et la sévérité des inondations passées. Cette analyse permettra également, à terme, de retracer les solutions proposées par les autorités successives afin d'atténuer les problèmes d'inondation dans le secteur.

Une modélisation hydraulique avec le modèle 1D/2D LISFLOOD-FP, employé sur la rivière Chaudière pour des simulations à large échelle des zones inondables (projet Info-Crue, Choné et al. 2020), a été utilisée pour tester différents scénarios de dragage, soit 1) un prélèvement de 1 m de sédiments sur l'ensemble du tronçon entre les municipalités de Sainte-Marie et de Beauceville (sans éliminer les seuils); 2) une modification de la bathymétrie autour du cône alluvial à l'embouchure des rivières Nadeau-Lessard pour simuler un dragage local; 3) un dragage plus marqué (2 m) à Beauceville et à Sainte-Marie.

Enfin, le comité a effectué un inventaire de toutes les solutions de mitigation ayant été proposées dans le cadre de différents groupes de travail. Ces solutions ont été analysées par le comité et ont été évaluées à l'aide d'une analyse multicritère permettant de faire ressortir les solutions porteuses. Les solutions ont été adaptées à chacune des municipalités en fonction du type d'aléa que subit la municipalité. Des recommandations ont été également formulées par le comité afin de récolter des données pertinentes manquantes ou insuffisantes et pour effectuer des études subséquentes permettant de raffiner davantage les solutions porteuses.

5 Portrait du risque d'inondation sur le tronçon Sartigan-Scott

5.1 Résultats de la visite du 19 février 2020

La visite du 19 février a permis de comprendre le portrait du risque d'inondation en eau libre et en présence d'embâcles sur le tronçon Sartigan-Scott.

La municipalité de **Saint-Georges** a indiqué que le barrage Sartigan retenait les glaces provenant de l'amont à l'aide de grilles installées sur des passes d'évacuation en surface. Toutefois, le volume de glace retenu contient environ 5-6m d'épaisseur de frasil sous la glace morcelée. Depuis sa construction en 1967, les quelques habitations situées en amont du barrage subissent périodiquement des inondations à cause des rehaussements dus aux glaces mais pas les secteurs urbanisés situés en aval. La capacité d'évacuation des crues du barrage Sartigan a été augmentée entre 2010 et 2014 par l'ajout de pertuis supplémentaires en rive droite. Notons que, d'après les opérateurs, les glaces retenues par l'ouvrage demeurent en place en amont du barrage durant la pointe de crue et ne fondent que 3 à 5 jours après le passage de l'onde de crue. Plus en aval, des embâcles se forment au pont de la Route 271 (PK-78) ou plus en aval et remontent jusqu'au pont, mais ces petits embâcles ne causent que rarement des inondations, la dernière étant celle de 1986. La municipalité désire quand même draguer certains dépôts de gravier entre le barrage Sartigan et l'embouchure de la rivière Pozer par mesure préventive pour faciliter la débâcle des glaces au printemps. Des travaux d'affaiblissement du couvert de glace ont déjà été testés par le passé sans succès. Les inondations en eau libre préoccupent également la municipalité, particulièrement lorsque le barrage Sartigan doit évacuer des débits élevés pour des enjeux de sécurité de barrage, mais les dégâts enregistrés dans les dernières années sont relativement faibles.

La municipalité de **Notre-Dame-des-Pins** a rapporté une inondation en eau libre en novembre 2019 au centre communautaire et dans le quartier avoisinant à cause d'un amoncellement de gravier qui a bouché le lit d'un tributaire de la rivière Chaudière (rivière Gilbert) suite à un glissement de terrain en rive droite. Un autre banc de gravier se trouve également à l'embouchure de la rivière Gilbert dans la rivière Chaudière. À la débâcle, les trains de glace descendent la rivière Chaudière et peuvent former des embâcles au pont-route de la 30^{ième} rue (PK-69), à la passerelle couverte (immédiatement en aval du pont-route) ou aux îles situées en aval de la passerelle. Toutefois, depuis la construction du barrage Sartigan, les embâcles qui se forment à ces 3 sections sont mineurs et ne causent pas de dommages d'inondation, contrairement à la période avant 1967. La municipalité s'inquiète cependant de l'effet que pourraient avoir les bancs de gravier sur l'évacuation des glaces morcelées sur la rivière Chaudière à la débâcle.

La municipalité de **Beauceville** a seulement connu une inondation en eau libre en 1917. Les autres inondations que la municipalité a subies sont toutes des inondations par embâcle de glace et elles sont plus fréquentes dans les 5 dernières années, jusqu'à deux inondations par année. Des inondations par embâcle ont même eu lieu en décembre pour les deux derniers hivers et celles-ci inondent les terres agricoles, ce qui a pour effet de tuer les semences. Les représentants de la ville ont relaté les événements de l'inondation du 16 avril 2019 et ont confirmé que les événements étaient similaires à l'inondation de 1991 : le train de glace morcelée provenant de l'amont s'est logé au niveau du Parc Mathieu situé au PK-63, formant un embâcle allant jusqu'au pied des Rapides-du-Diable. L'embâcle a emmagasiné un volume

d'eau élevé et a fini par céder sous la pression de l'eau à 6h du matin. L'eau et la glace ont envahi la ville en une quinzaine de minutes. La majeure partie de la glace morcelée formant l'embâcle du PK-63 s'est déplacée jusqu'au cap rocheux situé en aval de la ville au PK-59. La ville s'est retrouvée alors en amont de l'embâcle du PK-59 où le niveau d'eau d'inondation est resté élevé à cause de l'obstruction par cet embâcle du chemin d'évacuation des eaux d'inondation. Celui-ci s'est ensuite déplacé au secteur du Rocher au PK-57. En 1991, le décrochement et le déplacement de l'embâcle vers l'aval a été plus rapide, ayant causé une chute du niveau d'eau presque aussi rapide que le rehaussement. Les sections de formation d'embâcles aux PK-63, PK-59 et PK-57 sont des sections où les embâcles peuvent s'appuyer contre un bord frontal solide et emmagasiner beaucoup d'eau car le couvert de glace y est épais, renforcé par des accumulations de frasil et avec présence de nombreux bancs de graviers. D'après la municipalité, le dragage des bancs de gravier serait la solution préconisée pour faciliter l'évacuation rapide des trains de glace à la débâcle. De plus, la réduction des volumes de frasil est présentement en essai avec l'installation des estacades en amont de Beauceville. Une solution de fragilisation du couvert de glace en sciant le couvert dans le secteur du Rocher a déjà été testée sans succès car les traits de scie avaient tendance à regeler rapidement. L'arrosage avec de l'eau réchauffée provenant des bornes fontaines a également été testé sans succès. Toutefois, la municipalité est ouverte à essayer d'autres méthodes de fragilisation à l'aide de la grenouille ou la pelle mécanique araignée.

Les deux municipalités de **Saint-Joseph** subissent des inondations en eau libre qui inondent quelques bâtiments en rive mais conduisent surtout à la fermeture fréquente de la Route 217. Malgré la démolition d'une trentaine de maisons, les représentants ont précisé que les dommages dans ce secteur sont nettement moindres que dans les autres municipalités. La cause des inondations semble être surtout les temps de réponse très courts du bassin versant après les pluies estivales et la fonte des neiges, puis l'évacuation lente des eaux de crue. Les trains de glaces à la débâcle ne causent pas d'inondations par embâcles car les glaces peuvent contourner le lit de la rivière par la plaine inondable qui est relativement large à Saint-Joseph. Les bancs de sables aux embouchures des tributaires semblent être un facteur aggravant pour l'évacuation des eaux car les personnes âgées rapportent que les problèmes d'inondation étaient autrefois moins sévères lorsque la rivière était régulièrement draguée. Toutefois, du dragage a déjà été effectué à l'embouchure de la rivière Calway, mais cette intervention n'a pas amélioré la capacité d'évacuation des eaux de crues.

La municipalité de **Vallée-Jonction** subit des inondations en eau libre avec un processus d'évacuation très lent après avoir atteint les niveaux d'inondation à cause de la présence d'un grand volume d'emmagasinage d'eau sur la plaine inondable. Le responsable de la sécurité civile effectue des suivis de l'épaisseur de glace et des conditions de glace en surface pour le compte du MSP et précise qu'ils n'ont pas de problématiques d'inondations par embâcles. Le pont ferroviaire n'initie pas des embâcles car les plaques de glace se brisent contre les piliers du pont puis contournent les piliers. Ce processus d'écrasement des plaques de glace exerce toutefois des charges élevées sur la structure du pont, nécessitant l'immobilisation de wagons de lestage pour consolider la structure. Notons également que des structures en bois étaient autrefois en place à proximité du pont pour briser les plaques de glace en flexion afin de faciliter le départ des glaces au printemps. Les accumulations de sédiments aux embouchures des tributaires semblent être une cause possible au blocage de l'évacuation des eaux en

période d'inondation. Notons également que la tempête accompagnant l'ouragan Irene semble avoir contribué à un apport sédimentaire anormalement élevé.

La municipalité de **Sainte-Marie** connaît des inondations en eau libre durant lesquelles le niveau d'eau monte rapidement, en 24 à 36 heures, puis baisse lentement en 2-3 jours. Le niveau d'eau baisse lentement à cause d'une faible pente entre Scott et Sainte-Marie, réduisant la capacité d'évacuation, et la présence de volumes d'emmagasinage d'eau élevés sur la plaine inondable comme le domaine Taschereau. Déjà, 212 maisons ont été démolies suite aux dommages d'inondation d'avril 2019, et 114 le seront bientôt. Des murs étanches ont également été construits autour des infrastructures critiques pour les protéger contre les inondations. La municipalité ne subit pas d'inondations par embâcles mais les glaçons morcelés s'introduisent dans le périmètre urbain en flottant sur les eaux d'inondation, et sont particulièrement entraînés par un courant de retour qui se forme sur la plaine inondable en rive est à la limite aval de la municipalité. La présence de fortes accumulations de sédiments aux embouchures des tributaires, en plus grande quantité qu'autrefois, a été encore mentionnée, mais les représentants de la municipalité sont conscients que les niveaux d'eau en période d'inondation sont 5m plus hauts que les crêtes de ces accumulations. Ils pensent toutefois que les bancs de sédiments retardent le départ des glaces alors que le niveau d'eau à la pointe de crue pourrait être 2' plus bas si la crue en eau libre arrivait après un départ complet des glaces. La question du déséquilibre sédimentaire suite à la tempête accompagnant l'ouragan Irene a été également suggérée.

La municipalité de **Scott** subit des inondations en eau libre qui ont dévasté la communauté en 2019. De 30 à 40 % des résidences ont été inondées en avril 2019 et seront démolies puis relocalisées. Durant ces événements, les niveaux d'eau étaient plus hauts dans l'extrados de la courbe de la rivière en rive est, et un courant à vitesse élevée a même court-circuité la rive ouest. La concentration de l'écoulement de la rivière Chaudière dans l'extrados de la courbe cause également des problématiques d'érosion de berge ayant conduit à la construction d'un mur en béton pour protéger la rive. Des petits embâcles de glace se forment occasionnellement dans la rivière mais décrochent rapidement sans causer d'inondation. Les représentants ont également mentionné qu'il y avait des accumulations de sédiments fins dans la rivière, principalement à cause du drainage agricole utilisant des conduites en plastique perforées. Cette méthode est pratiquée depuis une vingtaine d'année et celle-ci injecte une quantité élevée de matériaux fins dans la rivière après les averses de pluie intense.

En somme, les témoignages recueillis des 7 municipalités et les faits saillants qui ressortent de la réunion de clôture permettent d'en tirer les tendances suivantes :

1. Les problématiques d'inondation par embâcles semblent être limitées à la partie amont du tronçon à l'étude, soit de Saint-Georges à Saint-Joseph. Depuis la construction du barrage Sartigan en 1967, Saint-Georges, Notre-Dame-des-Pins et même Beauceville ont noté une amélioration des problématiques d'embâcles grâce à la rétention des glaces provenant du tronçon en amont de Saint-Georges. Toutefois, Beauceville subit encore des dommages d'inondation par embâcles élevés et fréquents. Saint-Joseph reçoit les ondes de crue causées par les décrochements d'embâcles dans le secteur de Beauceville, amorçant ainsi les épisodes d'inondation en eau libre.

2. Les municipalités de Vallée-Jonction, Sainte-Marie et Scott, et dans une moindre mesure Saint-Joseph, souffrent de problématiques d’inondations en eau libre. Les niveaux d’eau semblent monter rapidement mais baissent ensuite très lentement. La Figure 1 illustre ces propos pour les inondations d’avril 2019, où le débit a pratiquement doublé sur l’ensemble du tronçon Sartigan-Scott en 24-48h du 20 au 21 avril, mais a baissé lentement en 5 jours par la suite. La fonte de neige et les averses de pluie intenses semblent donc se drainer très rapidement du bassin versant dans la rivière, mais l’évacuation des eaux se fait très lentement à cause d’un problème d’évacuation réduite des eaux à la sortie du tronçon et d’un emmagasinage élevé des eaux de crue dans la plaine inondable.

3. La perception générale est qu’il y a un problème d’aggradation de la rivière dont la cause est incertaine. On mentionne le drainage agricole, le déboisement, l’arrêt de l’exploitation du gravier, l’entretien des chemins et des routes et la possibilité d’un déséquilibre sédimentaire suite à un événement extrême comme la tempête ayant accompagné l’ouragan Irene en 2011. L’identification de la source du problème est une préoccupation des municipalités mais, en attendant, le dragage est préconisé pour soulager des problématiques secondaires comme la rétention des trains de glace et l’occupation de volumes d’eau par des volumes de sédiments. Les municipalités sont conscientes que le dragage des accumulations de sédiments ne réglera pas les problématiques d’inondation en eau libre, mais c’est une intervention qui peut être réalisée rapidement même si le gain est mineur. D’après eux, tout gain est souhaitable même s’il est mineur. De plus, le coût des interventions ne semble pas être un facteur décisif car les exploitants des carrières à gravier prendraient en charge ces interventions gratuitement ou à moindre coût.

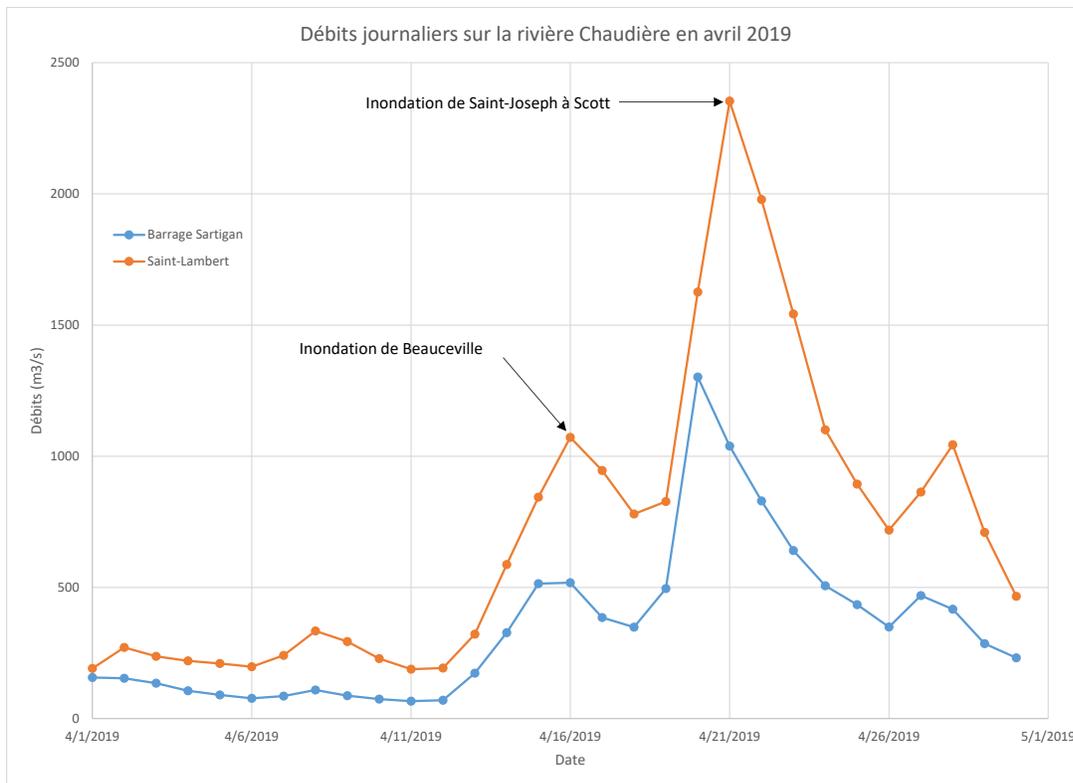


Figure 1 : Débits journaliers de la rivière Chaudière durant les inondations d’avril 2019.

5.2 Analyse détaillée de la dynamique d'inondation par embâcle

La Figure 2 présente le niveau d'eau durant l'inondation du 16 avril 2019 à Beauceville. Celle-ci met en évidence une onde de décrochement d'embâcle (connu sous le nom de "JAM-WAVE" ou "JAVE"). Le niveau d'eau a augmenté de 2m en 1h alors que le débit a baissé à la sortie du barrage Sartigan. Cette augmentation rapide est due à un relâchement local d'un volume d'eau emmagasiné en amont de l'embâcle qui s'était formé juste en amont de Beauceville au PK-63, et que les stations de mesure de débit lointaines ne peuvent pas enregistrer. C'est une inondation similaire à celle causée par un bris de barrage en amont de Beauceville (où le barrage est l'embâcle). L'inondation d'avril 2019 n'est donc pas une inondation suite à la formation graduelle d'un embâcle en aval de Beauceville dans le secteur du Rocher. D'après les articles dans les médias, l'embâcle s'est effectivement déplacé en aval de Beauceville dans des secteurs problématiques comme le Rocher et l'embouchure de la rivière Bras-Victor, mais les niveaux d'eau sont restés sous le niveau d'inondation à partir de 17 avril en matinée. Nous ne pouvons pas complètement écarter que les embâcles qui se forment en aval de Beauceville peuvent également causer des inondations, mais les épisodes les plus sévères comme ceux de 1991 et 2019 semblent être des épisodes dynamiques de décrochement d'un embâcle qui s'est préalablement formé en amont de Beauceville. Toutefois, la formation de l'embâcle en aval de Beauceville suite à une inondation par décrochement d'embâcle en amont de Beauceville retarde l'évacuation des eaux d'inondations, ce qui prolonge la durée d'inondation.

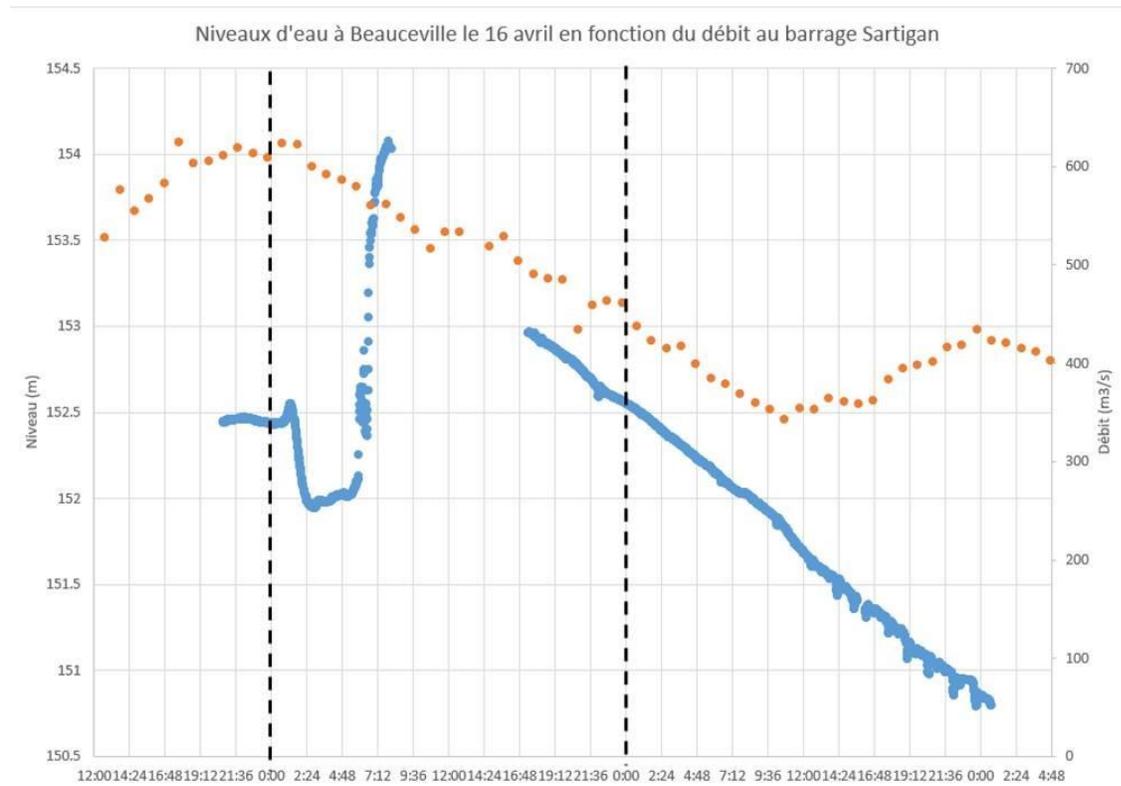


Figure 2 : Niveaux d'eau à Beauceville le 16 avril 2019

En suivant la logique de ce processus dynamique de décrochement soudain d'embâcles, on peut conclure qu'il n'y a pas une seule valeur de débit de débâcle qu'on peut surveiller à une station lointaine, à cause de ces coups d'eau qui peuvent générer localement des débits élevés sans moyen de surveillance facile et qui mettent rapidement en mouvement des trains de glace. Ces trains de glace incluent le volume de l'embâcle ayant décroché et la glace qui se morcèle en aval du point de décrochement à cause du passage de l'onde de crue qui passe dans un couvert de glace fixe. La débâcle se fait donc par une succession d'épisodes dynamiques où les volumes de glace de Saint-Georges à Beauceville augmentent d'un décrochement à l'autre en avançant de l'amont vers l'aval. La Figure 3, extraite du rapport de Morse et Turcotte (2018), illustre la relation entre les débits mesurés aux stations et les événements de débâcles historiques enregistrés sur la rivière Chaudière. S'il y avait un processus de débâcle en régime quasi-permanent, on verrait dans le graphique de droite une tendance de débit de débâcle qui baisse en fonction des degrés-jours de dégel (qui représente la dégradation thermique du couvert de glace au printemps). Le graphique de gauche montre une tendance à la hausse pour les débâcles en début d'hiver car plus on cumule des degrés-jours de gel, plus la glace est épaisse et résistante, ce qui nécessite un débit de plus en plus élevé pour la morceler et la mettre en mouvement. Contrairement au début d'hiver, cette corrélation entre les débits mesurés aux stations et le paramètre météorologique associé à la rigidité de la glace n'est pas clairement établie au printemps car les débits enregistrés aux stations ne reflètent pas les débits ressentis par le couvert de glace.

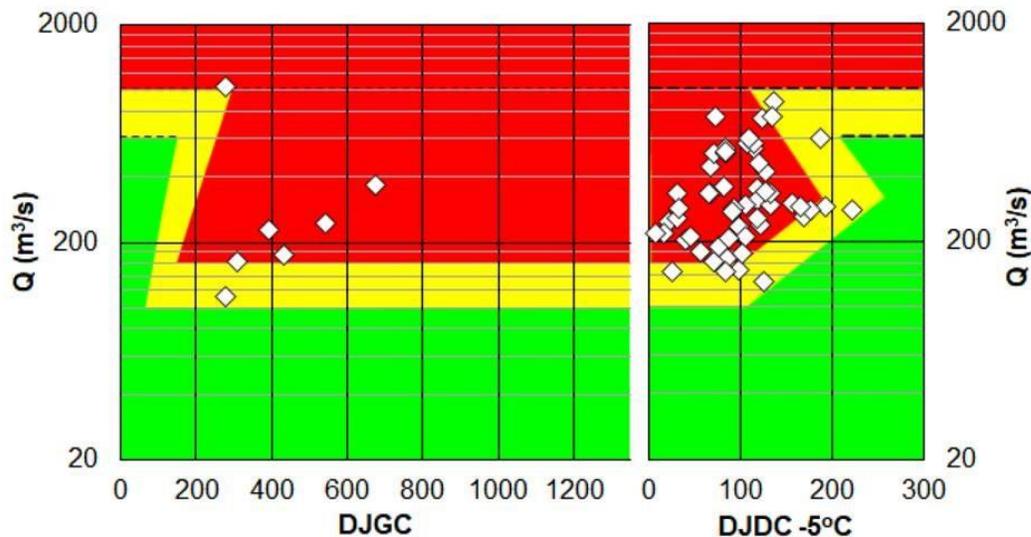


Figure 23. Modèle de débâcle dynamique de la rivière Chaudière (partie hivernale à gauche, partie printanière à droite), incluant les embâcles rapportés (losanges blancs) ayant servi à des fins de calibration des différents seuils (en plus des connaissances de l'Université Laval sur cette rivière depuis quelques années).

Figure 3 : Débits de débâcles en fonction des caractéristiques météorologiques (extrait de Morse et Turcotte (2018)).

En plus de la complexité des processus dynamiques en jeu, il faut tenir compte de la formation de frasil sur ce tronçon. C'est la présence de frasil accumulé sous le couvert de glace en aval des Rapides-du-Diable qui solidifie le bord frontal sur lequel l'embâcle s'appuie et permet ainsi d'emmagasiner des volumes d'eau élevés avant de décrocher sous la poussée de la charge en amont de l'embâcle.

Les volumes de glace morcelée provenant des tributaires et injectés dans la rivière Chaudière sont également un facteur aggravant. Ceux de la rivière Famine ont été calculés par l'équipe de Brian Morse et s'élèvent à environ 110 000 m³ de glace en avril 2019, soit estimés à environ 10% du volume de glace total

arrivant à Beauceville. Le volume de glace provenant d'autres tributaires comme la rivière Pozer est inconnu. Ceux de la rivière Bras-Victor ne contribuent pas au volume du train de glace arrivant à Beauceville mais empêchent l'embâcle qui se forme dans le secteur du Rocher de se déplacer vers l'aval, prolongeant ainsi la période de rehaussement des niveaux d'eau en amont de l'embâcle du PK-57 avant le décrochement.

En somme, l'aléa consiste en un décrochement d'embâcle similairement à un bris de barrage puis la rétention des eaux d'inondation par l'embâcle qui se reforme en aval de la ville, bouchant ainsi le passage d'évacuation. On peut donc en conclure que le risque d'inondation à Beauceville est élevé à cause d'un aléa très sévère.

5.3 Analyse détaillée du processus d'inondation en eau libre

Les niveaux d'eau mesurés entre le 20 avril 22h et le 21 avril 2019 à 14h sur l'ensemble du tronçon Sartigan-Scott ont été extraits des données archivées par le COABRIC. Cette période de 16h ne reflète pas nécessairement une ligne d'eau parfaitement stable à un moment donné, mais c'est la période durant laquelle un nombre maximum de sondes a enregistré des données de niveaux d'eau autour de la pointe de crue. Les valeurs illustrées sur la Figure 4 représentent approximativement la ligne d'eau entre la sortie du barrage Sartigan et Saint-Lambert.

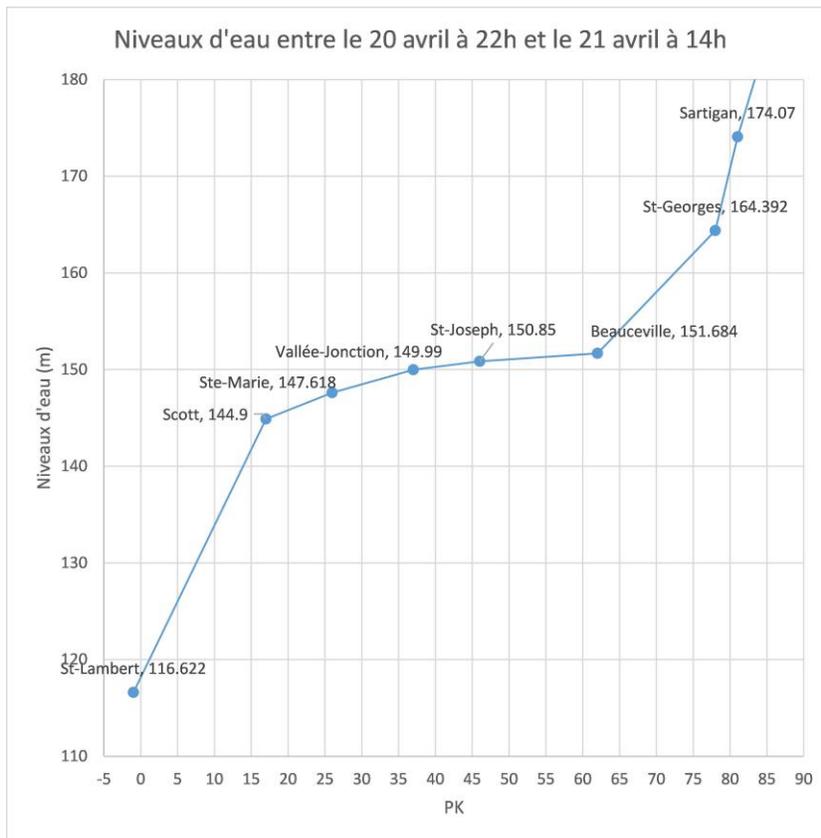


Figure 4 : Ligne d'eau durant l'inondation du 21 avril 2019

Notons qu'il y a un bris de pente entre Scott au PK-17 et St-Lambert au PK-1, ainsi qu'un autre bris de pente entre Saint-Georges au PK-78 et Beauceville au PK-62. Le tronçon entre Beauceville et Scott est donc un tronçon avec une faible pente hydraulique par rapport au reste du bassin versant de la rivière Chaudière qui, d'après le professeur Brian Morse, nécessiterait l'utilisation de la plaine inondable pour évacuer les crues élevées.

Notons également que le tronçon entre Scott et Vallée-Jonction, qui est le tronçon le plus touché par les inondations en eau libre, a quand même une pente hydraulique de 5 m sur 20 km. Donc la rivière évacue tout de même le débit de crue avec une pente hydraulique non-négligeable, malgré une capacité d'évacuation réduite. Toutefois, la pente hydraulique entre Vallée-Jonction et Beauceville est plus faible que la pente plus en aval, soit 1,7 m sur 25 km. La capacité d'évacuation est donc la plus faible à Saint-Joseph où la pente hydraulique est presque plate, mais les dommages y sont moins élevés qu'à Sainte-Marie et Scott. Donc l'aléa est le plus sévère à Saint-Joseph mais le risque, représenté par l'ampleur des dommages, est le plus élevé à Scott et Sainte-Marie. Si l'on considère que le risque est la combinaison de la sévérité de l'aléa et de la vulnérabilité, on pourrait alors en conclure que les municipalités de Scott et Sainte-Marie sont les plus vulnérables, probablement à cause de l'occupation de la plaine inondable.

6 Analyse hydrologique

6.1 Sous-bassins versants analysés

Deux sous-bassins versants de la rivière Chaudière ont été ciblés pour des analyses hydrologiques. L'objectif de ces analyses est de déterminer si des tendances significatives ont été observées durant les dernières décennies sur les débits et précipitations extrêmes, de même que sur l'ensemble du bilan hydrique.

Les deux sous-bassins étudiés sont tributaires des stations hydrométriques de Saint-Lambert (023429; 5082 km²) et en aval du barrage Sartigan (023429; 3085 km²), soit les stations localisées à l'entrée et à la sortie du tronçon à l'étude. Le bassin versant présente un relief abrupt en amont du barrage Sartigan suivi d'un relief beaucoup plus plat en aval. Bien qu'il s'agisse d'un bassin versant d'une taille assez importante, ce dernier réagit rapidement à des événements de précipitations importants tel que l'ouragan Irene et la crue de l'Halloween 2019.

6.2 Analyse des mesures de débits

Le test statistique non paramétrique¹ de Mann-Kendall permet d'établir de manière objective si l'hypothèse de stationnarité d'une série de données est rejetée ou non. Ce test permet d'évaluer si la valeur d'une variable a tendance à augmenter ou diminuer dans le temps (changement monotone). L'estimateur non paramétrique de Theil-Sen, quant à lui, correspond à la médiane des pentes sur toutes

¹ Un test statistique non paramétrique ne repose pas sur une loi de probabilité paramétrique telle que la loi normale. Ainsi, un test non paramétrique peut être employé sur un échantillon de données, et ce peu importe la distribution statistique à laquelle il appartient.

les paires de points. La pente médiane a été utilisée afin de déterminer l'amplitude et la direction de la pente (à la hausse ou à la baisse) sur les différentes séries temporelles. Cet estimateur a été utilisé conjointement avec le test de Mann-Kendall afin de déterminer si les tendances observées étaient statistiquement significatives ou non ($\alpha > 0,05$).

L'analyse de stationnarité sur les stations hydrométriques permet d'évaluer si des tendances significatives peuvent être observées sur les séries des maximums annuels de débit journaliers et des cumuls de volumes annuels. Les analyses de tendances ont été divisées en deux périodes égales : 1950 à 1984 et 1985 à 2019. Ce choix méthodologique a été fait avec l'objectif de comparer le comportement des tendances passées et récentes. Les résultats complets sont présentés à l'annexe A.

Les tendances observées des débits maximums annuels sont à la hausse pour les deux stations hydrométriques, mais non significatives ($\alpha > 0,05$). Cependant, des tendances significativement à la hausse sont observées pour le cumul des volumes annuels pour les deux stations pour la période de 1985 à 2019. Une tendance à la hausse est aussi observée pour la période de 1950 à 1984 pour la station de Saint-Lambert, mais elle est non-significative.

6.3 Modélisation hydrologique

Afin de mieux comprendre les processus hydrologiques engendrant la non-stationnarité observée dans les séries de débits maximums et de cumul des volumes, une analyse des bilans hydriques est nécessaire. La modélisation hydrologique permet notamment d'avoir accès à d'autres variables du bilan hydrique qui ne sont pas typiquement mesurées à l'échelle du bassin versant, soit l'évapotranspiration et l'équivalent en eau du couvert de neige, mais jouant un rôle fondamental sur les débits des bassins versants du Québec méridional.

Le modèle hydrologique GR4J (modèle du Génie rural à 4 paramètres journaliers) (Perrin et al, 2003) couplé avec le modèle de neige CemaNeige (Valery, 2010) et la formule d'évapotranspiration d'Oudin et al (2005) a été choisi pour réaliser la modélisation hydrologique. Le choix de cette structure pour la modélisation hydrologique est fondé sur de nombreuses études ayant obtenu des résultats satisfaisants, notamment pour des bassins versants au Québec. L'étalonnage du modèle hydrologique a été réalisé avec la fonction objectif du Nash-Sutcliffe (Nash et Sutcliffe, 2010). Les données de la période de 1950 à 2019 ont permis d'obtenir une couverture temporelle complète. Les données de précipitations et températures de l'air provenant de quatre stations météorologiques à Scott, Vallée-Jonction, Saint-Éphrem et Lac Mégantic ont été moyennées à l'aide de la méthode des polygones de Thiessen pour fournir une série unique de précipitation et de température moyenne journalière requise comme intrant dans le modèle hydrologique.

Les coefficients de Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) de 0,77 et 0,79 obtenus respectivement avec les données observées des stations 023420 et 023429 et une comparaison des hydrogrammes simulés et observés témoignent d'une bonne correspondance entre les données du modèle hydrologique et les mesures. Les données de débits de la station 023429 ne couvrant que la période de 1980 à 2019 ont pu être allongées pour la période de 1950 à 1979 à l'aide de la modélisation hydrologique. Les principaux résultats pour le bassin aval (St-Lambert) et amont (Sartigan) sont présentés à la Figure 5 et à la Figure 6,

respectivement. Selon Moriasi et al (2007), un étalonnage satisfaisant² du modèle hydrologique engendre un niveau de confiance élevé envers ces variables simulées. De façon générale, les résultats des analyses de stationnarité avec le test de Mann-Kendall et l'estimateur de Theil-Sen (présentés à l'annexe A) révèlent plusieurs tendances pour les deux sous-bassins, soit :

- Moyennes de températures minimales et maximales observées: Les moyennes de températures minimales et maximales annuelles sont à la hausse de façon significative pour la période de 1985 à 2019. Des tendances non significatives sont observées pour la période de 1950 à 1984.
- Cumuls annuels des précipitations observées : Des tendances à la hausse pour les deux périodes et les deux sous-bassins, mais significatives seulement pour la période de 1985 à 2019 pour le sous-bassin du barrage Sartigan. Il peut être constaté que les tendances récentes à la hausse sont aussi plus fortes que les tendances passées.
- Cumuls annuels d'évapotranspiration simulés : Des tendances à la baisse entre 1950 et 1984, mais significativement à la hausse pour les deux sous-bassins entre 1985 et 2019. Les augmentations récentes sont cohérentes avec les augmentations de précipitations et températures.
- Maxima annuels d'équivalent en eau du couvert de neige simulé : Des tendances non-significatives indiquant des diminutions de l'épaisseur du couvert de neige entre 1950 et 1984 et de très faibles augmentations entre 1985 et 2019. L'augmentation de température des dernières décennies semble être contrebalancée par l'augmentation de précipitation hivernale sous forme solide.
- Maxima annuels de débits journaliers observés et simulés : Pour la période de 1950 à 1984, il y a une contradiction entre les tendances observées (à la hausse) et simulées (à la baisse) pour le sous-bassin de Saint-Lambert, rendant difficile l'interprétation de la tendance à la baisse pour le sous-bassin du barrage Sartigan. Toutefois, les tendances récentes simulées sont relativement similaires aux tendances observées, qui sont toutes les deux non-significatives, mais à la hausse pour cette période.
- Cumul des volumes annuels observés et simulés : Les volumes simulés indiquent des tendances non-significatives à la hausse pour la période de 1950 à 1984 suivies de tendances à la hausse pour la période de 1985 à 2019. Les tendances récentes sont similaires aux tendances observées, qui sont toutes les deux à la hausse et significatives (à l'exception des volumes simulés pour le sous-bassin de Saint-Lambert). Ces tendances semblent concorder avec les variations dans les cumuls de précipitations et d'évapotranspiration sur les deux périodes.

² Une valeur pour le coefficient de Nash-Sutcliffe de 0,50 est considérée comme étant une bonne performance. Moriasi, D. N. et al. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. Transactions of the ASABE, 50(3), 885-900. doi:10.13031/2013.23153.

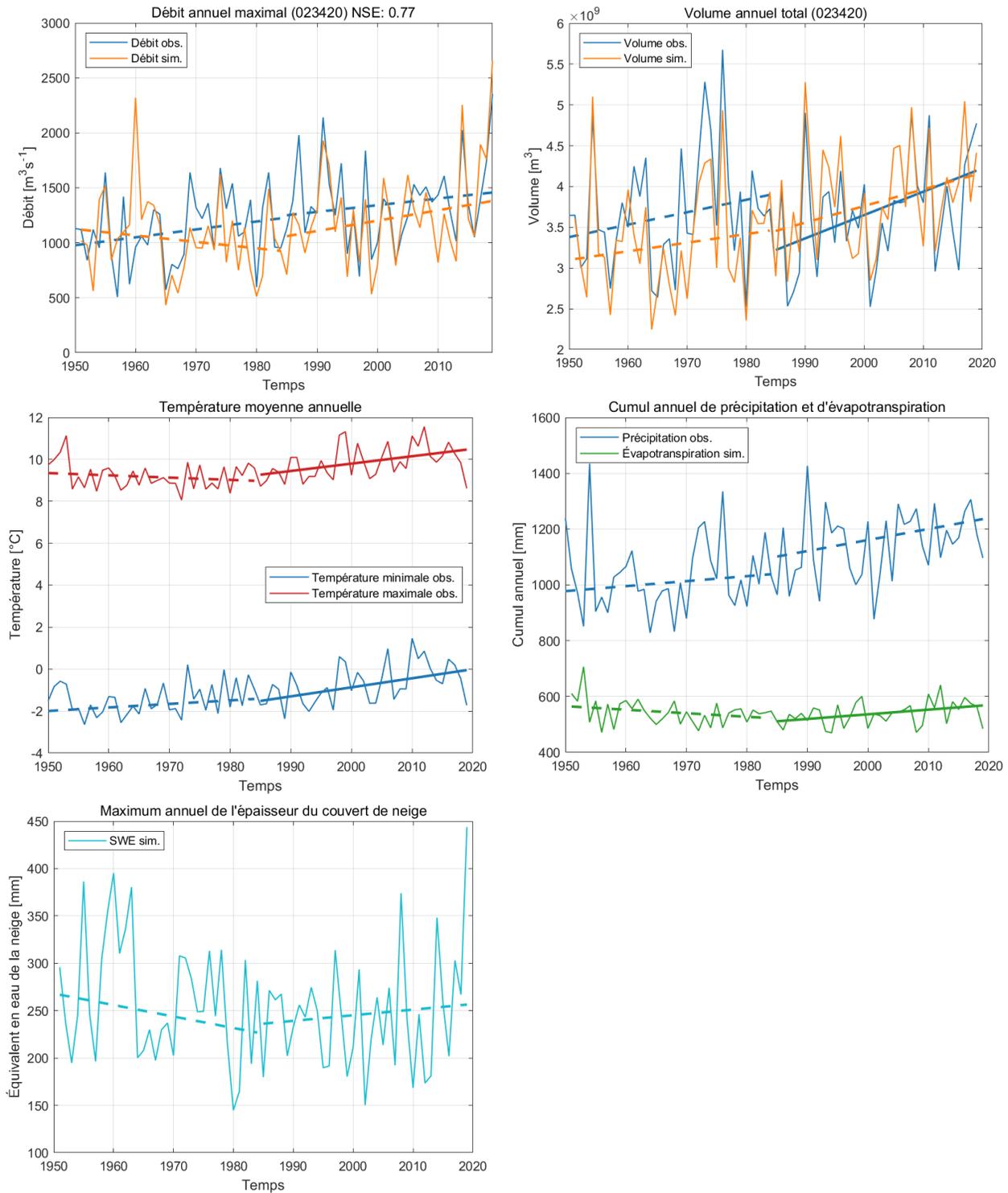


Figure 5 : Séries des maxima annuels des différentes variables du bilan hydrique pour le sous-bassin aval (Saint-Lambert). Les traits pointillés et pleins indiquent respectivement les tendances non significatives et significatives entre 1950 et 1984 puis 1985 et 2019.

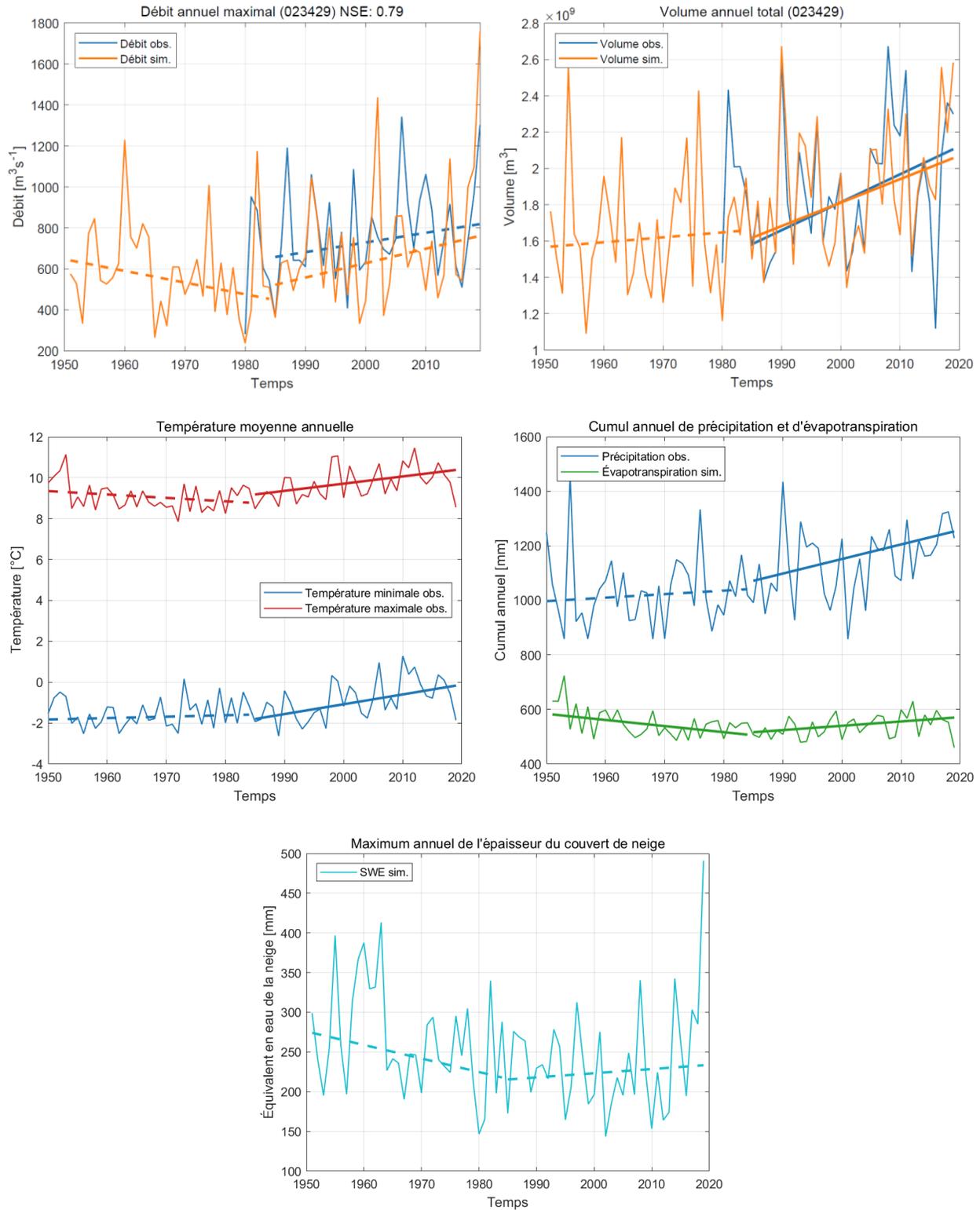


Figure 6 : Séries des maxima annuels des différentes variables du bilan hydrique pour le sous-bassin amont (Saint-Georges). Les traits pointillés et pleins indiquent respectivement les tendances non significatives et significatives entre 1950 et 1984 puis 1985 et 2019.

En résumé, on note l'action combinée d'une augmentation de précipitation et de température qui se traduit par une augmentation de l'évapotranspiration et du couvert de neige (résultant d'un effet combiné de l'augmentation de précipitation hivernale et de la température favorisant la fonte). Il est probable qu'à long terme, le couvert de neige diminue de façon significative à cause des changements climatiques, ce qui pourrait avoir une influence sur les débits maximaux de la crue printanière.

En général, les tendances observées sur les 35 dernières années sont à la hausse pour les débits maximaux et le cumul des volumes dans la rivière Chaudière. Ainsi, il est probable de voir une augmentation de la probabilité des événements hydrologiques extrêmes sur la rivière Chaudière au cours des prochaines années. Plusieurs facteurs peuvent isolément ou conjointement expliquer ces tendances, notamment un changement dans l'utilisation des terres, l'augmentation de l'urbanisation, les différents cycles de variabilité naturelle (p. ex. l'oscillation nord-atlantique; ONA) ou encore les changements climatiques, etc.

Il est à noter que malgré les tendances non-significatives observées pour les séries de précipitations journalières maximales, des études ont démontré que les précipitations extrêmes journalières et sous-journalières devraient augmenter de façon importante en réponse aux impacts des changements climatiques (Martel et al., 2019). Ces augmentations projetées seraient directement en lien avec l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre permettant d'emmagasiner une plus grande quantité d'énergie dans l'atmosphère. La relation de Clausius-Clapeyron suggère que pour chaque °C d'augmentation, il y a une augmentation de 7 % d'humidité dans l'atmosphère (Hartmann et al, 2013).

De plus, d'autres études ont démontré qu'il est probable que la détection d'un signal de changement climatique à l'échelle locale pour les précipitations extrêmes pourrait être retardée jusqu'au milieu du 21^e siècle en raison de l'importante influence de la variabilité naturelle à l'échelle interannuelle. Par conséquent, une absence de tendance significative pour les séries de précipitations extrêmes ne devrait pas être attribuée à une absence de l'impact des changements climatiques (Martel et al., 2018).

En ce qui concerne les débits en rivières et le cumul des volumes d'eau, la réponse aux changements climatiques n'est pas aussi évidente que pour les précipitations. En effet, le débit est une variable intégratrice de l'ensemble des variables hydrologiques qui, elles, sont affectées par les changements climatiques de façon très différente. Par exemple, il pourrait y avoir une augmentation des précipitations et températures hivernales qui ensemble engendreraient une augmentation du volume, mais potentiellement une diminution des débits de pointes en lien avec un couvert de neige moins épais. D'un autre côté, les débits extrêmes locaux sur un affluent du bassin versant pourraient augmenter de façon proportionnelle avec l'augmentation des pluies extrêmes. Par conséquent, afin de pouvoir tirer des conclusions sur les tendances futures (p. ex. horizon 2040-2060 et 2080-2100), des analyses hydrologiques utilisant des projections climatiques seraient nécessaires.

7 Analyse des hivers glaciologiques

7.1 Approche méthodologique

L'hiver glaciologique correspond à la période de l'année pendant laquelle la glace est présente sur les lacs et les cours d'eau. C'est l'intensité et la durée des périodes pendant lesquelles la température de l'air est en dessous du point de congélation (0°C) qui contrôlent la formation, l'épaississement puis la disparition de la glace sur les plans d'eau. L'hiver glaciologique est donc le moteur de la génération de glace. D'un point de vue analytique, il s'agit de calculer le nombre de degrés-jours de gel cumulés depuis le début de l'hiver. Ainsi, par exemple, une journée pendant laquelle la température moyenne de l'air est de -10°C, ou encore deux jours pendant lesquels la température moyenne est de -5°C, correspond à 10 degrés-jours de gel. La valeur maximale cumulée sur l'ensemble d'un hiver correspond à la rigueur de l'hiver, aussi connu sous le nom d'indice de gel. À l'aide de ce calcul, on est en mesure de déterminer sans ambiguïté les dates de début et de fin de l'hiver glaciologique, et donc sa durée.

7.2 Données météorologiques

Les températures de l'air journalières enregistrées à Beauceville sont disponibles sur le site internet d'Environnement Canada et sont représentatives des températures de l'air sur le tronçon subissant des inondations par embâcles. Les températures hivernales de l'air d'octobre à mai pour une trentaine d'années couvrant les hivers de 1988-1989 à 2018-2019 ont été extraites et analysées.

7.3 Normale climatique et caractéristiques des hivers glaciologiques

Les données de températures de l'air à Beauceville ont été utilisées pour établir les normales climatiques afin d'évaluer les caractéristiques de l'hiver glaciologique moyen dans ce secteur.

La Figure 7 présente les normales climatiques obtenues en calculant la moyenne des températures journalières de l'air pour les hivers de 1988-1989 à 2018-2019. Cette moyenne présente des températures de l'air en dessous du point de congélation de la mi-novembre à fin mars. Les caractéristiques de l'hiver moyen basés sur les 31 dernières années peuvent être comparées à l'hiver le plus doux et le plus rigoureux.

Les rigueurs des hivers de 1988-1989 à 2018-2019 ont également été calculées, et sont présentées sous forme graphique à la Figure 8. La moyenne des rigueurs obtenues pour chaque hiver est de 1066 degrés-jours de gel. L'hiver le plus rigoureux était en 1993-1994 avec 1400 degrés-jours de gel. L'hiver le plus doux était quant à lui en 2001-2002 avec 653 degrés-jour de gel. L'hiver moyen à Beauceville s'étend typiquement du 16 novembre au 28 mars, soit une durée de 133 jours. La Figure 8 présente également en pointillée la gamme de la moyenne \pm un écart-type. On peut considérer que les hivers rigoureux ou cléments sont les hivers ayant une rigueur à l'extérieur de cette gamme.

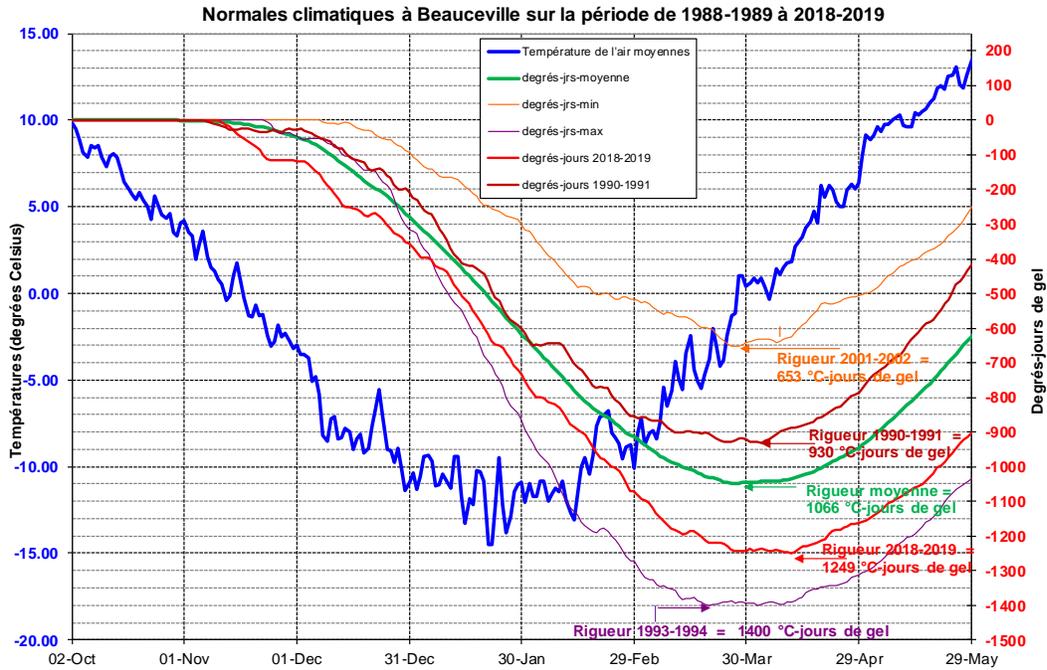


Figure 7 : Normales climatiques à Beauceville et hiver glaciologique

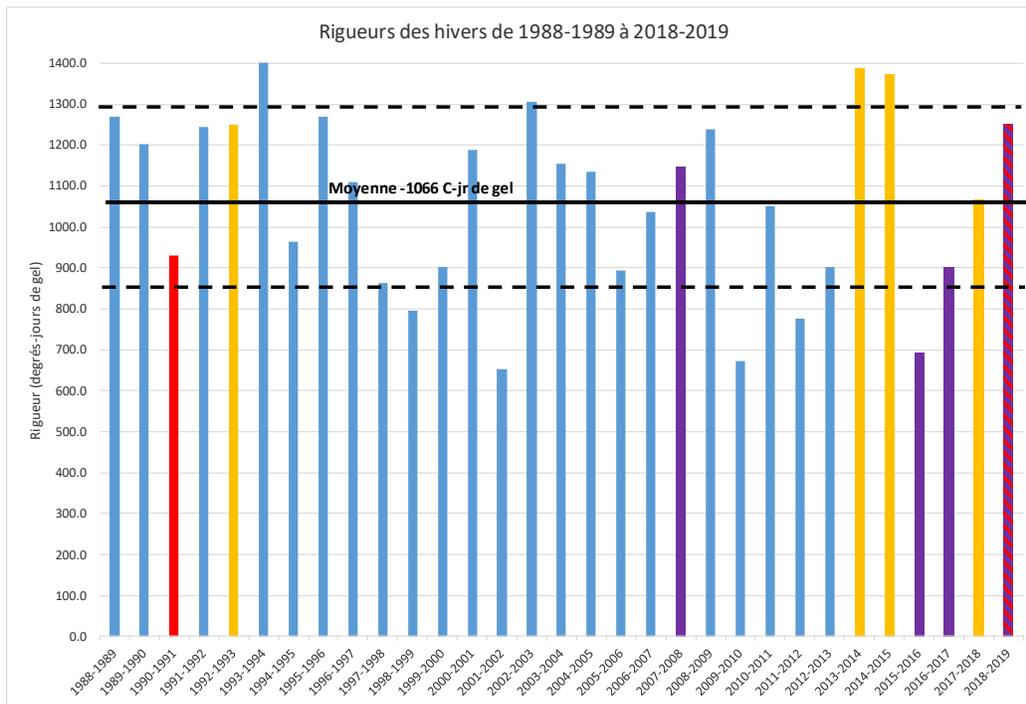


Figure 8 : Rigueurs des 31 derniers hivers à Beauceville (bleu: hivers sans inondations, violet: inondation en cours d'hiver ; rouge: inondation printanière sévère, jaune: inondation printanière modérée). Les lignes pointillées représentent \pm un écart-type.

Notons également que si l'on compare les 15 premières années de la série aux 15 dernières, on constate que les hivers récents ne sont que légèrement plus doux que les hivers antérieurs (1090 degrés-jours de gel pour les hivers de 1988-1989 à 2002-2003 comparé à 1035 degrés-jours de gel pour les hivers de 2004-

2005 à 2018-2019) et la durée moyenne de l'hiver glaciologique est pratiquement identique. Il n'y a donc pas de tendance au changement sur les rigueurs à l'échelle des dernières décennies. On constate toutefois sur la Figure 8 que l'alternance d'hivers rigoureux et d'hivers clément est plus prononcée dans les 15 dernières années.

7.4 Caractéristiques des hivers glaciologiques des années avec inondations par embâcles

La Figure 7 présente également la progression des degrés-jours de gel pour les hivers 1990-1991 et 2018-2019 ayant connus les inondations les plus sévères. On constate d'abord que les inondations par embâcles du 7 avril 1991 et du 16 avril 2019 ont eu lieu après des hivers glaciologiques ayant des rigueurs variant de 930 à 1249 degrés-jours de gel, soit plus faible et plus élevé que la moyenne. De plus ces événements ont eu lieu après la fin de l'hiver glaciologique, soit après cumul d'une vingtaine de degrés-jours de dégel (cumul de températures positives après la fin de l'hiver glaciologique). Ces deux hivers glaciologiques ont également une tendance à finir tard en avril avec un dernier mois où la progression de la courbe est très lente en fin d'hiver. Ce ralentissement s'explique par un réchauffement des températures de l'air au début du printemps, mais un réchauffement qui n'est pas assez significatif pour mettre fin à l'hiver glaciologique. Dans une telle situation, le couvert de glace reste pratiquement intact mais le couvert de neige sur le bassin versant commence à fondre durant le jour lorsque l'apport de chaleur du rayonnement solaire est plus élevé que la déperdition de chaleur par les températures de l'air qui ne sont que légèrement négatives. La fonte des neiges a tendance à augmenter le ruissellement et les débits d'eau dans la rivière, ce qui pourrait désolidariser les couverts de glace des berges bien avant les pointes de débits qui ont lieu plus tard après la fin de l'hiver glaciologique. Si le couvert de glace est déjà désolidarisé des berges au moment de la débâcle, la débâcle pourrait être plus sévère qu'une débâcle qui survient lorsque le couvert de glace est ancré aux berges. Cette hypothèse demeure toutefois à valider avec des observations à long terme.

Notons également les hivers en violet sur la Figure 8. Ceux-ci sont les hivers ayant connu des inondations par embâcles, soit à la prise des glaces ou durant l'hiver glaciologique lorsque la glace est moins épaisse qu'au printemps. Ces événements ont eu lieu suite à des redoux avec des températures de l'air variant de 3 à 7 °C. Bien que moins sévères que les inondations printanières car les volumes de glace y sont moins élevés, ces événements se sont produits uniquement au cours des 15 dernières années. Ceci représente peut-être une nouvelle tendance attribuable au changement climatique. Des données additionnelles permettront de confirmer cette hypothèse.

Il est à souligner que les six derniers hivers ont été marqués par des inondations par embâcle de sévérité variable, dont deux événements pour l'hiver 2018-2019. Contrairement aux événements hivernaux qui semblent être liés aux redoux, les événements printaniers ne présentent pas de tendance claire à l'augmentation.

8 Analyse historique et hydrogéomorphologique

8.1 Analyse historique

Les interventions humaines qui ont perturbé la rivière Chaudière sont aussi nombreuses, à commencer par les premières tentatives de drave qui ont débuté en 1810, mais qui se sont accentuées à partir de 1847. Il semble d'ailleurs qu'en raison de cette activité qui obstruait le cours normal de la rivière, plusieurs habitants de Sainte-Marie ont subi des inondations entre 1917 et 1922 (COBARIC, 2014). L'inondation de 1917 a aussi emporté le pont ferroviaire de Vallée-Jonction et endommagé le pont à Scott. Selon COBARIC (2014), « le 18 juin 1917, l'eau s'est élevée jusqu'à des niveaux jamais vus en raison du bois de flottage de la compagnie Brown Corporation qui obstruait le cours normal de la rivière. Le bois a défoncé des bâtiments et, dans quelques cas, les a déplacés. » L'embouchure de la rivière des Fermes à Saint-Joseph a aussi été élargie par le ministère des Richesses naturelles (MRN) vers 1965 afin de faciliter l'écoulement de la rivière Chaudière lors de débâcles. L'impact sur le niveau d'eau dans ce secteur a été tel que cela obligea les organisateurs des courses de régates à abandonner les courses qui avaient débuté en 1959. La Figure 9 montre la situation à l'embouchure de la rivière des Fermes en 1960 et 2019.



Figure 9: Embouchure de la rivière des Fermes à St-Joseph-de-Beauce en 1960 et 2019. Les anciens méandres de la rivière des Fermes sont visibles sur la photographie de 1960, de même que l'accumulation de sédiments qui ont été dragués en 1965. À noter que cette accumulation est aussi visible sur les photos de 1979 et est toujours présente.

Le redressement de plusieurs tributaires dans les années 1950, 1960 et 1970 a aussi fortement contribué à modifier la dynamique sédimentaire de ce bassin-versant. Le rapport de Tecsalt (1993) faisant état de la situation révèle que près de 400 km de rivières ont été linéarisés, notamment dans les rivières Bras-Victor, Calway, Plantes, Chassé, Linière et Pozer. On voit d'ailleurs bien sur la Figure 9 les anciens bras de méandre sur la photographie de 1960 à l'embouchure de la rivière des Fermes.

D'après Tecsalt (1993) : « Le redressement et le surcreusement des canaux d'irrigation des fermes contribuent aussi à augmenter les phénomènes de ravinement en rive, notamment dans les zones de pentes fortes, et à favoriser une accumulation de sols érodés dans le chenal de la rivière. Au niveau de nombreuses embouchures de rivières ou ruisseaux, on peut observer des zones d'accumulation de sable et de gravier, notamment aux endroits où les cours d'eau drainent des dépôts naturellement sensibles à l'érosion (till sableux, dépôts juxtaglaciaires et épandage fluvio-glaciaire). » (p. 6.10, rapport n. 1).

Le rapport Tecsalt (1994) révèle que le MRN, dans les années 1960 et 1970, a procédé à divers travaux de canalisation, de profilage de berge, d'aménagement d'une fosse à sédiments à l'embouchure de la rivière Bras-Victor, d'enlèvement des matériaux alluvionnaires dans les embouchures des tributaires (e.g. rivières Nadeau et Lessard). « Les travaux de canalisation et d'enlèvement des matériaux ont particulièrement contribué à réduire l'accumulation de matériaux sur le tronçon des eaux mortes et à éviter l'érosion des terres agricoles. En effet, l'accumulation d'alluvions bloque partiellement la section d'écoulement, ce qui, en forçant l'écoulement vers la berge opposée, favorise son érosion. Cependant, ces travaux contribuent moins à l'abaissement des niveaux d'eau en période de crue qu'à la stabilisation des berges et à la conservation des terres agricoles. » (Tecsult, 1994, p. 27).

Des coupes à blanc ont débuté vers 1965. Compte tenu des pentes de versant très élevées dans le bassin, cela constitue un facteur aggravant pour la problématique de ruissellement et d'érosion (Tecsult, 1994).

De plus, « plusieurs accumulations de matériaux dans la rivière Chaudière entre Beauceville et Saint-Georges résultent des activités pratiquées dans le lit même de la rivière ou dans sa plaine inondable. Ces activités sont principalement liées à l'exploitation de gravières (construction de chemins, batardeaux, piles d'entreposage, etc.). Les infrastructures laissées en place réduisent la section d'écoulement de la rivière, ce qui contribue à augmenter les vitesses du courant et l'érosion des berges. » (Tecsult, 1994 (rapport final), p. 21). La superficie de ces exploitations variait, en moyenne, de 5 000 à 20 000 m² pour des volumes d'extraction de l'ordre de 10 000 à 30 000 m³ (Tecsult, 1993, rapport n. 1, p. 6.15). On note par exemple la présence de chemins d'accès et de batardeaux sur la photographie de 1979 en aval de Beauceville (Figure 10). Comme indiqué par Tecsalt (1993) : « La présence de ces infrastructures, le cas échéant, peut influencer le comportement hydrologique et hydraulique de la rivière, notamment en stabilisant les embâcles qui s'appuient sur ces digues. Aussi, l'entreposage en tas des matériaux granulaires sur le bord de la rivière peut constituer un obstacle au déplacement des glaces et modifier conséquemment la dynamique. Ces changements influencent à leur tour les processus naturels d'érosion qui peuvent être amplifiés. » Au km 58, en aval de Beauceville, le MRN a excavé dans les années 1960 un chenal dont la profondeur était 1,5 m plus basse que le fond de la rivière.



Figure 10: Présence de batardeaux et de chemins d'accès dans la rivière Chaudière à l'aval de Beauceville en 1979 (les chiffres indiquent les points kilométriques (PK) à partir de St-Lambert, et correspondent aux valeurs utilisées dans le rapport de Tecсут (1994)).

Le développement survenu le long de la rivière Chaudière dans les dernières décennies a fort probablement contribué à accroître la vulnérabilité aux inondations. D'après Tecсут (1994) : « Plusieurs des agglomérations urbaines de la Beauce se sont développées considérablement, au cours des 25 dernières années, le long de la rivière Chaudière et ce, malgré la fréquence élevée des inondations et une bonne connaissance des problèmes que causent ces zones à risque. » (p. 45). De plus, « L'étude des effets du développement anthropique a permis de déterminer que les changements à l'utilisation des sols depuis le début du siècle ont eu un effet sur le ruissellement et l'érosion sur le bassin versant. La comparaison de l'indice global de ruissellement du bassin avec un couvert forestier à 100 % indique qu'il serait inférieur d'environ 5 % à l'indice actuel » (Tecсут, 1994, p. 46).

« Un autre élément qui a pu contribuer à accentuer le ruissellement, c'est le fait que les équipes d'entretien des routes, tant au niveau municipal que provincial, attachent une attention toute particulière à dégager les ponceaux avant le dégel printanier. Cette pratique se distingue nettement de ce qui prévalait au début du siècle, alors qu'on laissait la nature suivre son cours. Certes, lors du dégel printanier, on retrouve encore aujourd'hui des ponceaux gelés qui provoquent des refoulements et des inondations, surtout le long de certaines routes de campagne, mais ce phénomène est sûrement moindre qu'avant. » (p. 5-34, rapport n. 1, Tecсут, 1993)

Toujours d'après Tecсут (1994) : « Les activités de développement dans les secteurs agricoles, industriels et forestiers, de même que le développement des villes et des infrastructures routières se sont traduits par un accroissement considérable du réseau de drainage, ce qui favorise une augmentation des débits en période de crue (réf. tableau 7.2, rapport d'étape n° 1). Ces changements au régime hydrologique

justifient amplement que l'on se préoccupe davantage de la gestion de l'utilisation des terres dans l'ensemble du bassin versant, dans la recherche d'une solution au problème des inondations sur la rivière Chaudière. »

Un exemple de modification majeure de l'aménagement du territoire se trouve à Vallée-Jonction, près de l'embouchure des rivières Nadeau et Lessard où une grosse accumulation de sédiments est présente. La Figure 11 montre la présence à proximité de carrières qui pourraient contribuer à accroître la charge sédimentaire dans la rivière Chaudière.

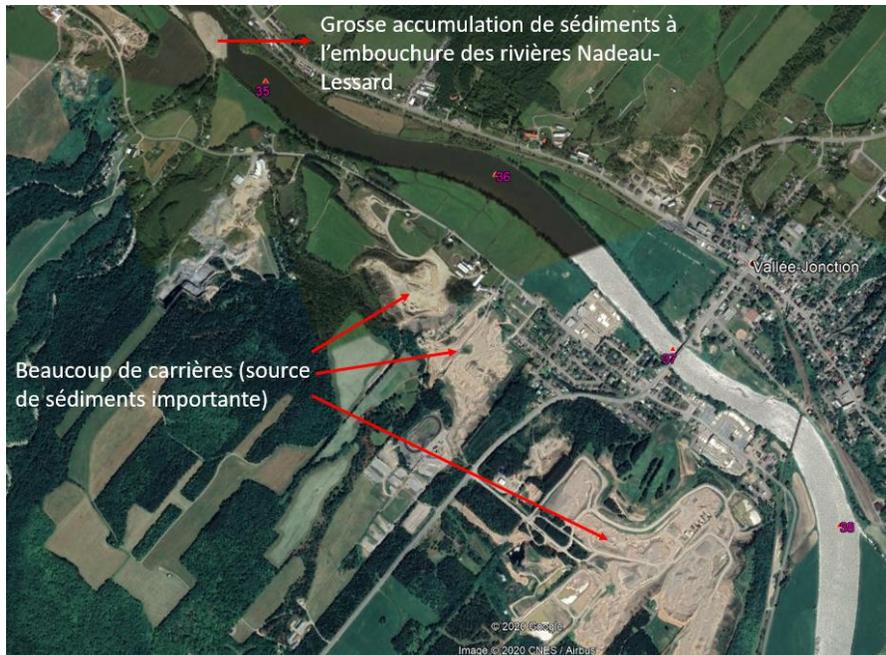


Figure 11 : Plusieurs sources de sédiments se trouvent à proximité de l'embouchure des rivières Nadeau et Lessard, où une forte accumulation est notable.

Il est aussi intéressant de noter qu'un panache important de sédiments était visible en 1979 dans le tributaire situé en amont du confluent Nadeau/Lessard, mais que ce tributaire a été remblayé depuis (Figure 12).

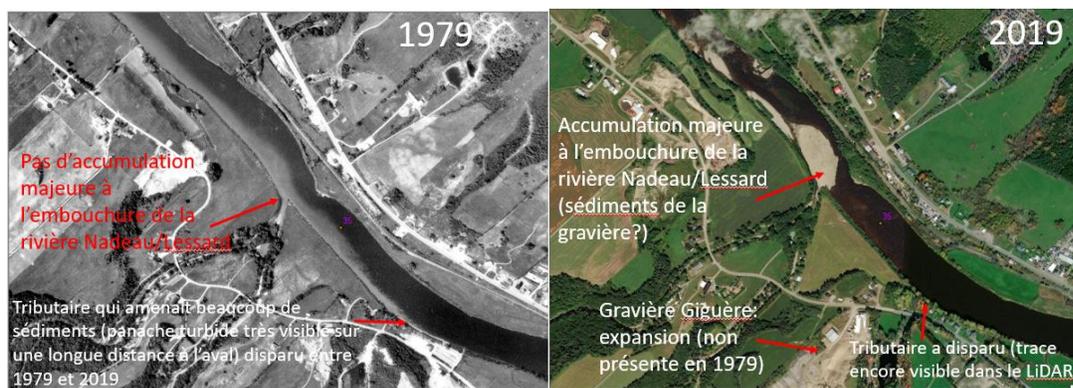


Figure 12 : Interventions anthropiques autour du confluent des rivières Nadeau-Lessard, affectant l'apport de sédiments.

Enfin, l'analyse historique révèle aussi que les dépôts de sédiments dans ce secteur semblent s'approcher de la morphologie présente en 1960, soit avant les modifications majeures dans le lit de la rivière (Figure 13).



Figure 13 : Secteur à l'aval du confluent avec les rivières Nadeau-Lessard en 1960, 1979 et 2019

Par ailleurs, il est très probable que l'élimination des méandres dans certains tributaires ait contribué à accroître le volume de sédiments qui transitent vers la rivière Chaudière. En effet, les bancs d'accumulation dans les méandres sont des zones naturelles de stockage de sédiments, alors que les cours d'eau linéarisés en forme trapézoïdale résultent en un transit plus rapide des sédiments vers l'aval. Par

exemple, on voit bien sur la Figure 14 (photo de 1960) les anciens méandres de la rivière des Fermes (à St-Joseph), mais on note aussi une forte accumulation à l'embouchure (aussi présente aujourd'hui).



Figure 14 : Anciens bras de méandres de la rivière des Fermes à St-Joseph visibles en 1960, favorisant le transit sédimentaire vers l'embouchure (PK 45).

En résumé, comme l'indiquait le rapport Tecsub de 1994, « les débits reflètent les phénomènes hydrologiques qui découlent tant des composantes naturelles du bassin versant (pente, végétation, type de sol) que des facteurs anthropiques (utilisation du sol, pratiques de développement, infrastructures, etc.). » (p. 1.4, rapport n. 1). Des solutions qui ne tiendraient pas compte des interventions anthropiques passées, notamment le dragage, ont peu de chance de réussir si l'on ne s'attaque pas à la cause des problèmes. Ceci exige de bien identifier les transformations qui sont survenues à l'échelle des sous-bassins des différents tributaires, ainsi que directement dans le chenal de la rivière Chaudière.

8.2 Analyse hydrogéomorphologique

Comme l'analyse historique le révèle, le bassin de la rivière Chaudière a été fortement modifié par des activités anthropiques liées à la drave, aux activités d'extraction de graviers et au développement agricole accompagné par une linéarisation majeure des tributaires. Des modifications importantes ont aussi eu lieu directement dans la rivière Chaudière, notamment par l'élimination d'anciens bras pour rendre la rivière plus étroite qu'elle ne l'était auparavant.

L'analyse des photos de 1935 et 1960 montre que cette rivière, dans la partie amont du secteur à l'étude (de Saint-Georges à Beauceville), est une rivière divagante (en anglais « wandering river », Desloges et Church, 1989), caractérisée par une forte charge sédimentaire, une prédominance de bancs composés créant des anabranches (Burge, 2005; Bourdon, 2013). La morphologie de ce type de chenal est transitoire entre des conditions de rivière à méandres et de chenaux tressés (Desloges et Church, 1989), mais qui présente généralement un patron peu régulier en regard des rivières à méandres. Les sites où des embâcles de glace se produisent sont courants dans les rivières divagantes, y compris des courbes serrées, des coupes transversales peu profondes, des têtes d'îlots et des rétrécissements de canaux (Burge, 2005).

L'excavation de graviers dans les rivières divagantes est assez fréquente (Wishart et al. 2008; Bourdon, 2013). Celle-ci résulte en général en une réduction de la largeur active de la rivière. Le mémoire de maîtrise de Philippe Bourdon en 2013 sur la rivière de l'Anse Pleureuse en Gaspésie est particulièrement

éclairant à ce sujet (« Analyse de l'ajustement morphosédimentaire d'une rivière divagante à des travaux d'excavation de sédiments : le cas de la rivière de l'Anse Pleureuse en Gaspésie »). Il y indique que :

« Avec un comblement de 52% de la portion draguée, il appert que le dragage n'a qu'un effet temporaire puisque le comblement de la fosse débute dès le premier événement morphogène et les formes du lit se rétablissent également selon ce même délai dans la fosse d'excavation. L'impact majeur concerne l'augmentation de l'instabilité du tracé en plan en amont de la zone draguée où l'érosion régressive a provoqué l'enlèvement d'un embâcle de concavité qui protégeait la berge gauche. Il en résulte l'activation de la migration latérale de cette berge qui pourrait devenir problématique pour la sécurité de la route. L'analyse historique a mis en lumière le dynamisme de la rivière, qui se traduit par des pulsations épisodiques de la largeur du chenal dont les variations sont de l'ordre de 10 mètres sur une moyenne de largeur de 25 mètres. Les résultats suggèrent que les travaux de dragage n'ont atteint leurs objectifs que pour une période très courte et que d'autres travaux seront nécessaires. Plus important, les résultats montrent que l'absence de considérations géomorphologiques dans le processus de gestion des cours d'eau amène à réaliser des travaux dont les effets peuvent être non désirés qui rendent caduque l'intervention même. »

Le dragage demeure malgré tout l'option privilégiée par l'ensemble des municipalités situées entre Scott et Saint-Georges, puisque la perception générale dans les municipalités de Saint-Georges à Scott est qu'il y a un problème d'aggradation de la rivière. Il n'y a malheureusement que peu de données bathymétriques disponibles sur la rivière Chaudière, outre celles recueillies par le CEHQ en 2001 à 123 sections transversales entre Saint-Georges et St-Lambert (CEHQ, 2005). La comparaison des mesures prises en 2020 sous couvert de glace par l'équipe du professeur Morse (Université Laval) a révélé que les différences de profondeur étaient dans l'ensemble faibles, soit moins de 20 cm en moyenne pour une coupe située près de Sainte-Marie et moins d'un cm pour une coupe du secteur de Saint-Joseph. Il n'est donc pas possible de conclure à partir de ces données limitées qu'il y aurait un phénomène d'ensablement dans la rivière Chaudière.

La section suivante analyse plus en détail les zones identifiées par les municipalités comme étant prioritaires pour procéder à l'excavation de sédiments. Cette analyse se base sur l'examen détaillé des photographies aériennes historiques de 1935, 1960 et 1979.

8.3 Analyse détaillée des zones d'excavation identifiées par les municipalités

Les figures 15 à 27 présentent les zones d'accumulation de sédiments considérées problématiques dans les documents cartographiques fournis par les municipalités. Ces figures sont présentées de l'aval vers l'amont. Les zones identifiées par les municipalités sont généralement associées avec des accumulations de sédiments à l'embouchure des tributaires. L'analyse des photos historiques révèle que ces accumulations ont toujours été présentes, et qu'il ne s'agit donc pas d'un phénomène récent qui indiquerait qu'un phénomène d'aggradation est en cours sur la rivière Chaudière. Il est possible que ces accumulations de sédiments aient un impact sur le développement d'embâcles de glace, mais cela aurait aussi été le cas dans les 90 dernières années, et ne pourrait donc pas expliquer une augmentation de la fréquence des inondations par embâcle dans les dernières années.

Il est aussi à noter que les photos aériennes utilisées pour les cartes présentées par les municipalités datent de l'été 2015 et ont été prises lors d'un étiage prononcé. Les bancs d'accumulation ressortent alors plus que lorsque les niveaux sont un peu plus élevés, et qu'ils se retrouvent en grande partie sous l'eau. Par exemple, la Figure 15 présente deux exemples de confluent (rivière Pouliot, Bras Victor et rivière des Plantes) en 2015 (étiage) et en 2019 (année plus près des normales), et illustre que l'impression d'accumulation de sédiments est accrue lorsque les photographies sont prises à des niveaux d'eau très bas.



Figure 15 : A) Rivière Pouliot à St-Joseph-de-Beauce - photographie de l'été 2015 du document présenté par la municipalité (gauche) et même secteur en 2019 (photographie de Google Map) à un niveau d'eau plus élevé, ne montrant pas de banc d'accumulation au confluent (droite); B) Bras Victor (Beauceville) en 2015 (étiage) à gauche montrant des accumulations de sédiments qui n'apparaissent pas sur la photographie de 2019, où le tracé de 1935 est aussi superposé en bleu (droite); C) Rivière des Plantes et ruisseau Fraser (Beauceville) en 2015 (étiage) à gauche montrant des accumulations de sédiments qui n'apparaissent pas sur la photographie de 2019, où le tracé de 1935 est aussi superposé en bleu (droite)



Figure 16 : Points de dragage (points en jaune) suggérés par la municipalité de Sainte-Marie au Ruisseau Dupuis et Ruisseau Carter (gauche) et photographie aérienne de 1935 pour le même secteur montrant des accumulations de sédiments aux confluents (droite).



Figure 17 : Point de dragage (point en jaune) suggéré par la municipalité de Sainte-Marie au confluent de la rivière Du Bois (Savoie) (gauche) et photographie aérienne de 1935 pour le même secteur montrant des accumulations de sédiments au confluent (droite)



Figure 18 : Accumulation de sédiments considérée problématique par la municipalité de Vallée-Jonction au ruisseau Lessard (haut) et photographies aériennes de 1935 (centre) et de 1960 (bas) pour le même secteur montrant des accumulations de sédiments. À noter qu'il s'agit du secteur identifié à la Figure 12 comme ayant des sources de sédiments importantes à proximité.



Figure 19 : Zone d'accumulation identifiée par la municipalité de Saint-Joseph-des-Érables à l'embouchure de la rivière Cliche (haut) et photographies aériennes de 1935 (centre) et de 1960 (bas) pour le même secteur montrant des accumulations de sédiments.

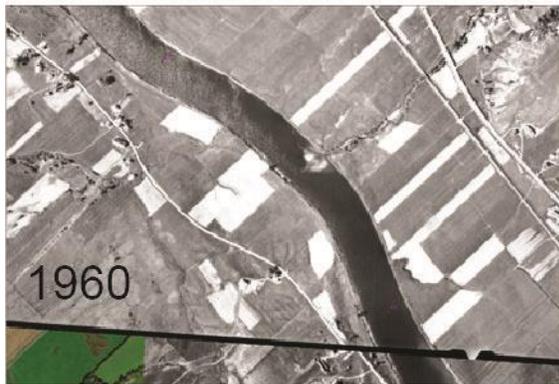


Figure 20 : Rivière Pouliot (aussi présentée à la Figure 15) en 1935 (haut) indiquant encore d'anciens méandres qui stockaient les sédiments; Photo de 1960 (centre) après linéarisation, avec plus d'accumulation de sédiments; Photo de 1979 (bas) avec de nouveaux travaux de linéarisation, et un banc d'accumulation plus important au confluent.



Figure 21 : Zone d'accumulation identifiée par la municipalité de Saint-Joseph-de-Beauce à l'embouchure du ruisseau St-Jacques (haut) et photographies aériennes de 1935 (centre), montrant ce qui semble être un chemin d'accès au banc d'accumulation, et de 1960 (bas) pour le même secteur montrant aussi des accumulations de sédiments. Les modifications majeures de l'ancien parcours du tributaire en méandres sont particulièrement évidentes dans la photo du centre droit. La photo de 1960 montre aussi bien les anciens méandres.



Figure 22 : Accumulations de sédiments identifiées par la municipalité de Beauceville dans le Bras Victor (haut). Photo de 1935 (centre) et 1960 (bas) montrant un tracé divagant avec une forte charge sédimentaire (présence de nombreux bancs d'accumulation qui stockent les sédiments).



Figure 23 : Modifications de tracé près de l'embouchure de la rivière des Plantes et du ruisseau Fraser (identifié à la Figure 15C par la municipalité de Beauceville comme étant problématique) en 1935 (haut), 1960 (centre) et 1979 (bas), avec le tracé de 1935 superposé en bleu sur celui de 1979.



Figure 24 : Suivi historique du banc d'accumulation à l'embouchure de la rivière du Moulin à Beauceville montrant peu de changements majeurs depuis au moins 1935 dans ce secteur.



Figure 25 : Secteur problématique identifié par la municipalité de Notre-Dame-des-Pins à l'île aux Oies (gauche) avec le tracé de 1935 superposé en bleu à droite, illustrant des modifications majeures de tracé.

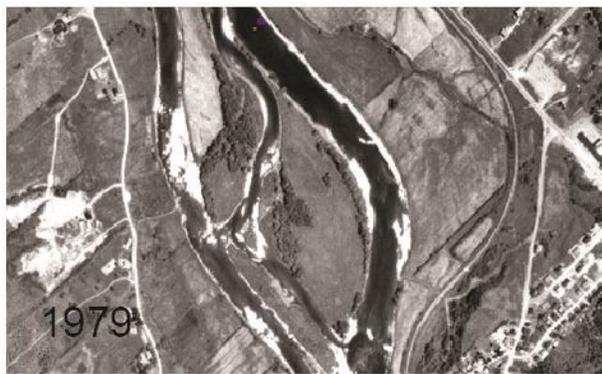


Figure 26 : Ile aux Oies (Notre-Dame-des-Pins) en 1935 (haut), 1960 (centre) et 1979 (bas) illustrant un tracé divagant caractérisé par des anabranches et une charge sédimentaire élevée.

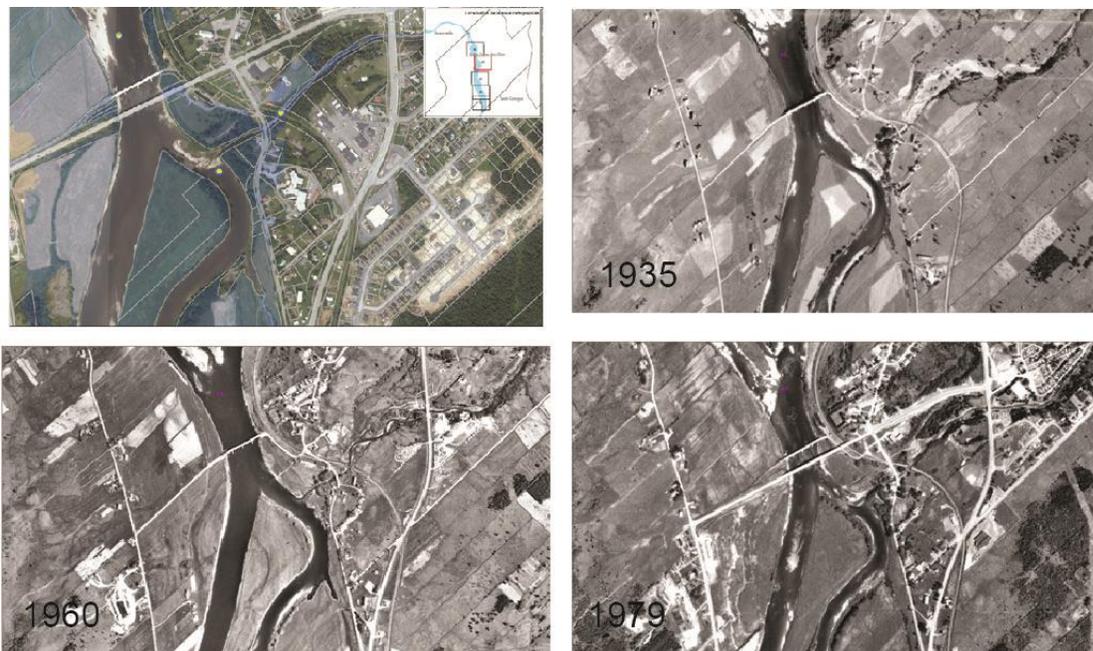


Figure 27 : Accumulations de sédiments identifiées par la municipalité de Notre-Dame-des-Pins (points en jaune) à l’embouchure de la rivière Gilbert (en haut à gauche); Photo de 1935 (en haut à droite), 1960 (en bas à gauche) et de 1979 (en bas à droite). L’espace de liberté de l’embouchure de la rivière Gilbert est présenté dans la section 8.5.

8.4 Modélisation de scénarios de dragage

Il apparaît important de bien distinguer les mesures qui permettraient de diminuer les inondations en eau libre des inondations par embâcles. Par exemple, comme indiqué dans le rapport Tecsub de 1994, l’enlèvement de sédiments à l’embouchure des tributaires (qui pourraient possiblement favoriser le développement d’embâcles de glace), contribue peu à l’abaissement des niveaux d’eau en période de crue. Ceci a aussi été vérifié à l’aide de la modélisation hydraulique avec LISFLOOD-FP. La modification de la bathymétrie autour du cône alluvial à l’embouchure des rivières Nadeau-Lessard pour simuler un dragage local (Figure 18) n’a qu’un effet très limité sur les niveaux d’eau, avec uniquement une réduction des surfaces inondées en amont du cône.

Le scénario de prélèvement de 1 m de sédiments sur l’ensemble du tronçon entre les municipalités de Sainte-Marie et de Beauceville avec le modèle LISFLOOD-FP engendre une réduction des surfaces d’inondation, mais celle-ci reste limitée. L’analyse détaillée des zones d’excavation identifiées par les municipalités (section 8.3) révèle aussi qu’il est très probable que la nouvelle bathymétrie ainsi créée sera rapidement modifiée par les apports sédimentaires en provenance des tributaires et de l’amont de la rivière Chaudière puisque cette rivière et ses tributaires sont caractérisés par une forte charge sédimentaire. Enfin, le troisième scénario de dragage plus marqué (2 m) à Beauceville et à Sainte-Marie indique peu de changements à Beauceville (notamment en raison de la présence de seuils rocheux), et un effet limité pour une crue de débit 20 ans à Sainte-Marie.

Il est aussi à noter que Tecsub (1994) indique que : « L’étude a permis de démontrer que pour éliminer le risque d’inondation pour une crue de 100 ans et moins il faut, soit augmenter la capacité d’écoulement

du chenal principal de 25 %, soit diminuer, dans la même proportion, le débit de pointe lors des crues. L'augmentation de la capacité d'écoulement implique de creuser, sur de longues distances, la rivière, ce qui entraîne des coûts élevés et des impacts environnementaux considérables. Toutes les solutions de ce type ont donc été rejetées. » (p. 90, rapport final).

8.5 Espace de liberté

Les données LiDAR, combinées aux photographies aériennes historiques, permettent de cartographier approximativement l'espace de liberté de la rivière (Biron et al. 2014; Massé et al. 2020). L'espace de liberté inclut l'espace d'inondabilité, de mobilité ainsi que les milieux humides riverains. Dans le contexte de la rivière Chaudière, l'espace d'inondabilité est celui qui détermine au final l'espace de liberté puisque les secteurs inondés dépassent largement les zones de mobilité active (Massé et al. 2020).

Deux exemples de délimitations approximatives de l'espace de liberté, basées sur la superposition des données LiDAR et de photographies historiques de 1935 sont présentés à la Figure 28 pour le secteur près de l'embouchure de la rivière Gilbert et à la Figure 29 pour la zone à l'aval des rapides du Diable à Beauceville. Dans ce cas, la zone d'espace de liberté approximative correspond assez bien aux niveaux atteints lors de l'inondation du printemps 2019 (Figure 29D).

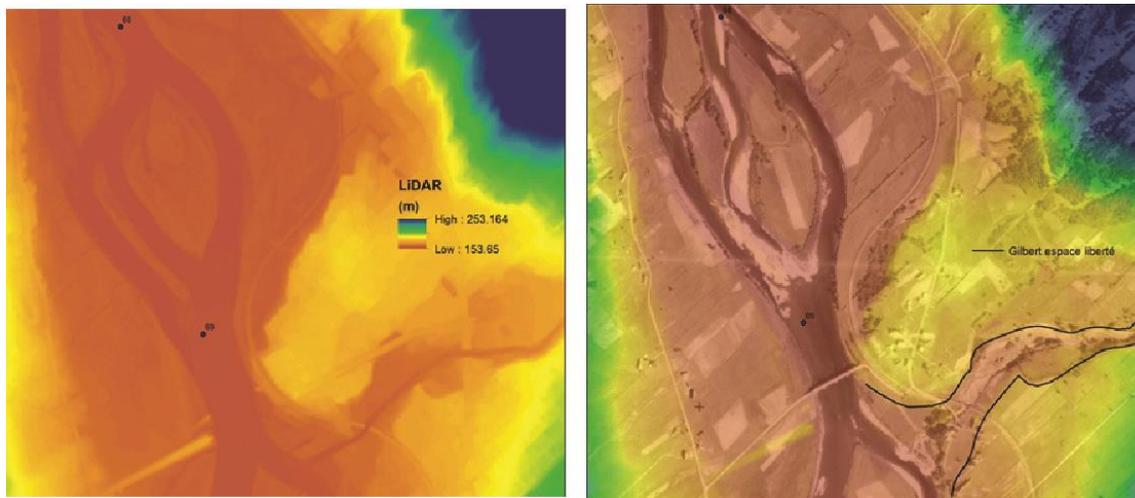


Figure 28 : Modèle Numérique d'Élévation (MNE) LiDAR autour du confluent de la rivière Gilbert (gauche) montrant une large plaine alluviale autour de la rivière Gilbert. Le MNE est aussi superposé, en transparence partielle, à droite, à la photographie aérienne de 1935 afin de tracer les limites approximatives de l'espace de liberté de la rivière Gilbert.

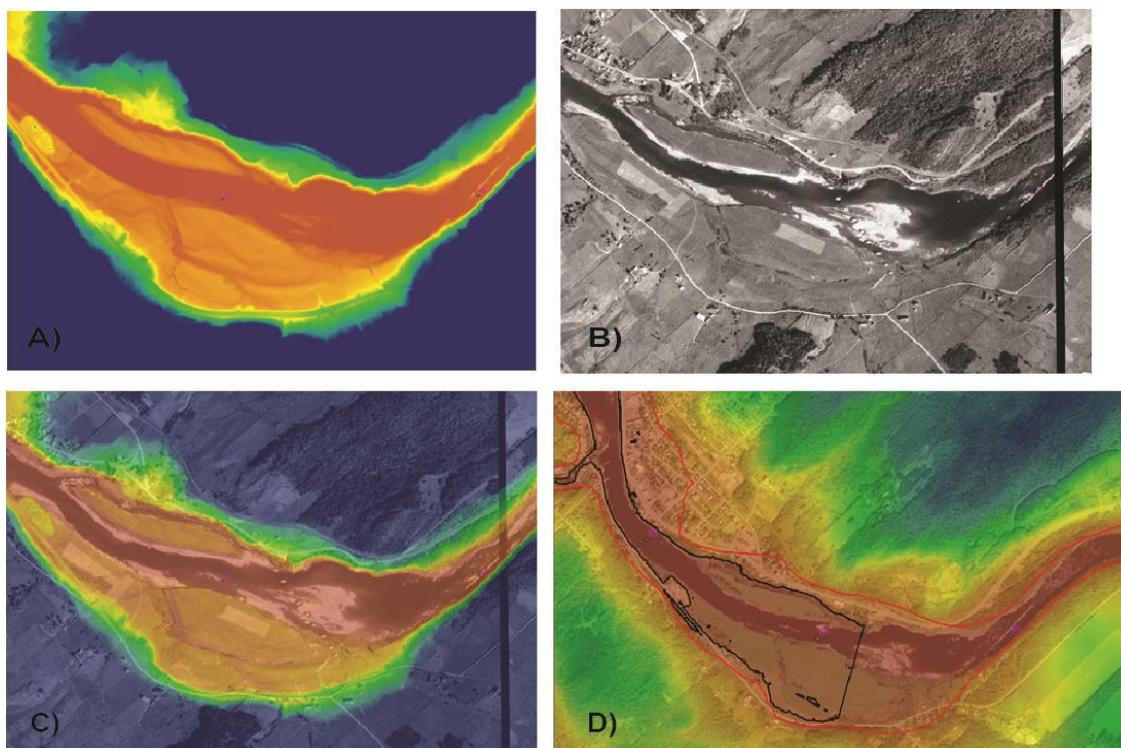


Figure 29 : A) MNE LiDAR en amont de Beauceville (aval des rapides du Diable) montrant l'espace que la rivière Chaudière occupait auparavant (zones de faible élévation en brun); B) Photo de 1935, où des modifications du chenal sont déjà visibles (on voit l'ancien bras de la rivière sur la berge gauche); C) LiDAR en partie transparent superposé à la photo de 1935 montrant la section qui était sans doute occupée auparavant par la rivière sur la berge gauche; D) zone inondée au printemps 2019 (ligne noire) selon les photos prises par hélicoptère (qui s'arrêtaient avant les rapides du Diable). La ligne rouge représente la limite approximative d'espace de liberté.

Les figures 30 à 36 présentent les limites approximatives d'espace de liberté de Beauceville à Scott. On remarque que le secteur résidentiel à Saint-Joseph (Figure 30) est entièrement à l'extérieur de l'espace de liberté, ce qui explique pourquoi cette municipalité est nettement moins vulnérable aux inondations que celles de Beauceville, Vallée-Jonction, Sainte-Marie et Scott, où d'importantes portions de secteurs résidentiels ou commerciaux se trouvent à l'intérieur de l'espace de liberté (figures 30, 33, 35, 36).

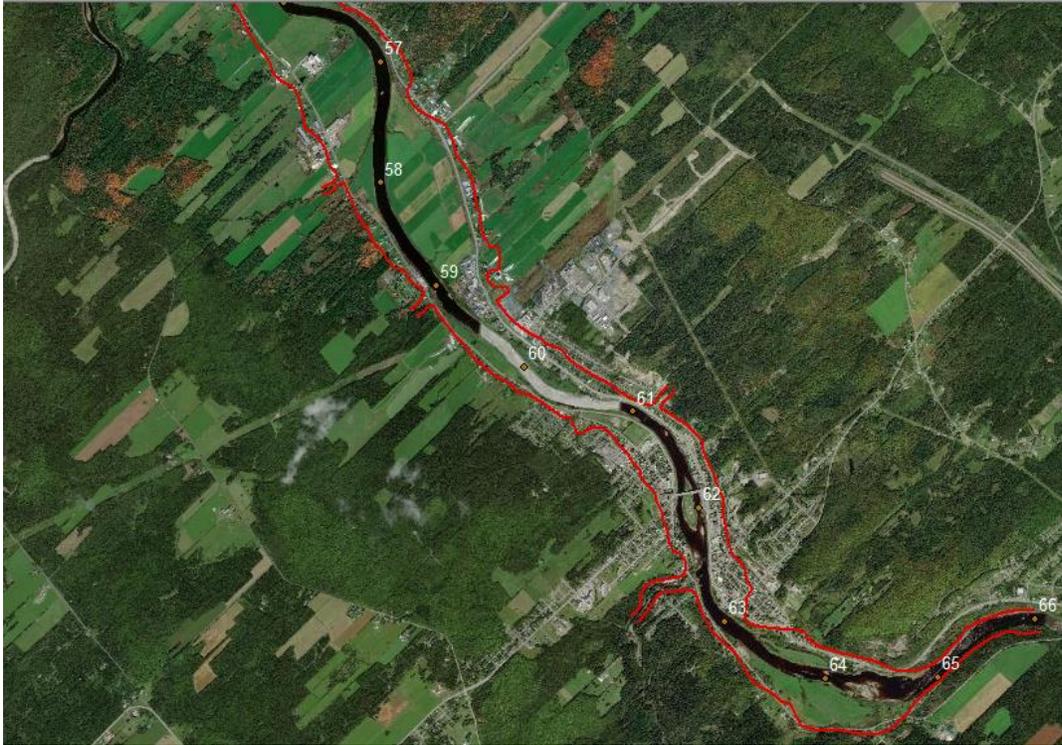


Figure 30 : Limites approximatives d'espace de liberté (en rouge) pour le secteur de Beauceville. Les chiffres indiquent les points kilométriques du rapport de Tecsalt (1994).

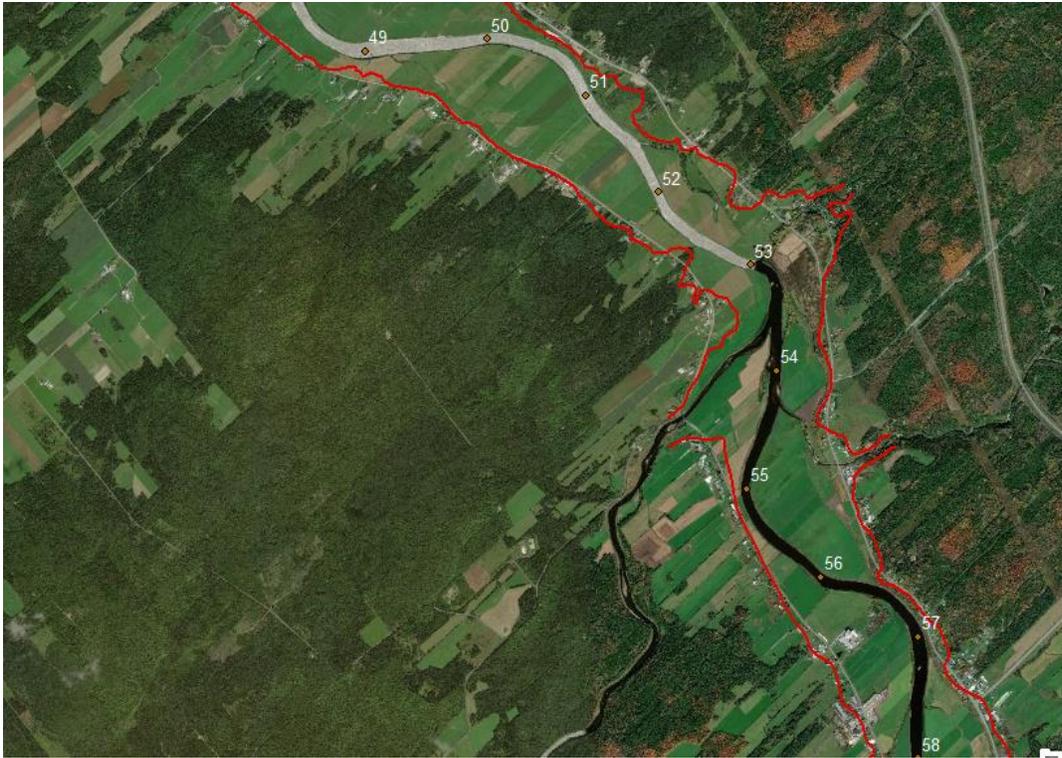


Figure 31 : Limites approximatives d'espace de liberté (en rouge) pour le secteur du Bras Victor. Les chiffres indiquent les points kilométriques du rapport de Tecsalt (1994).



Figure 32 : Limites approximatives d'espace de liberté (en rouge) pour le secteur de St-Joseph. Les chiffres indiquent les points kilométriques du rapport de Tecsuit (1994).



Figure 33 : Limites approximatives d'espace de liberté (en rouge) pour le secteur de Vallée-Jonction. Les chiffres indiquent les points kilométriques du rapport de Tecsuit (1994).



Figure 34 : Limites approximatives d'espace de liberté (en rouge) pour le secteur entre Vallée-Jonction et Sainte-Marie. Les chiffres indiquent les points kilométriques du rapport de Tecsult (1994).

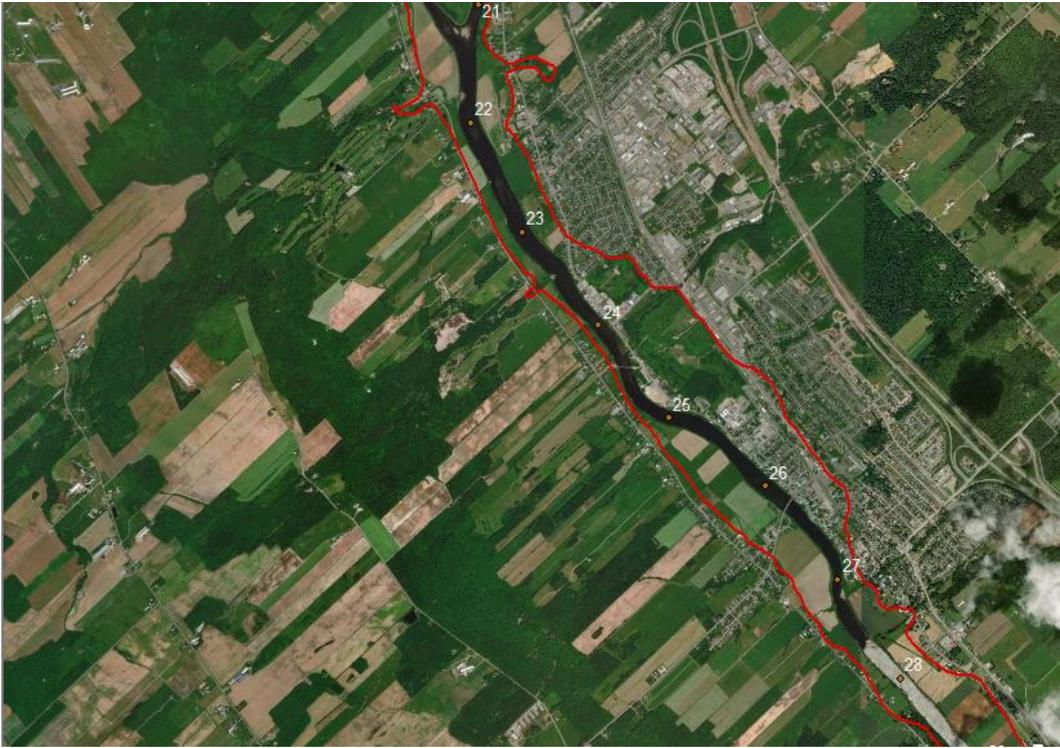


Figure 35 : Limites approximatives d'espace de liberté (en rouge) pour le secteur de Sainte-Marie. Les chiffres indiquent les points kilométriques du rapport de Tecsult (1994).



Figure 36 : Limites approximatives d'espace de liberté (en rouge) pour le secteur de Scott. Les chiffres indiquent les points kilométriques du rapport de Tecsalt (1994).

9 Examen des solutions possibles

Parmi l'ensemble des solutions recensées, voici celles qui feront l'objet d'un examen par le Comité expert pour les inondations en eau libre (Tableau 1) et par embâcle (Tableau 2). Une description plus approfondie de ces solutions est fournie ci-dessous.

Tableau 1 : Solutions examinées par le CE pour les inondations en eau libre

ID	CAT	DESC	LOCALISATION	OBJECTIF VISÉ
L1	Dragage	Excavation – seuil et canal	Aval de Scott, PK 13.76 à 17.99 et de Scott à Sainte-Marie, PK 18.44 à 27.91	Augmentation de la capacité d'évacuation du chenal lors des crues
L2		Excavation embouchure tributaires	De Scott à Notre-Dame-des-Pins	Amélioration de la capacité d'évacuation du chenal lors des crues
L3	Dérivation	Dérivation	Aval de Scott, PK 2 à 10	Augmenter la débitance pour les crues supérieures à Q(2ans)
L4	Rétention d'eau	Rétention eau tributaires	Bassin versant	Réduire les apports en eau et laminier les écoulements (atténuer les pics) en temps de crue
L5	Restauration tribulaire	Restauration tributaires	Bassin versant	Atténuer la vitesse de propagation de l'onde de crue et réduire les débits de pointe
L6	Espace de liberté	Délocalisation	Bassin versant	Réduire la vulnérabilité des populations et infrastructures face aux inondations
L7	Immunsation	Endiguement	Sainte-Marie	Réduire la vulnérabilité des populations et infrastructures face aux inondations

La solution **L1** est issue du rapport de Tecsalt (1993). Elle consiste en une excavation d'un canal de 137m x 4230m x 2,78m pour écrêter le seuil situé en aval de Scott, combinée à une excavation du lit de la rivière entre Scott (km 18) et Sainte-Marie (km 28) (variante 3 du rapport n. 2, p. 3-9). L'écrêtement du seuil vise, d'après Tecsalt (1993), à « éliminer la section qui contrôle les niveaux d'eau sur le tronçon des eaux mortes aux débits supérieurs à 100 m³/s environ. La section de contrôle est ainsi déplacée du km 15,01 au km 11,59 jusqu'à la section de contrôle aval située à Saint-Bernard. Cette excavation a donc pour effet d'abaisser la ligne d'eau en amont. » (rapport n. 2, p. 3-4). L'excavation totale du canal entre le seuil situé à l'aval de Scott et la ville de Sainte-Marie représente un volume total de matériaux de 3,38 millions de mètres cubes (Tecsult, 1993, rapport n. 2, p. 3.16). Toujours d'après Tecsalt (1993), « Les travaux de la variante 3 peuvent être réalisés sur une période de six mois, mais cela nécessite l'emploi d'une flotte d'environ 75 camions de 10 roues, travaillant 10 heures par jour, 5 jours par semaine. Il peut être plus avantageux de répartir ces travaux sur deux années. On peut prévoir que la circulation de cette flotte de camions provoquera une usure plus marquée des routes, ce qui pourrait nécessiter leur réfection » (rapport n. 2, p. 3-17). Cette solution permettrait toutefois une diminution très importante des dommages, ramenant le niveau de la crue de 100 ans à celui de la crue de 5 ans à Sainte-Marie.

La solution **L2** consiste à excaver des accumulations sédimentaires à l'embouchure des tributaires. Cette solution a été proposée par les municipalités situées dans le tronçon entre Scott et Notre-Dame-des-Pins. Celles-ci ont fourni au ministère un document identifiant les confluents plus problématiques (voir la section 8.3 qui analyse plus en détail ces accumulations à partir des photographies aériennes historiques). Les discussions avec les élus municipaux lors de la visite du 19 février ont révélé que plusieurs considèrent ces accumulations comme un facteur aggravant, notamment en ce qui a trait au risque de développement d'un embâcle de glace.

La solution **L3** est une suggestion du comité expert. Elle consiste en l'aménagement d'un canal de dérivation sur la rive ouest de la Chaudière en aval de Scott pour permettre une meilleure évacuation des débits pour des événements supérieurs à une récurrence de 2 ans. Cette suggestion fait suite à une analyse détaillée des pentes dans le secteur de Scott qui met en évidence une série de rapides entre Scott et Saint-Lambert. Ces rapides semblent contrôler le niveau d'eau de l'ensemble du tronçon des eaux-mortes. La solution consiste à construire un canal de dérivation qui court-circuiterait les rapides entre Scott et Saint-Lambert sans intervenir sur le lit de la rivière. Le canal serait alimenté par un ouvrage de contrôle en rive gauche avec vannes d'évacuation qui seraient ouvertes seulement pour des crues dépassant la crue de récurrence 1:2 ans (environ 1200 m³/s à Saint-Lambert). Si le canal a une largeur de 50 m, un radier calé à une élévation de 134 m à son entrée et 111 m à sa sortie, celui-ci pourrait évacuer jusqu'à 1600 m³/s sous une profondeur d'environ 5 m d'après les calculs théoriques. C'est un ouvrage qui aurait des dimensions semblables au canal Lachine à Montréal (Longueur de 7300 m Largeur de 50 m et Profondeur de 5-6 m). Celui-ci permettrait de garder un débit de 1200 m³/s dans les rapides et évacuer le débit excédant par ce canal pour passer la crue 20 ans et 100 ans sous des niveaux d'eau significativement plus bas. Notons également que l'avantage de passer les crues élevées sous des niveaux d'eau plus bas augmenterait le cisaillement sur les fonds de la rivière permettant ainsi d'entraîner les accumulations de sédiments sans dragage. Cet effet sédimentaire pourrait toutefois s'étaler sur plusieurs années, mais c'est un moyen d'utiliser des processus pseudo-naturels pour chasser des accumulations de sédiments.

La solution **L4** émane du rapport de Tecsalt (1993) où une analyse détaillée a été menée pour quantifier l'impact de la rétention d'eau dans les tributaires par la construction d'ouvrages réservoirs sur certains tributaires ainsi que sur la rivière Chaudière. Leur analyse a démontré que les réservoirs sont les plus efficaces lorsque situés près de l'embouchure des principaux tributaires dans la rivière Chaudière, de façon à contrôler la plus grande superficie possible de leur bassin versant respectif. Les trois sites propices à l'implantation de réservoirs sur les tributaires avaient déjà été étudiés par le Ministère des ressources naturelles dans les années 1960, soit les sites Plamondon et Morissette sur la rivière Famine et le site situé à 300 m en amont du pont de la route 173 sur la rivière Linière. Tecsalt (1993) indique aussi qu'il est absolument essentiel de placer un réservoir sur la Haute-Chaudière, à cause de l'importance des débits provenant de ce sous-bassin. La solution la plus porteuse semble être l'implantation du réservoir Nebnellis de 100 M m³ en aval du lac Mégantic.

La solution **L5** concerne la restauration des tributaires, et est suggérée par le comité expert. Rappelons que selon Tecsalt (1993) près de 400 km de rivières ont été linéarisés dans le bassin de la rivière Chaudière, notamment dans les rivières Bras -Victor, Calway, Plantes, Chassé, Linière et Pozer. Par ailleurs, plusieurs élus considèrent que les apports sédimentaires en provenance des tributaires sont problématiques pour les inondations. En permettant aux tributaires linéarisés de revenir à un tracé naturel sinueux (voir la section 8 où plusieurs figures identifient les anciens bras de méandres), le stockage naturel des sédiments dans les bancs d'accumulation des méandres augmenterait vraisemblablement, réduisant ainsi les accumulations dans la rivière Chaudière. Puisque les pentes de ces tributaires sont en général assez fortes, il est probable qu'une restauration passive suffise, sans intervention directe pour recréer un parcours sinueux. Cela impliquerait de cesser de stabiliser les berges, ce qui peut engendrer des économies, mais qui résulterait aussi en une érosion de berges durant les années de transition vers un retour à un état d'équilibre dans ces cours d'eau.

La solution **L6** concerne l'espace de liberté de la rivière Chaudière, et est suggérée par le comité expert. Cette solution rejoint toutefois aussi certaines recommandations du plan de protection du territoire face aux inondations récemment rendu public (Gouvernement du Québec, ministère des Affaires municipales et de l'Habitation, 2020). Cette solution implique de délocaliser les populations et les infrastructures situées en milieu inondable afin qu'elles se retrouvent hors de l'espace de liberté de la rivière. Il est à noter que dans le plan de protection du territoire face aux inondations, un budget de 75 M\$ est alloué au volet 4, soit la délocalisation. Ce volet est décrit ainsi : « Soutien à la relocalisation, en tout ou en partie, des secteurs jugés à risque élevé d'inondations afin de réduire l'exposition des personnes et des biens aux aléas d'inondations et de redonner aux cours d'eau leur espace de liberté » (p. 19). La cartographie approximative d'espace de liberté présentée de la Figure 30 à la Figure 36 procure un premier aperçu des secteurs où l'on pourrait prioriser des initiatives de délocalisation, mais une cartographie plus précise serait requise pour mettre en place cette solution.

La solution **L7** est l'une des solutions envisagées par Tecsalt (1993), et vise la construction de digues ou d'autres ouvrages d'immunisation contre les inondations. Selon Tecsalt, « le projet d'endiguement de Sainte-Marie aura des répercussions positives importantes pour de nombreux résidents de cette ville en leur assurant une protection absolue contre les dommages et les inconvénients reliés aux inondations

périodiques dont ils sont victimes. De plus, les terres agricoles situées dans la plaine inondable en amont de Sainte-Marie connaîtront une légère réduction des inondations d'été » (p. 4-5, rapport n. 2).

Tableau 2 : Solutions examinées par le CE pour les inondations par embâcle

ID	CAT	DESC	LOCALISATION	OBJECTIF VISÉ
E1	Estacades	Estacade sud	Beauceville, en amont des rapides du Diable	Former un couvert de glace rapidement pour réduire la formation de frasil en début d'hiver et ainsi abaisser la résistance mécanique du couvert de glace en aval des rapides lors de la débâcle
E2		Estacade nord	Beauceville, en aval des rapides du Diable	Former un couvert de glace rapidement pour réduire la formation de frasil en début d'hiver et ainsi abaisser la résistance mécanique du couvert de glace en aval de Beauceville lors de la débâcle Le deuxième objectif est de retenir le train de glace en amont de Beauceville le temps de lancer une alerte d'évacuation
E3	Affaiblissement	Affaiblissement du couvert de glace (aval Beauceville)	Beauceville, secteur du Rocher	Favoriser le départ de l'embâcle qui se forme dans le secteur du Rocher
E4		Affaiblissement du couvert de glace (au pont PK62 Beauceville)	Beauceville, secteur du pont au PK 62	Empêcher le train de glace de s'appuyer contre un couvert de glace solide et former un embâcle juste en amont de Beauceville
E5		Affaiblissement du couvert (Pont St-Georges)	Saint-Georges, au pont-route du PK-78,5	Faciliter le libre passage des glaces vers l'aval plutôt que de former un embâcle contre le couvert de glace pris dans les piliers.
E6	Augmentation des vitesses	Profilage du chenal par remblai (secteur rocher)	Beauceville, aval du rocher	Favoriser la débâcle hâtive en aval du rocher, avant la débâcle des secteurs amont.
E7		Canalisation des écoulements (amont rocher)	Beauceville, amont du rocher	Canaliser l'écoulement et favoriser l'évacuation des glaces
E8	Barrage réservoir	Barrage réservoir sur tributaires	Tributaires de la chaudière (Famine, du Loup, Drolet)	Rétention partielle de glace dans le tributaires et laminer les crues en amont de Beauceville

E9	Rétention des glaces	Rétention des glaces - léger (Famine / Chaudière / Bras-Victor)	Beauceville Amont de la ville de Beauceville	Réduire ou empêcher la mobilisation du couvert de glace depuis les tributaires vers Beauceville et en aval de Beauceville
E10		Barrage de rétention de glace à Beauceville	Amont de Beauceville	Retenir les glaces en amont de Beauceville et empêcher leur propagation vers l'aval.
E11	Désobstruction	Dragage embouchure tribulaire (St-Georges à St-Joseph)	Tronçon St-Joseph - Beauceville - Notre-Dame des Pins	Permettre la libre circulation des glaces lors de la débâcle
E12		Dynamitage affleurement rocheux (du Rocher Pavage de Beauce)	Beauceville	Permettre la libre circulation des glaces lors de la débâcle
E13		Nettoyage des rives pour libre circulation (secteur aval Rocher)	Tronçon St-Joseph - Beauceville - Notre-Dame des Pins	Réduire la stagnation des glaces causée par la végétation riveraine et sur la plaine alluviale.
E14		Retrait des vestiges de batardeaux	Saint-Georges, île en aval du pont au PK-76,5 et en aval de Beauceville, près de PK-59	Retrait des batardeaux qui empêchent le passage de l'eau et des glaces
E15	Délocalisation	Délocalisation du centre-ville de Beauceville	Beauceville, Centre-Ville	Réduire la vulnérabilité des populations et infrastructures aux inondations.

La solution **E1**-Estacade sud : l'équipe de l'Université Laval (professeur Brian Morse) a mesuré des épaisseurs de frasil de 4-5m sous le couvert de glace en aval des Rapides du Diable. Ces accumulations de frasil augmentent l'inertie et la résistance du couvert de glace en aval des rapides. L'arrivée d'un train de glace durant la débâcle s'appuie contre un couvert de glace en amont de Beauceville qui est renforcé par l'accumulation de frasil, ce qui permet de former un embâcle résistant qui peut accumuler un volume d'eau élevé avant de céder. L'installation de l'estacade sud en amont des Rapides du Diable a donc pour fonction de former hâtivement un couvert de glace entre les rapides et Notre-Dame-des-Pins afin de réduire la formation des volumes de frasil en début d'hiver. La réduction des volumes de frasil générés entre Beauceville et Notre-Dame-des-Pins conduirait à abaisser la résistance mécanique du couvert de glace en aval des rapides lors de la débâcle. L'embâcle qui se formerait en amont de Beauceville serait donc moins résistant et emmagasinerait moins d'eau avant de céder. Cette estacade déjà en fonction doit être retirée après la formation du couvert de glace car elle ne doit pas freiner le train de glace arrivant de l'amont au printemps.

La solution **E2**-Estacade nord : similairement à l'Estacade sud, et aussi proposée par l'équipe de l'Université Laval, celle-ci a pour objectif de former un couvert de glace hâtivement, mais en aval des Rapides du Diable. La formation d'un couvert de glace dans cette section de la rivière réduirait la génération et le transport de frasil vers le tronçon en aval de Beauceville dans le secteur du Rocher. La réduction des volumes de frasil accumulés sous le couvert de glace dans ce secteur faciliterait l'évacuation des glaces en aval de Beauceville à la débâcle plutôt que la formation d'embâcles résistants qui pourraient inonder Beauceville par refoulement. De plus, cette estacade ne sera pas retirée après la prise des glaces car elle a également pour fonction de retenir le train de glace venant de l'amont pour quelques heures, le temps de lancer une alerte d'évacuation pour la ville de Beauceville.

La solution **E3**- Affaiblissement du couvert de glace en aval de Beauceville : cette solution, proposée par le groupe de travail sur les mesures d'intervention en 1992, consiste à utiliser une pelle mécanique, une grenouille ou un véhicule spécial muni d'une scie pour casser le couvert de glace en aval de Beauceville pour favoriser la débâcle du tronçon en aval de Beauceville avant l'arrivée du train de glace provenant de l'amont. Si ce tronçon a effectivement débâclé complètement ou partiellement avant l'arrivée du train de glace, ce dernier ne pourra pas s'appuyer contre un couvert de glace solide pour former un embâcle résistant pouvant inonder la ville de Beauceville par refoulement.

La solution **E4**- Affaiblissement du couvert de glace au pont du PK62 Beauceville: cette solution provient aussi du groupe de travail sur les mesures d'intervention en 1992 et consiste à casser la glace en amont de l'île avec une pelle mécanique, puis retirer la glace morcelée et affaiblir le couvert de glace dans les bras avec le véhicule spécial muni d'une scie. Le bris du couvert de glace en face du centre-ville de Beauceville empêchera le train de glace provenant de l'amont de s'appuyer contre un couvert de glace solide au printemps pour former un embâcle résistant qui pourrait emmagasiner beaucoup d'eau en amont de Beauceville avant de céder.

La solution **E5**- Affaiblissement du couvert au Pont de Saint-Georges : cette solution, aussi proposée par le groupe de travail sur les mesures d'intervention en 1992, consiste à utiliser une grue équipée d'un poids opérée à partir du pont pour casser le couvert de rive sur 50 m en amont et 50 m en aval du pont. Cette

intervention permet de faciliter le libre passage vers l'aval des glaces provenant du tronçon entre le pont et le barrage Sartigan plutôt que de former un embâcle contre le couvert de glace pris dans les piliers du pont.

La solution **E6**- Profilage du chenal par remblai dans le secteur du Rocher : cette solution est proposée par TecSult (1993) dans le rapport n. 3 (p 3-13, p 5-2). Elle consiste à remblayer des sections surcreusées par les activités d'exploitation du gravier pour augmenter les vitesses de l'écoulement en aval de Beauceville. L'augmentation des vitesses favoriserait la débâcle du tronçon en aval de Beauceville avant l'arrivée du train de glace provenant de l'amont. Si ce tronçon a effectivement débâclé complètement ou partiellement avant l'arrivée du train de glace, ce dernier ne pourra pas s'appuyer contre un couvert de glace solide pour former un embâcle résistant pouvant inonder la ville de Beauceville par refoulement.

La solution **E7**- Canalisations des écoulements en amont du Rocher : cette solution est proposée par TecSult (1993) dans le rapport n. 3 (p 5-2). Elle consiste à construire des digues de faible hauteur pour canaliser l'écoulement et favoriser l'évacuation efficace des glaces entre le Rocher et Beauceville. Cette augmentation de la contenance permettrait d'éviter qu'une partie du débit "ne se perde sur la plaine inondable" favorisant ainsi la stagnation et/ou la stabilisation des embâcles dans ce secteur.

La solution **E8**- Barrage réservoir sur les tributaires (Famine, du Loup, Drolet) : cette solution est proposée par TecSult (1993) dans le rapport n. 3 (p 6-3). Elle consiste à retenir partiellement les glaces en amont de Beauceville de manière à diminuer les volumes de glace impliqués dans d'éventuels embâcles. La présence d'un réservoir en amont de Beauceville pourrait également laminier le débit lors de la débâcle, de manière à retarder la débâcle et l'évacuation des glaces sur l'ensemble du tronçon Sartigan-Beauceville. La débâcle aurait lieu plus tard au printemps lorsque la glace serait plus dégradée thermiquement et ne pourrait plus former d'embâcles.

La solution **E9**- Rétention des glaces par des ouvrages légers sur la Famine / Chaudière / Bras-Victor : cette solution est proposée par TecSult (1993) dans le rapport n. 3 (p 5-3) et par le comité expert. Cette solution était initialement envisagée dans les années 1990 par des ouvrages simples de rétention de la glace comme des îlots artificiels ou des excavations locales qui peuvent être considérés pour retarder le départ du couvert de glace dans les tributaires en amont de Beauceville. Un ouvrage de rétention plus élaboré, qui consiste en des piles en acier avec du béton coulé, espacées sur la largeur du cours d'eau, a été également proposé à la sortie du Bras-Victor. Ce type d'ouvrage a été testé avec succès sur des petits cours d'eau dans le Nord des États-Unis. Ce type d'ouvrage nécessitant des travaux en rivière de faible envergure (pour planter les piles en acier et couler le béton) pourrait être installé :

- 1- à la sortie du Bras-Victor pour empêcher les glaces de ce tributaire de se retrouver dans la rivière Chaudière. L'absence d'un bouchon de glace à la sortie de ce tributaire favoriserait la débâcle du tronçon en aval de Beauceville avant l'arrivée du train de glace provenant de l'amont;
- 2- sur les deux bras de la rivière Chaudière dans le bassin Bégin situé en amont de Notre-Dame-des-Pins. Le train de glace provenant du tronçon ayant débâclé entre Saint-Georges et Notre-Dame-des-Pins pourra former des embâcles sur les deux bras inondant ainsi le bassin qui fait partie de

la plaine inondable. Les glaçons pourront également s'échouer sur l'île entre les deux bras pour former un grand espace de stockage de glace.

- 3- à la sortie de la rivière Famine pour empêcher les glaces de ce tributaire de se retrouver dans la rivière Chaudière et s'ajouter au train de glace qui descend de Saint-Georges vers Beauceville. Le secteur situé à plus de 3 km en amont de l'embouchure de la rivière Famine dans la rivière Chaudière est une vallée encaissée, très boisée et sans habitations. Si l'ouvrage de rétention est particulièrement résistant à la poussée des glaces, la formation d'un embâcle dans ce secteur conduirait à la formation d'un réservoir sur deux kilomètres pouvant laminer les apports de la rivière Famine à la débâcle et plus tard à la crue.

La solution **E10**-Barrage de rétention de glace en amont de Beauceville : cette solution est proposée par Tecslut (1993); elle consiste en un ouvrage majeur de rétention des glaces similaire au barrage Sartigan mais construit en amont de Beauceville pour arrêter le train de glace provenant de l'amont à une section située entre la ville de Beauceville et le pied des Rapides du Diable. D'une part, l'embâcle qui se forme actuellement à cette section ne pourra plus céder et inonder la ville. D'autre part, les embâcles ne pourront plus se former dans le secteur du Rocher car le train de glace ne pourra plus se rendre en aval de Beauceville, éliminant ainsi le risque d'inondation par refoulement. Comme le barrage serait situé en aval des rapides, une partie du volume de stockage de glace sera occupée par du frasil.

La solution **E11**-Dragage des embouchures des tributaires de Saint-Georges à St-Joseph : la solution, proposée par les municipalités, consiste à excaver les accumulations de sédiments aux embouchures des tributaires pour empêcher que ces accumulations initient des embâcles aux embouchures. Cette solution est aussi considérée pour les inondations en eau libre (solution L2).

La solution **E12**-Dynamitage de l'affleurement rocheux en aval de Beauceville (en face de Pavage de Beauce) : la solution, aussi proposée par les municipalités, consiste à écrêter l'affleurement rocheux pour empêcher qu'il initie des embâcles en aval de Beauceville pouvant inonder la ville par refoulement.

La solution **E13**- Nettoyage des rives dans le tronçon en aval du secteur du Rocher : la solution, proposée par Tecslut (1993), consiste à libérer les berges de toute obstruction (bourrelets, remparts artificiels, végétation) contribuant à intercepter la glace en mouvement dans le chenal. Ces obstacles ont pour effet de ralentir la progression de la débâcle et de favoriser la stagnation des glaces dans ce secteur.

La solution **E14**-Retrait des vestiges de batardeau : cette solution est proposée par le groupe de travail sur les mesures d'intervention de 1992. Elle consiste à utiliser une pelle mécanique à partir de la rive pour excaver les vestiges d'anciens batardeaux et l'évacuation des matériaux par camion. Ces obstacles ont pour effet de ralentir la progression de la débâcle et de favoriser la stagnation des glaces en amont des batardeaux. Les deux batardeaux clairement identifiés par le comité sont : le batardeau reliant la rive ouest à l'île en aval du pont au PK-76,5 à Saint-Georges et un batardeau en aval de Beauceville (près de PK59). Toutefois, si d'autres batardeaux supplémentaires existent sur le lit de la rivière, ceux-ci devraient être également retirés.

La solution **E15**- Délocalisation du centre-ville de Beauceville : cette solution est proposée par le comité expert et consiste à délocaliser les habitations et les infrastructures du centre-ville de Beauceville qui sont

vulnérables aux inondations par embâcles. Les limites de la zone à délocaliser peuvent être déterminés à partir des images aériennes de l'inondation du 16 avril 2019. Cette solution s'apparente à celle d'espace de liberté suggérée en eau libre (solution L6), mais cible uniquement le secteur de Beauceville.

10 Analyse multicritère du caractère porteur des solutions

Le caractère « porteur » des solutions possibles a été évalué à partir d'une grille d'analyse fondée sur quatre critères, tous sélectionnés en accord avec les principes dont s'est doté le comité (voir section 3). De manière concertée entre les membres du Comité expert, toutes les solutions retenues ont été évaluées semi-quantitativement, une à une, sur une échelle de 0 (faible) à 10 (fort), en se basant sur la littérature scientifique disponible, les travaux de modélisation hydraulique, les cartes disponibles et les discussions tenues en séance avec les autorités municipales. Cette évaluation semi-quantitative avait comme principal avantage de pouvoir comparer de manière relative toutes les solutions entre elles et ce, indépendamment du fait que certaines solutions sont explorées très en détail dans certains documents, alors que d'autres solutions sont présentées à titre exploratoire. Par contre, cette approche demeure une évaluation semi-quantitative qui reflète les meilleures connaissances du comité au moment d'écrire ce rapport. Bien que l'attribution des valeurs aux différentes solutions / critères revête un caractère relatif (i.e. les solutions sont notées de manière relative les unes par rapport aux autres), le comité ne prétend pas qu'elle se substitue à une étude poussée des coûts et avantages qui, elle, livrerait des pondérations absolues. En ce sens, cette analyse multicritère représente avant toutes choses une synthèse des connaissances et des réflexions du comité expert en lien avec les solutions explorées, en plus d'une réelle estimation quantitative (et donc en valeur absolue) de leurs effets et conséquences sur l'environnement.

10.1 Critères retenus par le comité

Les critères retenus par le Comité expert sont les suivants [nom codé | critère à maximiser ou minimiser]:

- 1- **L'efficacité de la solution en termes de réduction du risque (diminution de l'aléa hydraulique et de la vulnérabilité des populations et des infrastructures) [RED_RISQUE | critère à maximiser].**
Les solutions explorées peuvent avoir deux effets sur le risque d'inondation. D'abord, certaines mesures peuvent être efficaces d'un point de vue hydraulique, c'est-à-dire que leur mise en place se traduit par une baisse significative de la hauteur d'eau atteinte par des événements dont la probabilité d'occurrence est comparable (e.g. la crue centenaire). C'est le cas des solutions de dragage du lit, notamment. L'efficacité hydraulique est parfois estimée quantitativement par des travaux de modélisation hydraulique, mais elle peut également être déduite de manière approximative et relative à partir des connaissances du fonctionnement du système fluvial en question, notamment en se basant sur les études réalisées dans d'autres systèmes encore sur l'analyse cartographique et la connaissance de la dynamique fluviale. Toutes les solutions explorées ne sont pas forcément égales à cet égard; certaines font l'objet d'une investigation très détaillée de l'efficacité hydraulique alors que d'autres n'ont été que très peu documentées, ni sur la rivière Chaudière, ni ailleurs. Enfin, certaines solutions ont pour effet de réduire la vulnérabilité, c'est-à-dire qu'elles font en sorte de réduire les effets négatifs des inondations majeures sur les organisations, communautés et des infrastructures. C'est le cas notamment des solutions d'endiguement ou d'immunisation des propriétés, lesquelles n'ont aucune influence sur l'hydraulique, mais contribuent néanmoins à réduire la vulnérabilité. Ultiment, puisque à la fois l'efficacité hydraulique et les effets sur la réduction de la vulnérabilité vont tous les deux dans le même sens (i.e. réduisant le risque d'effets néfastes sur les populations), le Comité expert a choisi

de combiner ces deux volets en un seul facteur de réduction de risque. Il s'agit ici d'un critère à **maximiser**, c'est donc dire que toutes choses étant égales, on doit préférer les solutions qui ont la plus haute cote du point de vue de ce critère.

- 2- **Le coût de la solution proposée [COUT | critère à minimiser]**. Le coût en termes économiques associé à chaque mesure est considéré ici de manière semi-quantitative. Le comité expert prend en compte à la fois les coûts et les ressources à mobiliser de manière instantanée, i.e. au moment de la mise en place de la solution, mais aussi les coûts récurrents reliés à l'entretien à moyen / long terme des solutions étudiées. Bien sûr, le comité expert n'a pu réaliser, dans les délais prescrits, une étude détaillée des coûts réels associés à chaque solution, mais propose plutôt un ordonnancement raisonnable où chaque solution présentée se voit attribuer une cote qui reflète non pas les coûts réels, mais les coûts relatifs entre les mesures. Le comité expert cherche à **minimiser** ce critère, c'est-à-dire que toutes choses étant égales, on doit préférer les solutions qui ont la plus faible cote du point de vue de ce critère.
- 3- **L'impact environnemental de la solution proposée [IMPACT_ENV | critère à minimiser]**. De manière analogue au critère précédent, le comité expert a pris en compte l'impact environnemental relatif des solutions proposées, c'est-à-dire l'impact que peuvent avoir les solutions sur l'intégrité des écosystèmes fluviaux autant dans le chenal (lit mineur) que sur la plaine alluviale (lit majeur). Les perturbations considérées sont diverses et diffèrent considérablement d'une solution à une autre : perturbation du lien et des échanges amont-aval au sein des écosystèmes fluviaux, rupture de l'équilibre hydro-sédimentaire et hydro-écologique du chenal et des milieux alluviaux, endommagement des forêts et plus particulièrement des bandes riveraines sur les plaines alluviales, détérioration de la qualité de l'habitat physique pour le poisson, pollution et risque de contamination directe reliés à l'utilisation de la machinerie et aux interventions dans le système fluvial, etc. Encore une fois, les cotes attribuées par le comité expert sont relatives (i.e. elles permettent une comparaison semi-quantitative entre les solutions), et ne peuvent se substituer à des études environnementales complètes et exhaustives. Les cotes reliées à ce critère ont été attribuées en se basant sur 1) des études environnementales analogues publiées et 2) la connaissance a priori du comité expert sur ces enjeux. Enfin, sans surprises, le comité expert cherche à **minimiser** ce critère, c'est-à-dire que toutes choses étant égales, on doit préférer les solutions qui ont le plus faible impact environnemental.
- 4- **Le caractère acceptable de la solution [ACCEPT_SOC | critère à maximiser]**. Ce critère reflète de manière relative l'acceptabilité sociale des différentes solutions proposées. La cote attribuée par le comité expert prend en compte divers facteurs, comme par exemple, la nécessité, pour mettre en place une mesure, de délocaliser des résidents ou des infrastructures, la nécessité de changer la vocation d'un terrain, et passer, par exemple, d'un terrain agricole à un milieu inondable forestier entraînant notamment des pertes économiques, le caractère inesthétique des transformations du paysage de divers facteurs (e.g. endiguement ou immunisation de grande échelle). En accord avec ses principes, le comité expert prend également en compte l'opinion et la perception des élus municipaux et croit que cette dernière représente en quelque sorte l'opinion

plus large des citoyens riverains. Ce critère semi-quantitatif, encore une fois, ne se substitue pas à une enquête exhaustive de la perception des citoyens et de ce que ces derniers jugent comme étant une solution acceptable pour eux-mêmes et leur collectivité. Malgré cela, le comité juge qu'il peut néanmoins hiérarchiser / discriminer, de manière préliminaire, les solutions qui apparaissent plus acceptables, sur la base des informations disponibles. Pour cette raison, le comité expert cherche à **maximiser** ce critère, c'est-à-dire que toutes choses étant égales, on doit préférer les solutions qui apparaissent plus acceptables socialement.

10.2 Pondération des critères

Le Comité expert considère que les critères ci-haut énumérés n'ont pas tous la même importance. En cohérence avec le mandat et les principes auxquels le comité adhère, une pondération a donc été attribuée à chacun des critères. La somme des poids attribués pour l'ensemble des critères égale 1, et les mêmes pondérations ont été adoptées autant pour les inondations en eaux claires que pour les inondations par embâcle. Ainsi, le comité a attribué la pondération la plus importante (0,4) au premier critère [RED_RISQUE]. Il va sans dire que ce critère est primordial, le but ultime du comité étant d'examiner les solutions permettant de réduire le risque d'inondation sur la rivière Chaudière. Le second critère à considérer est l'impact environnemental [IMPACT_ENV] associé aux solutions, ce qui semble cohérent avec le fait que le comité ait été mandaté par le ministère de l'environnement. Ce critère s'est vu attribuer une pondération de 0,3. Les deux derniers critères ([COUT] et [ACCEPT_SOC]) ont été considérés, mais leur importance a été réduite par rapport aux deux premiers critères. Leur pondération est de 0,1 et 0,2, respectivement. Le comité expert reconnaît le caractère primordial de ces critères pour les organisations, communautés et décideurs, mais ne considère pas qu'ils doivent être pondérés de manière plus importante que les critères [RED_RISQUE] et [IMPACT_ENV] dans le présent travail.

10.3 L'algorithme PROMETHEE d'analyse multicritère et d'aide à la décision

L'algorithme PROMETHEE est utilisé ici afin d'identifier la solution, ou l'ensemble de solutions les plus porteuses en fonction des critères et des pondérations retenues par le comité expert. Nous résumons ici l'approche générale, mais le lecteur trouvera de plus amples détails dans les travaux originaux de Brans et Vincke (1986). Essentiellement, pour chaque critère, l'algorithme PROMETHEE compare deux à deux chacune des solutions en faisant la différence entre les cotes établies par le Comité expert. Ensuite, l'algorithme transforme, par l'intermédiaire d'une fonction préférence, chacune de ces différences en une valeur comprise en 0 et 1. Ici, la fonction choisie est la fonction linéaire, laquelle signifie que le degré de préférence (P) variera linéairement entre 0 et 1 en fonction de l'écart entre chacune des solutions. Enfin, pour un nombre n fini de solutions et un ensemble k de critères à partir desquels évaluer ces solutions, l'algorithme PROMETHEE calcule les trois paramètres suivants, en prenant en compte la pondération (w) attribuée à chaque critère :

$$\pi(solution_i, solution_n) = \frac{\sum_k P_k(solution_i, solution_n)}{\sum_k w_k}$$

$$\Phi^+(solution_n) = \sum_{\chi \in k} \pi(solution_n, \chi)$$

$$\Phi^{-}(solution_n) = \sum_{\chi \in k} \pi(\chi, solution_n)$$

Où π est un facteur indicateur de préférence pondéré entre la solution i et la solution n , Φ^{+} est le flux sortant et Φ^{-} le flux entrant. Le facteur π décrit le degré de préférence d'une solution par rapport à une autre en envisageant l'ensemble de tous les critères ainsi que leur pondération respective. Φ^{+} mesure le caractère surclassant des actions, soit l'intensité moyenne avec laquelle une action est préférée aux autres. Φ^{-} mesure le caractère surclassé des actions, soit l'intensité moyenne avec laquelle les autres actions sont préférées à une action. Dans la présente étude multicritère, les deux flux sont considérés à travers le score PROMETHEE II qui représente la différence entre les deux flux (sortant et entrant) :

$$\Phi(solution_n) = \Phi^{+}(solution_n) - \Phi^{-}(solution_n)$$

Plus Φ est élevé, plus la solution surclasse les autres solutions sur la base des critères et des pondérations utilisées.

10.4 Intégration de l'incertitude

Le comité expert considère qu'une incertitude existe sur les cotes (*scores*) qu'il a attribuées aux différentes solutions, pour chaque critère. Cette incertitude provient de différentes sources : du manque de connaissances scientifiques des effets ou des impacts associés à une solution, de divergences dans les résultats de modèles, de l'incertitude qui entoure les coûts ou encore le déploiement et la mise en place d'une solution sur le terrain, etc. Cette incertitude prend la forme d'une valeur que l'on ajoute ou soustrait à la cote attribuée pour chaque critère pour former un intervalle de cotes compris entre une borne inférieure (cote - incertitude) et une borne supérieure (cote + incertitude). Ainsi, à titre d'exemple, une solution qui se voit attribuer la cote 5 pour le critère [RED_RISQUE] peut aussi s'accompagner d'une incertitude de 3, signifiant que la cote pour ce critère est incertaine et peut en fait représenter n'importe quelle valeur comprise entre 2 et 8, si bien que la plage d'incertitude associée à la cote équivaut en réalité à $\{2 \leq cote \leq 8\}$. Afin de prendre en compte cette incertitude de manière systématique, une procédure d'échantillonnage itératif (1000 itérations) a été mise en place. Chaque cote associée à chaque critère s'est vu attribuer un intervalle d'incertitude défini par une loi uniforme dont les limites minimales et maximales correspondent aux bornes inférieures et supérieures associées à chacune des cotes. La loi uniforme signifie que le comité expert n'a aucune connaissance a priori de la manière dont se distribuent les cotes à l'intérieur de cet intervalle, et que, par conséquent, toutes les cotes qui s'y retrouvent sont équiprobables. À chacune des 1000 itérations successives, l'algorithme pige aléatoirement une valeur à l'intérieur des intervalles pour chaque solution, et pour chaque critère. À chaque itération, l'algorithme itératif calcul et stocke un nouveau score PROMETHEE II (Φ). Enfin, des graphiques en boîte à moustache (*boxplots*) permettent d'illustrer la distribution des Φ pour chaque solution étudiée.

10.5 Solutions en eau libre (tronçon Scott / St-Joseph)

Les solutions concernant les inondations en eau libre ont été évaluées sur la base des critères ci-haut mentionnés, c'est-à-dire l'efficacité en terme de réduction du risque d'inondation [RED_RISQUE], les coûts associés aux solutions [COUT], l'impact environnemental [IMPACT_ENV] le caractère acceptable

socialement des solutions [ACCEPT_SOC]. Les cotes attribuées pour chaque critère par le comité expert sont présentées graphiquement à la Figure 37, et décrites dans le texte ci-bas.

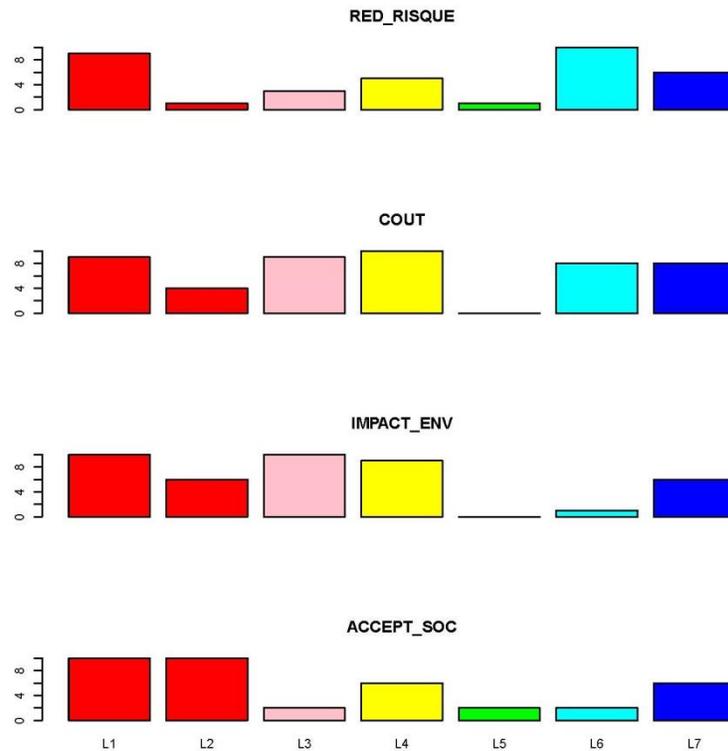


Figure 37 : Histogrammes représentant les valeurs sur une échelle de 0 à 10 pour chacun des critères pour les inondations en eau libre. Les couleurs des barres représentent les groupes de solution : rouge = dragage, rose = dérivation, jaune = rétention d'eau, vert = restauration des tributaires, cyan= espace de liberté et bleu = immunisation.

Solution L1 : Écrêtement du seuil à l'aval de Scott et excavation d'un canal entre Scott et Sainte-Marie

En se basant sur les travaux de modélisation hydraulique réalisés à partir du logiciel HEC-2 (Tecsult, 1993), la solution L1 abaisserait significativement les niveaux d'eau à Scott (1,78 m) et à Sainte-Marie (1,17 m) pour un débit équivalent à 2000 m³/s (crue centennale). Par conséquent le comité a attribué la cote 9 (±1) à cette solution pour le critère [RED_RISQUE]. Le coût associé à cette mesure est par ailleurs très élevé. En 1993, le coût de ces deux mesures était estimé à 53 500 000\$ soit l'équivalent de 83 500 000\$ en 2020, après ajustement pour l'inflation, ce qui ne comprend pas les taxes, les achats de terrain, les frais juridiques, de transport des marchandises, les frais de décontamination, les ouvrages de protection des berges, les différentes servitudes, honoraires variés, etc. À ces dépenses s'ajoutent les frais récurrents associés à l'entretien de ce nouveau chenal surcreusé, de manière à prévenir un éventuel comblement sédimentaire. En raison du caractère onéreux de cette solution, le comité a attribué la cote 9 (±2) au critère [COUT].

Toujours selon Tecsult (1993), les impacts environnementaux à prévoir sont également très importants tant sur le lit et les écosystèmes actuels que sur le nouveau lit de la rivière Chaudière, après

excavation. Le nombre très élevé de voyage de camions requis pour transporter les 3,38 millions de mètres cubes est aussi à considérer. Le rapport fait état de pertes potentielles au niveau des sites de fraie et de la végétation riveraine qui pourraient être considérables par rapport à d'autres solutions. Le comité a donc attribué la cote de 10 (± 1) pour le critère [IMPACT_ENV]. Enfin, l'acceptabilité sociale de cette solution semble relativement bonne, de moins selon ce que le comité expert a compris des échanges avec les élus lors de la rencontre du 19 février, en raison notamment de l'efficacité hydraulique à l'échelle locale et du caractère tangible de l'action. Le comité a donc attribué la cote 10 (± 1) pour le critère [ACCEPT_SOC].

Solution L2 : Dragage à l'embouchure des tributaires.

Il n'existe aucun travail de modélisation à jour qui permet d'affirmer que les accumulations sédimentaires à l'exutoire des tributaires contribuent de manière directe à l'aggravation des inondations en eau libre dans le secteur Scott – Sainte-Marie. Les simulations LISFLOOD-FP, décrites à la section 8.4, pour simuler un dragage local à l'embouchure des rivières Nadeau-Lessard, n'indiquent qu'un effet très limité sur les niveaux d'eau, avec uniquement une réduction des surfaces inondées en amont de l'accumulation sédimentaire. Ces accumulations sédimentaires sont ponctuelles, et leur interaction avec l'écoulement en temps de crue apparaît négligeable. En effet, les niveaux atteints par les crues problématiques (e.g. niveaux d'eau dépassant la crue de 20 ans) surpassent de manière significative le niveau auquel ces bancs d'accumulation interagissent sur le plan hydraulique. Le comité expert est d'avis que le retrait de ces accumulations sédimentaires du chenal principal n'aurait que peu d'effet sensible sur les niveaux d'eau lors des inondations. Pour cette raison, le comité expert a attribué la cote 1 (± 1) au critère [RED_RISQUE]. Puisque le dragage serait toutes proportions gardées de moindre envergure que celui exposé à la solution précédente (L1), il serait par conséquent moins coûteux et potentiellement moins dommageable sur le plan environnemental. Pour cette raison, les critères [COUT] et [IMPACT_ENV] ont reçu la cote 4 (± 2) et 6 (± 1), respectivement. Puisque cette solution a été évoquée de manière unanime par les différents élus rencontrés par le comité expert, il convient d'attribuer la note la plus forte au critère [ACCEPT_SOC] (10 ± 1).

Solution L3 : Dérivation

L'évacuation d'un débit pouvant atteindre 1600 m³/s lors des crues de récurrence 20 ans ou même 100 ans diminuerait considérablement le débit à évacuer dans le chenal principal et réduirait conséquemment le risque d'inondation à Scott. Bien que des travaux de modélisation hydraulique soient nécessaires pour confirmer l'effet précis de cette dérivation lors des inondations, le comité peut désormais affirmer que l'efficacité hydraulique serait similaire à celle d'un écrêtement du seuil à l'aval de Scott (solution décrite comme la variante 1 dans le rapport no. 2 de TecSult (1993), mais moins efficace que la solution L1 qui combine l'écrêtement au dragage sur une dizaine de kilomètres entre Scott et Sainte-Marie. Pour cette raison, cette solution s'est vu attribuer la cote 3 (± 2) pour le critère [RED_RISQUE]. L'efficacité hydraulique de cette solution se limiterait d'ailleurs à un affaiblissement des niveaux d'inondation à Scott mais pas un abaissement significatif à Sainte-Marie. Vu les dimensions importantes et les aspects techniques liés à cet ouvrage, les coûts et l'impact environnemental seraient bien évidemment très élevés, bien que non quantifiés actuellement. Le comité a donc attribué la cote 9 (± 3) et 10 (± 2) pour les critères [COUT] et

[IMPACT_ENV]. L'acceptabilité sociale d'un tel ouvrage serait probablement assez faible; il faudrait délocaliser certains agriculteurs et transformer les champs en rive ouest pour accommoder le passage du canal. Pour cette raison, le critère [ACCEPT_SOC] s'est vu attribuer la cote 2 (± 2).

Solution L4 : Rétention d'eau dans les tributaires

D'après la modélisation réalisée par Tecsalt (1993), l'efficacité hydraulique des ouvrages de rétention varierait entre les municipalités. La crue centennale serait réduite d'environ 0,6m à Scott et de 1,25m à Saint-Joseph. Le comité expert a par conséquent attribué la cote 5(± 2) pour le critère [RED_RISQUE]. Ces ouvrages sont par contre onéreux. Tecsalt (1993) avait estimé que les coûts associés à ces ouvrages avoisineraient 75 950 000\$ en 1993, soit près de 120 000 000\$ aujourd'hui. Cette somme explique la cote 10 (± 2) attribuée par le comité expert au critère [COUT]. L'impact environnemental pourrait, par contre, être moindre que pour d'autres solutions, selon la position des réservoirs et l'étendue des zones inondées. Tecsalt (1993) indique que l'impact environnemental de la mise en place de réservoirs sur les grands tributaires est considérée faible, tant sur le milieu humain que sur le milieu biophysique pour les réservoirs Nebnellis, Plamondon et Linière où les zones inondées seraient modestes. Cela dit, cet impact a été évalué dans les années 1990 en considérant uniquement les effets locaux liés à la mise en eau. Aujourd'hui, l'évaluation des impacts tend à prendre davantage en considération les effets de rupture du continuum écologique fluvial qu'entraînent de tels ouvrages. Les impacts seraient par contre supérieurs pour le réservoir Morissette. Considérant cela, le comité expert a attribué la cote 9 (± 2) pour le critère [IMPACT_ENV]. Malgré que l'implantation d'un réservoir représente une importante transformation du paysage, les nouvelles opportunités potentiellement créées par ces ouvrages multi-fonctionnels se traduisent par une cote relativement élevée (6 ± 2) sur le plan de l'acceptabilité sociale [ACCEPT_SOC].

Solution L5. Restauration des tributaires.

L'efficacité de cette mesure est *a priori* assez modeste, bien que de plus amples travaux de modélisation hydraulique puissent valider son efficacité sur de grandes échelles. Pour l'instant, le comité attribue la cote 1(± 2) au critère [RED_RISQUE]. Par contre, il s'agit d'une mesure relativement économique (voire à coût nul), puisque les propriétaires des terrains traversés par les cours d'eau n'ont qu'à laisser les cours d'eau retrouver leur état et leur sinuosité naturelle. Le critère [COUT] a donc été fixé à 0 ± 0 . L'impact environnemental est également minime (0 ± 1), pour les mêmes raisons. Enfin, l'acceptabilité sociale de cette mesure pourrait être plus difficile dans le cas où le parcours sinueux viendrait menacer la tenue d'autres activités le long des tributaires (activités forestières, agricoles, résidences, etc). Mais le comité assume que ces interférences sont mineures et ponctuelles. C'est pourquoi la cote 2(± 2) a été attribuée au critère [ACCEPT_SOC].

Solution L6. Délocalisation - Espace de liberté

Contrairement aux autres solutions, celle-ci n'a aucun effet hydraulique. Elle vise plutôt à réduire la vulnérabilité des populations et des infrastructures en délocalisant celles qui sont les plus exposées aux inondations puisque situées en milieu inondable. Pour être effective, cette mesure doit être basée sur une délimitation précise et à jour de l'espace d'inondabilité prenant en compte le climat actuel et futur.

Sur cette base, le comité a attribué la cote $10(\pm 2)$ au critère [RED_RISQUE], puisqu'une fois les espaces inondables libérés, le potentiel de dommage s'amenuise considérablement, et ce de façon pérenne. Par contre, cette solution s'accompagne d'un coût important associé à la délocalisation (cote = 8 ± 2) des infrastructures les plus vulnérables / exposées, et potentiellement le réaménagement des espaces inondables laissés vacants. L'acceptabilité sociale d'une telle mesure est probablement assez faible (cote de 2 ± 2) à cause de l'attachement aux propriétés, sentiment d'appartenance, patrimoine familial, municipal. Toutefois, la mise en place au printemps 2019 par le gouvernement du Québec d'un programme favorisant la délocalisation des résidences situées en zones à haut risque d'inondation a vraisemblablement permis d'accroître cette acceptabilité. C'est en tout cas ce qui ressort d'un sondage mené à l'automne 2019 par l'organisme de bassins versants des rivières Rouges, Petite Nation et Saumon (OBV-RPNS, 2019) où la grande majorité des répondants étaient unanimes quant aux bienfaits de la modification de l'aménagement du territoire et/ou de la réglementation, le rachat de terrains inondables par le gouvernement et la protection des milieux humides (qui font partie de l'espace de liberté). Enfin, l'impact environnemental de cette délocalisation est bien évidemment mineur (1 ± 1), outre les dommages engendrés par la délocalisation elle-même.

Solution L7. Endiguement

Cette solution est très efficace parce qu'elle contribue à réduire la vulnérabilité des populations et infrastructures par la construction d'ouvrages de protection (digues). Ces travaux n'ont aucun effet hydraulique, même qu'ils entraînent probablement une légère perte de charge qu'il faut corriger par de légers travaux d'excavation. Sur le plan du critère [RED_RISQUE], le comité attribue donc à cette mesure la cote 6 ± 2 . D'après l'estimation de Tecslult (1993), les coûts sont assez importants (15 300 000\$ en 1993, soit 24 000 000\$ en 2020), surtout s'il faut compenser les pertes de charge par des travaux d'excavation. L'impact environnemental associé à la construction des digues est modeste mais celui des excavations, même si elles sont plus légères que pour les solutions L1, est non nul. Le comité d'expert attribue donc la cote 2 ± 2 pour le critère [IMPACT_ENV]. Enfin, cette solution apparaît relativement acceptable puisque, bien qu'elle dégrade l'esthétique du paysage fluvial, elle permet le maintien des activités et accroît le sentiment de sécurité (cote = 6 ± 2). Il faut toutefois demeurer prudent avec des solutions d'endiguement car elles peuvent engendrer un faux sentiment de sécurité (Hutton et al., 2018). Par exemple, aux États-Unis, 33% des dommages liés aux inondations sont attribués à des brèches de digues ou à leur dépassement (Committee on Risk-Based Analysis for Flood Damage Reduction, 2000; Hutton et al., 2018).

Dans leur analyse de conception d'une digue à Sainte-Marie, Tecslult (1993 – rapport n. 2) indique : « Nous avons considéré une élévation constante de 147,3 m pour le calcul des quantités et des coûts des ouvrages, plutôt qu'une élévation variable, tel qu'utilisée [sic] antérieurement. » (p. 4-5). **Error! Reference source not found. Error! Reference source not found.** révèle toutefois que le niveau atteint 25 ans plus tard lors de l'inondation du printemps 2019 à Sainte-Marie était de 147,62 m, soit plus de 40 cm au-dessus du niveau prévu de cette digue. Tecslult mentionne que « la revanche de 0,30 m utilisée pour la conception des ouvrages est inférieure à la valeur minimale recommandée dans la littérature qui est de 0,60 m. L'utilisation de la revanche de 0,60 m occasionnerait une légère augmentation des quantités et des coûts pour les ouvrages (+/- 5%) » (p. 4-5). Mais même une revanche de 0,60 m, donc 30 cm plus

élevée que le niveau de 147,3 m, aurait vraisemblablement été dépassée en 2019. Cela illustre bien la difficulté de prévoir des ouvrages de ce type pour des événements qui ne sont encore jamais survenus. Comme on a pu le constater lors du bris de la digue à Ste-Marthe-sur-le-Lac en avril 2019, les risques pour la population dans ces cas sont décuplés puisque l'inondation survient alors en quelques minutes, ne laissant que très peu de temps aux citoyens pour se préparer ou évacuer leur domicile.

10.6 Solutions par embâcle de glace (tronçon Beauceville / Notre-Dame-des-Pins)

Comme pour le cas des inondations en eau libre, les cotes attribuées pour chaque critère par le comité expert sont présentées graphiquement à la Figure 38, et décrites dans le texte ci-bas.

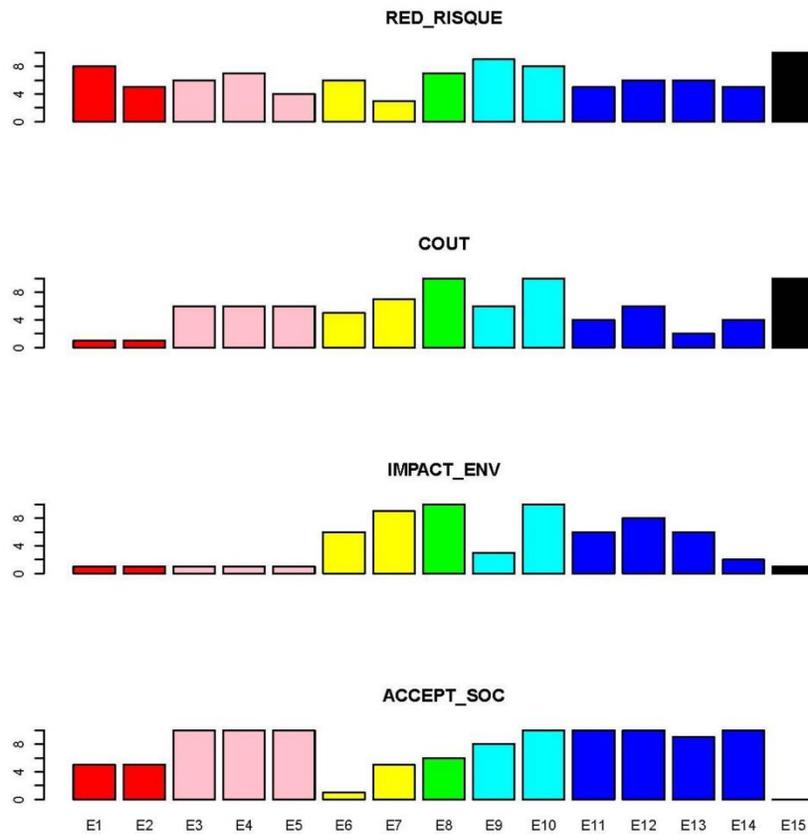


Figure 38 : Histogrammes représentant les valeurs sur une échelle de 0 à 10 pour chacun des critères pour les inondations par embâcle. Les couleurs correspondent aux groupes de solutions : rouge = estacades, rose = affaiblissement, jaune = augmentation des vitesses, vert = barrage réservoir, cyan = rétention des glaces, bleu= désobstruction, noir = délocalisation.

Solutions E1 et E2 : Estacades

Le comité expert est d'avis que la principale utilité des estacades sud (E1) et nord (E2) est de favoriser la fermeture hâtive du couvert de glace. En ce sens, la chance de succès de ces estacades est assez élevée comme en témoignent les travaux de Morse (2019) sur d'autres rivières, notamment la rivière Ste-Anne.

Par ailleurs, il apparaît primordial de fermer rapidement le couvert de glace en amont des rapides du Diable (E1) pour éviter la génération de frasil et les accumulations élevées à l'aval. Le comité expert doute davantage de la qualité d'une estacade flottante pour freiner la progression vers l'aval d'un train de glace (E2) aussi important que celui de la rivière Chaudière en débâcle, pendant ne serait-ce que quelques minutes / heures. En conséquence, la cote 8 ± 2 a été associée à la solution E1, et la cote 5 ± 3 a été attribuée à la solution E2, pour le critère [RED_RISQUE]. Au-delà de leur efficacité sur le plan de la réduction du risque, il s'agit de solutions qui ne sont pas réellement coûteuses, toutes proportions gardées, ni dommageables sur le plan environnemental. Les deux solutions se sont vu attribuer la cote 1 ± 0 pour le critère [COUT] et 1 ± 1 pour le critère [IMPACT_ENV]. Enfin, l'acceptabilité sociale de ces solutions apparaît modérée (cote= 5 ± 2), compte tenu du caractère expérimental de ces solutions et des impacts potentiels sur les niveaux d'eau, peu documentés, dans les municipalités avoisinantes.

Solutions E3-E5 : Travaux d'affaiblissement du couvert

L'efficacité des travaux d'affaiblissement en terme de réduction du risque varie légèrement selon le type et l'emplacement des solutions. Le comité expert considère que la solution la plus efficace [RED_RISQUE] (cote= 6 ± 2) est la solution E3 (Affaiblissement du couvert de glace en aval de Beauceville) puisque, sans la débâcle hâtive de ce tronçon problématique, les inondations par refoulement à Beauceville sont probables suite à la formation d'un embâcle dans le secteur du Rocher. La solution la moins efficace sur le plan de la réduction du risque est probablement E5 (cote= 4 ± 2), entre autres parce que le fait de briser et d'affaiblir le couvert en amont (secteur de St-Georges) réduira les accumulations locales au pont de Saint-Georges, mais précipitera la descente des glaçons vers les secteurs plus problématiques en aval (Beauceville, Notre-Dame-des-Pins). Sur le plan des critères [COUT], [IMPACT_ENV] et [ACCEPT_SOC], les solutions d'affaiblissement sont jugées comparables. Ce sont toutes des solutions passablement onéreuses, surtout en raison de la récurrence annuelle des travaux d'affaiblissements ([COUT] = 6 ± 2). L'impact environnemental est, quant à lui, assez faible puisque les travaux n'ont que peu d'impact sur le lit et les écosystèmes riverains, ([IMPACT_ENV] = 1 ± 2). L'acceptabilité de ces solutions d'affaiblissement est perçue comme assez bonne ([ACCEPT_SOC] = 10 ± 2), en raison du caractère proactif et récurrent des actions à prendre avant et pendant la débâcle.

Solutions E6-E7 : Augmentation des vitesses d'écoulement

Puisqu'une partie de la problématique associée aux embâcles dans le secteur de Beauceville / Notre-Dame-des-Pins provient des vitesses insuffisantes retardant la débâcle du tronçon en aval de Beauceville jusqu'à l'arrivée des glaçons provenant de l'amont, le comité entrevoit de manière favorable les solutions qui augmenteraient les vitesses d'écoulement. Pour le critère [RED_RISQUE], le comité expert attribue à la solution E6 une cote 6 ± 2 , essentiellement en raison du fait qu'elle viendrait corriger une anomalie dans le profil de vitesse causée par l'extraction des graviers fluviaux dans ce secteur. Quant à elle, la solution E7 s'est vu attribuer la cote 3 ± 3 puisque, bien qu'elle augmente les vitesses à haut débit, elle pourrait également engendrer d'autres effets collatéraux indésirables, notamment générer des obstructions au passage des glaces et favoriser la formation de ponts de glace. Ce sont toutes deux des solutions assez onéreuses ([COUT]= 5 ± 3 pour E6 et 7 ± 2 pour E7) qui demandent des travaux en rivière. Bien que ces deux solutions impliquent des interventions mécanisées importantes dans le lit de la rivière, le comité est d'avis

que le remblaiement des secteurs excavés au Rocher (E6) constitue un pas vers un retour à l'état « naturel » (pré-excavation) de la rivière (cote [IMPACT_ENV] = 6±2). Les travaux de canalisation (E7) vont par contre à l'inverse de cette tendance à la naturalisation des cours d'eau et l'impact environnemental beaucoup plus important de ces travaux (cote 9±2) est bien démontré dans d'autres systèmes. Enfin, le comité expert est bien conscient que l'acceptabilité sociale des travaux de remblaiement vont à l'encontre de la perception actuelle qu'ont les autorités du problème; il semble convenu dans plusieurs secteurs que le dragage, plutôt que le remblaiement, soit la solution indiquée. La cote [ACCEPT_SOC] pour E6 a donc été fixée à 1±1, soit très basse. Comparativement, la cote [ACCEPT_SOC] pour la solution E7 a été fixée à 5±2.

E8. Barrage réservoir sur les tributaires

Cette solution est efficace sur le plan de la réduction du risque d'embâcle, notamment parce qu'elle permet de jouer sur plusieurs fronts : laminage des débits de manière à retarder la débâcle et retenir les glaces des tributaires de manière à réduire les volumes arrivant dans les secteurs problématiques (e.g. Beauceville / Notre-Dame-des-Pins). Tecsub (1993), dans son rapport no 3, affirme que la pointe serait réduite de près du tiers (31,7%) à Saint-Georges, ce qui apparaît suffisant pour ralentir considérablement la progression vers l'aval du train de glace en débâcle dans le secteur Saint-Georges et Notre-Dame-des-Pins favorisant ainsi la dégradation thermique, ce qui réduirait conséquemment l'ampleur des problèmes à Beauceville. Cette solution mise néanmoins sur une capacité de « contrôle à distance », depuis l'amont, de la dynamique d'embâcle dans le secteur Beauceville / Notre-Dame-des-Pins, ce qui demande une lecture fine (et peut-être risquée) des interactions entre les volumes de glace, leur comportement sur la rivière, et l'impact hydraulique que peuvent avoir les pointes de crue sur le dynamique des glaces. Pour toutes ces raisons, la cote 7 a été attribuée au critère [RED_RISQUE] pour cette solution. Il s'agit bien évidemment d'une solution onéreuse ([COUT]=10±2) et pour laquelle les impacts environnementaux pendant et après la construction sont significatifs ([IMPACT_ENV] = 10±1), notamment parce qu'ils perturbent de manière sévère le continuum hydro-éco-sédimentaire si fondamental aux services écosystémiques rendus par les cours d'eau. Comme pour L4, l'acceptabilité sociale de ce genre de solution est moyenne, puisqu'elle s'accompagne d'importantes transformations au niveau du paysage, tout en offrant différents usages aux collectivités, par la suite ([ACCEPT_SOC] = 6±2).

E9 et E10. Rétention des glaces

Bien que les deux solutions aient pour objectif de retenir des volumes de glace en amont de Beauceville pour éviter la surcharge dans les secteurs problématiques, le comité estime qu'elles n'ont pas la même efficacité sur le plan de la réduction du risque. La solution E10 est efficace pour des raisons évidentes ; il s'agit d'une structure dont le principal analogue est le barrage de Sartigan (Saint-Georges), un ouvrage majeur de rétention des glaces dont l'efficacité est prouvée. En effet, depuis sa mise en fonction en 1967 ; le risque d'inondation par embâcle de glace à Saint-Georges a été, sauf quelques rares exceptions, considérablement réduit. Toutefois, le défaut d'une telle solution est l'incertitude du volume de stockage de glace puisque celle-ci se situe en aval d'un rapide générant du frasil et qu'une partie de la retenue sera occupée par ce frasil. Le comité a donc attribué la cote 8±2 pour le critère [RED_RISQUE]. Il s'agit encore un fois d'un ouvrage onéreux ([COUT] = 10±1). Tecsub avait d'ailleurs évalué le coût de cette construction

à 13 500 000\$ en 1993 (> 21 000 000\$ aujourd'hui) sans compter les frais afférents (servitudes, honoraires, dédommagements, immunisations, rachats de terrains, etc). L'impact environnemental de ces ouvrages est considérable, comme pour les solutions E8 d'ailleurs ([IMPACT_ENV] = 10±1). L'acceptabilité sociale doit par contre être assez forte car cette solution se compare au barrage Sartigan, une structure qui est perçue comme « efficace » par la majorité des parties prenantes ([ACCEPT_SOC] = 10±2).

La solution E9 propose pour sa part des ouvrages beaucoup plus modestes et légers répartis sur la Chaudière et dans différents tributaires. L'objectif est de retenir les glaces en amont et de former des embâcles dans des sites non-problématiques pouvant « absorber » ces volumes de glace tout en minimisant les dangers. Le comité est confiant qu'une telle approche, puisqu'elle intervient à la fois dans la Chaudière et dans les tributaires qui transportent un volume non négligeable de glaçons (ex. Famine, Bras Victor), a une très haute efficacité en terme de réduction du risque d'embâcle. La cote 9±3 a donc été attribuée à cette solution pour le critère [RES_RISQUE]. L'incertitude est élevée puisque l'efficacité de cette solution est inévaluée et pourrait être fonction de l'emplacement choisi pour installer ces structures légères de rétention des glaces. Le coût et l'impact environnemental sont par contre plus faibles que pour E10 ([COUT] = 6±3, [IMPACT_ENV] = 3±2), et l'acceptabilité sociale demeure élevée, étant donné que la dégradation du paysage fluvial est réduite en présence de structures plus légères et possiblement mieux intégrées au paysage ([ACCEPT_SOC] = 8±2).

E11 à E14. Solutions de désobstruction

Toutes ces mesures ont en commun de favoriser la libre circulation des glaces dans des secteurs où les différentes caractéristiques du paysage agissent possiblement comme des entraves à cette circulation, qu'il s'agisse d'obstacles sédimentaires situés à l'embouchure des tributaires (E11), d'affleurements rocheux dans le lit de la rivière (E12), de végétation riveraine (E13) ou encore de vestiges de batardeaux encore visibles dans la rivière (E14). Comparativement à d'autres mesures décrites plus haut, l'efficacité en terme de réduction du risque d'embâcle est non nulle, sans être toutefois très importante, en particulier si rien n'est fait en amont pour réduire les volumes de glace amenés par la rivière dans ces secteurs, contrôler les paramètres et le synchronisme de la crue ou encore affaiblir le couvert dans des secteurs stratégiques. Pour cette raison une cote de 5±3 (E11-E14) ou de 6±3 (E12-E13) a été attribuée au critère [RED_RISQUE]. Il est certain que ces solutions sont moins dispendieuses que d'autres solutions examinées par le comité ([COUT] ≤ 4) pour la plupart des solutions sauf peut-être E12 qui exige un dynamitage plus conséquent ([COUT] = 6±2). Par contre, ces solutions se distinguent sur le plan de l'impact environnemental. Le comité est d'avis que le fait de retirer les vestiges (E14) de batardeaux constitue en quelque sorte une solution bénéfique pour l'environnement fluvial ([IMPACT_ENV] = 2±2) alors que d'autres mesures comme E11, E12, ou même E13, occasionneraient d'importantes perturbations de l'hydro-écosystème fluvial ([IMPACT_ENV] ≥ 6). Le comité est d'avis que toutes ces solutions seraient perçues de manière positives par les collectivités, notamment parce qu'elles sont en concordance avec l'idée que la rivière Chaudière est parsemée d'obstacles et d'entraves naturelles et artificielles, empêchant la libre circulation des glaces ([ACCEPT_SOC] ≥ 9).

E15. Délocalisation du centre-ville de Beauceville

De manière analogue à la solution L6 pour les inondations en eau libre, la délocalisation hors de la zone inondable permet de réduire la vulnérabilité des populations et infrastructures exposées. Cependant, dans le cas particulier des inondations par embâcle à Beauceville, l'estimation de l'étendue de la zone inondable par embâcle (et des fréquences associées) est moins évidente que pour les secteurs inondés en eau libre. Pour ce faire, il faudra donc se rabattre sur des crues historiques ayant généré des dommages significatifs, par exemple les crues de 1991 ou encore de 2019, pour ne nommer que les plus récentes, pour définir une zone inondable « probable ». Cela dit, une fois les habitations et infrastructures délogées, la réduction de la vulnérabilité ne peut être que très apparente, et c'est pourquoi le comité attribue une cote de 10 ± 2 au critère [RED_RISQUE]. À la différence des autres secteurs de la rivière Chaudière, il faut néanmoins se rappeler que c'est le centre-ville de Beauceville qui est le plus durement touché par les inondations. Délocaliser ce secteur serait évidemment bien coûteux ([COUT] = 10 ± 3) d'autant plus que l'incertitude sur les secteurs, infrastructures et habitations à évacuer en raison de la cartographie imprécise de l'aléa inondation dans un contexte d'embâcle pourrait influencer positivement ou négativement le coût des délocalisations. À titre d'exemple, s'il y a 200 habitations à délocaliser et que le prix moyen de chaque délocalisation avoisine 150 000\$, alors le prix total pour la délocalisation est de 30 000 000\$. À ce prix, l'ajout (ou le retrait) de 50 maisons supplémentaires ajoute (ou retire) 7 500 000\$, ce qui est non négligeable. À noter que ces frais ne comptent pas le coût des infrastructures connexes : égouts, aqueducs, électricité, gaz etc. En revanche, redonner cet espace inondable à la rivière ne peut qu'être bénéfique sur le plan environnemental ([IMPACT_ENV] = 1 ± 2). Enfin, il va de soi que cette solution a une acceptabilité sociale très faible ([ACCEPT_SOC] = 0 ± 2) en raison des changements majeurs qu'elle entraînerait sur l'aménagement urbain de la ville de Beauceville.

11 Analyse du caractère porteur des solutions

La Figure 39 (eau libre) et la Figure 40 (embâcles de glace) présentent, sous forme de « boîtes à moustaches » (*boxplots*) les résultats du score PROMETHEE II (Φ) pour chaque solution examinée par le comité expert. Ces scores ont été établis à partir des cotes attribuées par le comité expert pour chaque critère retenu ([RED_RISQUE], [COUT], [IMPACT_ENV], [ACCEPT_SOC]), en intégrant l'incertitude associée à chacune de ces cotes et, enfin, en prenant en compte de manière explicite la pondération de chaque critère. Pour chaque solution examinée, la boîte à moustache représente les quantiles associés à la dispersion des scores Φ : la ligne transversale présente le score Φ médian, la boîte colorée contient 50% des scores Φ (intervalle de confiance à 50%), et les extrémités de la boîte contiennent 90% des scores Φ (intervalle de confiance à 90%). Sur la base de cette représentation, le comité a départagé les solutions en trois groupes : les solutions porteuses (les plus positives sur l'axe du score Φ), les solutions non-porteuses (les plus négatives sur l'axe du score Φ) et enfin les solutions dont le caractère porteur est mitigé (solutions pour lesquelles la distribution du Φ n'est pas significativement différente de 0). Des analyses de variance (ANOVA) jumelées à des tests de Tukey de comparaison de moyenne appuient le fait que le score Φ moyen de chaque groupe est significativement différent des autres, au seuil de significativité de 95%.

11.1 Résultats de l'analyse multicritère PROMETHEE des solutions aux inondations en eau libre

La Figure 39 présente les boîtes à moustaches pour les solutions en eau libre. Le comité est d'avis que deux groupes de solutions se distinguent comme étant porteuses : le groupe de solution à vocation environnementale incluant la solution L6 (espace de liberté) et le groupe incluant les solutions d'ingénierie L1 (excavation de seuil et dragage) et L7 (immunisation). Ce sont bien évidemment deux groupes de solutions extrêmement différentes à plusieurs égards. D'abord, le score Φ associé à ces deux solutions est élevé parce que ces deux groupes font bonne figure sur le critère [RED_RISQUE], le critère qui reçoit la pondération la plus élevée parmi l'ensemble des critères retenus par le comité expert. Le premier groupe solution (L6) ne joue pas sur les propriétés de l'aléa ni la hauteur des niveaux d'eau atteints en inondation, mais propose plutôt de réduire la vulnérabilité des populations et infrastructures en délocalisant les habitations et secteurs les plus exposés. Le second groupe (L1 et L7), quant à lui, présente un fort potentiel d'abaissement des niveaux d'eau dans les secteurs vulnérables, crédible et appuyé par une modélisation convaincante.

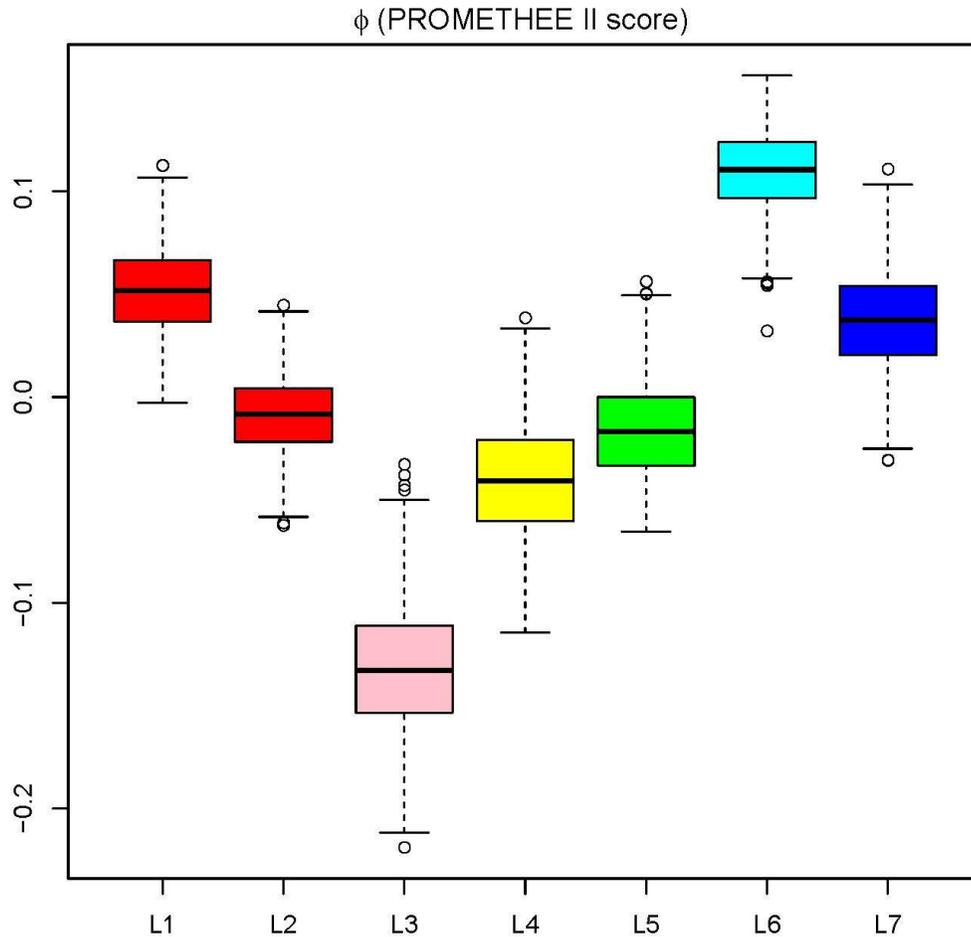


Figure 39 : Diagramme en « boîtes à moustaches » montrant les résultats du score PROMETHEE II (Φ) pour les inondations en eau libre. Les solutions L1 à L7 sont décrites dans le Tableau 1. Les couleurs correspondent à des groupes de solutions : rouge = dragage, rose = dérivation, jaune = rétention d'eau, vert = restauration des tributaires, cyan= espace de liberté et bleu = immunisation.

Sur la seule perspective du critère [RED_RISQUE], ces deux groupes de solutions soulignent le contraste, voire le fossé profond qui existe à l'heure actuelle entre les écoles de pensée en matière d'aménagement des cours d'eau et de lutte aux inondations (Biron et Thomas, 2019). La première, plus interventionniste, converge typiquement vers des solutions qui visent à contrôler les propriétés de l'aléa inondation, en s'appuyant sur la perception que les systèmes fluviaux, leurs crues et leurs inondations sont « domptables »; qu'il est possible de les contraindre ou de les réduire par des aménagements modifiant le caractère naturel des systèmes. Le dragage d'un lit de rivière sur une distance conséquente, comme ce que propose la solution L1, en dynamitant des seuils naturels et en surcreusant des lits de rivière pour les abaisser en deçà des niveaux d'ajustement naturels établis au fil des temps géologiques, témoigne bien de cette logique interventionniste. La solution L7 (immunisation par endiguement) dénaturerait considérablement le paysage, n'est pas souhaitable sur le plan environnemental, mais surtout, risque de créer un faux sentiment d'immunisation au sein de la communauté. Tout événement dont l'intensité excédera la hauteur des structures d'immunisation risque d'avoir des conséquences catastrophiques sur les habitations et infrastructures qui se croyaient protégées. L'autre solution (L6) est en opposition avec

cette vision interventionniste. Elle propose plutôt la non-intervention, la délocalisation de manière à laisser libre cours aux processus naturels engendrant les inondations, lesquels doivent se dérouler sans entraves anthropiques (Biron et al. 2014). Dans un cas comme dans l'autre, le comité expert ne souhaite pas opposer la première vision à la seconde, mais souligne que le groupe de solutions d'ingénierie L1 et L7 qui permettent de réduire significativement le risque d'inondation en eau libre a un impact environnemental très sévère, ce qui se traduit par un classement moins élevé que la solution à vocation environnementale L6.

Le comité rappelle que ce sont deux groupes de solutions porteuses sur le plan de la réduction du risque, mais également très onéreuses. La solution L1 est onéreuse d'une part parce que le coût initial du dragage / dynamitage sera très important, de même que le déplacement de plus de 3 millions de mètres cubes en camion qui pourrait même, d'après TecSult (1993), provoquer une usure plus marquée des routes, ce qui pourrait nécessiter leur réfection. De plus, l'entretien à long terme du nouveau chenal dans le contexte d'un bassin versant très productif en sédiment doit être pris en considération. En effet, il n'est pas déraisonnable de croire que ces structures surcreusées par rapport au niveau d'équilibre se combleront rapidement en sédiments, ce qui forcera l'élaboration d'un plan d'entretien dont les propriétés sont encore très incertaines. À cet égard, le comité souligne le manque flagrant d'information sur la dynamique sédimentaire du cours d'eau et sur l'évolution des formes du lit sur cette rivière; - informations qui seraient cruciales pour mieux prévoir la dynamique de comblement des sections draguées. Comme indiqué à la section 8, il est impératif de mettre en œuvre un plan d'acquisition détaillé et récurrent de données bathymétriques sur la rivière Chaudière. Il est à noter que les solutions de dragage avaient été analysées en détail en Angleterre suite à des inondations majeures (CIWEM, 2014). Ce rapport concluait que le dragage peut jouer un rôle important dans la gestion des risques d'inondation dans certains cas, mais n'est pas une solution autonome. Il doit être considéré dans le contexte d'une gamme d'outils et de l'origine des différentes sources d'eau de crue, et comporte des risques importants qui doivent être compris à l'échelle locale et à l'échelle du bassin versant. La solution L7 est également onéreuse à cause du coût de construction des digues et du dragage. Quant à elle, la solution L6 est onéreuse parce qu'elle implique la délocalisation d'un nombre conséquent d'habitations, servitudes et infrastructures, ce qui reçoit d'ailleurs aussi un niveau d'acceptabilité assez faible. Mais cette acceptabilité faible est compensée, dans l'analyse PROMETHEE, par le fait que la solution L6 est nettement plus bénéfique sur le plan environnemental que ne l'est la solution L1, pour des raisons évidentes. En fin de compte, le comité conclut que la décision entre une solution acceptable sur le plan environnemental (L6) versus une solution possiblement acceptable sur le plan social (L1) relève plutôt de la sphère politique et dépasse le mandat du comité expert. Toutefois, la solution L6 a l'avantage d'être pérenne, tandis qu'il est très probable que des opérations de dragage doivent être répétées sur une base régulière pour maintenir l'efficacité hydraulique de la solution L1. De plus, la solution L6 est bien alignée sur le plan de protection du territoire face aux inondations rendu public en avril 2020 par le Gouvernement du Québec. C'est donc cette solution que privilégie le Comité expert.

Alors que les solutions L1, L6 et L7 émergent par leur caractère porteur, d'autres solutions sont à écarter, notamment la solution L3 (dérivation en aval de Scott). Cette solution a un score Φ significativement inférieur à 0, parce qu'elle semble avoir une efficacité limitée en terme de réduction du risque,

notamment en raison du fait de sa portée qui est très locale (effet surtout ressenti à Scott, et pas en amont car la section de contrôle en aval de Scott se déplace entre Scott et Sainte-Marie). Par ailleurs, elle n'apparaît pas, à première vue, acceptable sur le plan social, et est associée à des impacts environnementaux considérables. Elle est aussi très onéreuse, en particulier par rapport aux bénéfices hydrauliques retirés. Cette solution n'est donc pas porteuse pour le tronçon Scott-Saint-Joseph, mais le comité souligne qu'en raison de son efficacité locale à Scott, elle pourrait être considérée comme une alternative à l'écrêtement du seuil (faisant partie de la solution L1). Toutefois, des modélisations hydrauliques plus poussées devront être produites, de concert avec des études coût-avantages mieux définies afin de préciser l'effet local de cette solution qui devra d'une manière ou d'une autre, être arrimée à d'autres solutions (comme L1 par exemple).

Enfin, le caractère porteur des autres solutions analysées par le comité expert (L2, L4, L5 et L7) apparaît mitigé. Bien que certaines de ces solutions aient une certaine efficacité sur le plan de la réduction du risque (ex. solution L7 – endiguement), le score Φ plus faible de ces mesures s'explique par différents facteurs. La solution L2 (dragage à l'exutoire des tributaires) n'aura que peu d'effet sur le comportement de la rivière en crue (voir ci-dessous). La solution L4 (rétention d'eau dans les tributaires) est très onéreuse, dommageable sur le plan environnemental, et correspond à une réduction du risque somme toute réduite par rapport aux solutions L1 et L6. La solution L5 (restauration des tributaires) est simple à mettre en œuvre, et permet en somme de restaurer des conditions naturelles plus « saines » dans le bassin versant, de contrer une tendance à la linéarisation et la dévégétalisation du parcours des tributaires. Le comité convient qu'elle s'inscrit parfaitement dans le cadre d'une démarche à long terme et constructive de restauration des dynamiques naturelles au sein du bassin versant de la rivière Chaudière, mais qu'elle n'aurait vraisemblablement, toutes choses étant égales, qu'un effet limité sur le problème d'inondation en eau libre dans le tronçon Scott-St-Joseph, lequel requiert une intervention à court terme.

En terminant, il convient de préciser la perception du comité sur la solution L2 (dragage à l'exutoire des tributaires) étant donné l'importance accordée à cette solution par les autorités municipales rencontrées. Même si elle reçoit une certaine acceptabilité de la part des autorités municipales – et que cette acceptabilité a été prise en compte dans l'analyse –, le comité n'est pas d'avis qu'il s'agit d'une solution porteuse pour toutes les raisons énumérées ci-haut. D'abord, le principal argument est que ce type de dragage concerne des structures ponctuelles du lit qui ont, en toute vraisemblance, très peu d'effet sur l'hydraulique et les niveaux atteints lors des inondations majeures. Cela avait par ailleurs aussi été noté dans l'étude de Bourdon (2013) sur la rivière de l'Anse Pleureuse en Gaspésie. D'autre part, le comité constate que la rivière Chaudière est depuis longtemps une rivière très active sur le plan sédimentaire, et cela est bien visible sur les photographies aériennes les plus anciennes (datant de 1935 – voir analyse en section 8). Il semble évident que les accumulations de sédiments à l'embouchure des tributaires ont de tout temps été présentes sur la rivière Chaudière, et cela s'explique aisément par la différence marquée entre la pente des tributaires et celle de la rivière dans le secteur des « eaux mortes ». Une partie de ces sédiments est vraisemblablement transportée vers l'aval lors des crues majeures. L'apparence d'un comblement rapide de la rivière par des sédiments provenant d'un tributaire traduit, toujours selon l'avis du comité, une dynamique d'érosion, transport et sédimentation qui est bel et bien active depuis au moins

85 ans dans ce cours d'eau dynamique et caractérisé par des tributaires pentus et fortement linéarisés, ce qui favorisent un transport sédimentaire accru. Malgré les efforts de recherche déployés, le comité expert n'a pu mettre la main sur une preuve inéluctable de comblement accéléré ou d'une aggradation atypique ou anormale du lit de la rivière au cours des dernières années. Le comité concède néanmoins que les données systématiques permettant le suivi à long-terme, notamment par la mesure récurrente de sections transversales judicieusement choisies, manquent cruellement dans ce bassin pourtant si problématique. Avec les nouvelles technologies de LiDAR bathymétrique, il serait même possible d'obtenir une couverture complète de la topographie du lit à un coût somme toute abordable en regard des enjeux liés aux inondations dans ce secteur. Seules ces données systématiques fourniraient réellement un portrait global de la dynamique sédimentaire dans ce cours d'eau, de son évolution dans le temps et l'espace, et permettraient de s'affranchir des perspectives locales et à court terme, qui ne reflètent pas la dynamique d'ensemble du système.

11.2 Résultats de l'analyse multicritère PROMETHEE des solutions aux inondations par embâcle de glace

Comme pour les inondations en eau libre, les résultats de l'analyse multicritère pour les 15 solutions examinées par le comité expert sont présentées sous la forme de boîtes à moustache illustrant les scores PROMETHEE II (Φ) et leur incertitude (Figure 40). Les solutions pour les inondations par embâcles sont, dans l'ensemble moins bien discriminées entre elles qu'elles ne le sont pour les inondations en eau libre. Ceci indique probablement que non pas une seule solution, mais un ensemble de solutions doit être considéré pour s'attaquer au problème des embâcles de glace dans le secteur de Beauceville / Notre-Dame-des-Pins.

D'après la dispersion des scores (Φ) à la Figure 40, aucune solution n'est statistiquement / significativement différente de « zéro », mais plusieurs solutions s'en rapprochent considérablement. C'est le cas notamment des solutions E1, E4, E9 et E15.

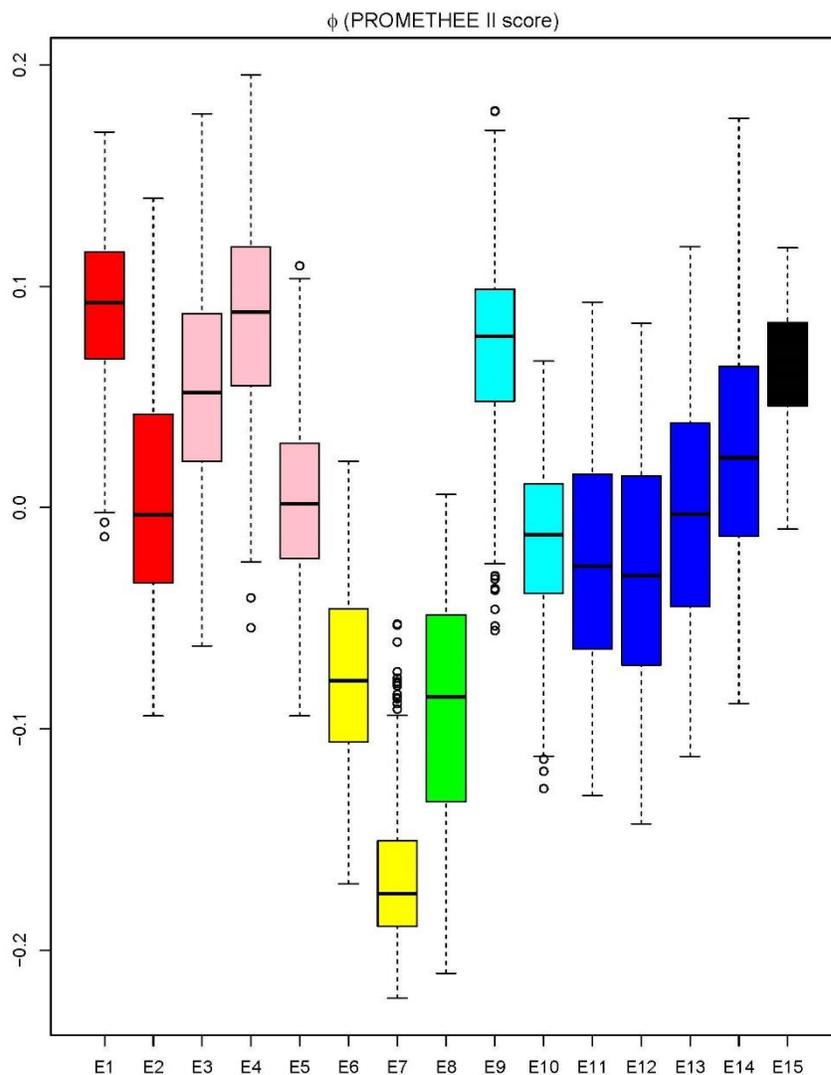


Figure 40 : Diagramme en « boîtes à moustaches » montrant les résultats du score PROMETHEE II (Φ) pour les inondations embâcle. Les solutions E1 à E14 sont décrites dans le Tableau 2. Rouge = estacades, rose = affaiblissement, jaune = augmentation des vitesses, vert = barrage réservoir, cyan = rétention des glaces, bleu = désobstruction, noir = délocalisation.

La solution E1 (Estacade sud) apparaît comme étant très porteuse, non pas parce qu'elle règlera à elle seule les problèmes d'embâcles, mais entre autres parce qu'elle a de bonnes chances d'engendrer les effets positifs que l'on attend d'elle (formation hâtive du couvert de glace en amont de Beauceville, réduisant les apports de frasil à Beauceville). Il s'agit d'une solution peu coûteuse, qui a peu d'impact environnemental comparativement à d'autres mesures plus invasives. Bien qu'il y ait eu par le passé une confusion apparente sur la manière et le moment optimal pour déployer cette solution sur le terrain, le comité expert croit qu'il importe de persister et d'éprouver davantage cette solution. Un effort concerté entre les autorités municipales et les scientifiques permettrait, grâce à cette solution, de réduire les apports en frasil dans ce secteur, ce qui aurait un effet bénéfique sur la formation d'embâcles moins résistants en amont de Beauceville, ceux-ci pouvant emmagasiner beaucoup d'eau avant de céder.

La solution E4 (affaiblissement du couvert de glace à Beauceville) fait partie d'un ensemble de solutions d'affaiblissement du couvert de glace (E3-E4-E5), lesquelles visent à fractionner, morceler et affaiblir le couvert de manière préventive. En terme de coûts, d'impact environnemental et d'acceptabilité sociale, ces trois solutions sont identiques, mais leur efficacité en terme de réduction du risque, elle, diffère. La solution E4 est la plus efficace car elle permettrait de faciliter, dans l'absence d'un couvert de glace résistant contre lequel peut s'appuyer un embâcle en amont de Beauceville, le déplacement du train de glace vers l'aval. La solution E3, quant à elle, aurait pour effet de réduire les obstructions dans le secteur du Rocher causées par la présence d'un couvert de glace résistant en aval de Beauceville, pouvant causer des inondations par refoulement, et de permettre une meilleure évacuation du train de glace provenant de l'amont. Le comité recommande que les deux solutions E3 et E4 soient réalisées conjointement, et conclut à l'effet que la solution E5 est, pour sa part de moindre efficacité par rapport aux deux autres car elle intervient sur un secteur moins problématique.

La solution E9 (rétention de glace dans les tributaires et sur la Chaudière) laisse présager une efficacité élevée pour réduire de manière significative les volumes de glace provenant de l'amont. Il s'agit d'une option moins onéreuse que la solution E10 (ouvrage majeur de rétention des glaces de type Sartigan) et qui affecte de manière moins drastique le paysage naturel et l'environnement que cette dernière solution. Son succès reposerait sur le choix de l'emplacement, des détails géométriques de ces structures légères de rétention des glaces et sur la manière d'harmoniser ces dernières au paysage naturel. Il est évident que le fait de diminuer le transit des volumes de glace sur la Chaudière et sur ses principaux tributaires (Famine, Bras-Victor) réduirait significativement la sévérité des embâcles formés plus en aval dans le secteur de Beauceville. Cela dit, il convient de mentionner qu'il existe une grande variété d'ouvrages légers, allant de la formation d'îlot artificiels, jusqu'à des piliers en acier ou même en béton. Des études plus approfondies seront nécessaires pour choisir les structures les plus efficaces à installer aux emplacements retenus.

Enfin, comme ce fut le cas pour les inondations en eau libre, la solution E15 (délocalisation dans la zone d'espace de liberté de Beauceville) présente un score Φ élevé. Cela est attribuable au fait qu'une fois les habitations et infrastructures enlevées de la zone inondable, la vulnérabilité et l'exposition à l'aléa baisse considérablement. Le comité est par ailleurs conscient que cette solution est très peu acceptable socialement. Toutefois, il s'agit d'une mesure bénéfique pour l'environnement, et c'est pour cela que la solution E15 doit être considérée. Le comité expert est aussi bien conscient que la problématique de la délocalisation des habitations et infrastructures à Beauceville ne se compare pas tout à fait à celle de la délocalisation des secteurs situés plus en aval, où les inondations en eau libre dominent. La délocalisation d'un centre-ville, comparativement à la délocalisation de quartiers résidentiels, n'est pas aussi simple autant sur les plans du patrimoine individuel que du patrimoine collectif. Il est à noter également que cette mesure doit reposer sur une estimation rigoureuse de ce qu'est la zone inondable en contexte d'embâcles en amont et en aval de la ville, et des probabilités et périodes de retour associées aux différents niveaux d'inondation. Le comité rappelle que l'analyse fréquentielle sous-jacente au calcul des cotes de crue associées à des périodes de retour communément utilisées (ex 20 ans, 100 ans) ne tient pas compte de la dynamique des glaces. Donc, vu les coûts associés et la faible acceptabilité sociale d'une telle mesure, tout effort de délocalisation à Beauceville devrait être appuyé par une modélisation à jour

de la dynamique des inondations en contexte d'embâcle, de manière à ne pas sous-évaluer ou sur-évaluer l'exposition des populations et infrastructures.

Il y a également quelques solutions à écarter, notamment les solutions E7 et E8 parce qu'elles ont un score Φ significativement inférieur à zéro. La solution E7 (canalisation des écoulements en amont du Rocher) propose la construction de digues de faible hauteur sur le tronçon en aval de Beauceville, lesquelles pourraient être efficaces localement, mais risqueraient également d'engendrer une perte de charge plus en amont, compliquant de manière indésirable l'évacuation des glaces dans d'autres secteurs. Cette solution est onéreuse, et moyennement efficace sur le plan de la réduction du risque, et par conséquent, il n'y a pas de réel avantage comparatif à mettre en place cette solution sur la rivière Chaudière. La solution E8 (barrage réservoir sur les tributaires) est davantage utile pour les inondations en eau libre que pour les inondations par embâcle. Le comité est d'avis que si elle était retenue comme solution pour lamener les débits en eau libre (solution L4), elle pourrait également jouer un rôle de rétention des glaces et de contrôle des débits visant à retarder la débâcle et ainsi favoriser la dégradation thermique de la glace. Cependant, le comité ne recommande pas cette mesure spécifiquement pour les embâcles, notamment en raison des coûts élevés et des impacts environnementaux considérables qu'une telle série d'ouvrages pourrait générer.

Enfin, les autres solutions examinées ont un rôle plus mitigé, bien qu'elles puissent être combinées à d'autres solutions jugées plus porteuses pour réduire les risques d'inondation par embâcle dans le secteur Sartigan / Beauceville. C'est le cas notamment des solutions visant à désobstruer le chenal et les berges de manière à réduire les obstacles et les possibilités d'ancrage des embâcles au lit de la rivière. La plus importante est bien sûr E14 (retrait des vestiges de batardeaux dans le lit). Même si le comité est d'avis que cette mesure à elle seule a une influence modérée sur le risque, elle peut contribuer à une amélioration globale de la circulation des glaces dans le secteur de Beauceville. Elle est par ailleurs assez bénéfique sur le plan environnemental puisqu'elle permet d'enlever des structures artificielles liées à l'exploitation du gravier. Il en est de même pour le massif rocheux situé en face de « Pavages de Beauce Ltée » (E12). Le comité convient que le retrait d'un massif rocheux pourrait faciliter la libre circulation des glaces, bien que les problèmes d'embâcles ne seront vraisemblablement pas éliminés par le simple dynamitage de ce rocher, d'autant plus que cet ouvrage aurait des conséquences néfastes sur l'environnement. Le dragage des accumulations sédimentaires à la sortie des tributaires (E11, aussi examiné en eau libre (L3)), de même que le nettoyage des rives (E13), sont deux solutions qui vont à l'encontre de la dynamique naturelle et des écosystèmes. La rivière Chaudière est un système dynamique où l'énergie dédiée au travail géomorphologique et à la mobilisation de la charge de fond provient des fortes pentes, et dans lequel les accumulations sédimentaires dans le chenal ont toujours été possibles et visibles (du moins aussi loin que 1935). Par ailleurs, l'altération des écosystèmes riverains par les différentes activités de « nettoyage » et le retrait d'obstacles végétaux (arbres morts ou vivants) serait un geste qui irait à l'encontre des mesures environnementales courantes visant à maintenir et favoriser les écosystèmes d'interface dans les corridors fluviaux.

12 Recommandations et conclusion

La rivière Chaudière est un système fluvial complexe, notoirement reconnu pour ses inondations en eau libre et par embâcle de glace. De nombreuses études ont été menées sur ce bassin versant, ce qui a permis d'alimenter les réflexions du comité expert. Compte tenu de l'ampleur des enjeux, des nombreuses interventions humaines ayant affectées la réponse hydraulique de la rivière aux précipitations et de l'impact possible des changements climatiques, il importe d'adopter une perspective holistique pour espérer trouver des solutions durables permettant de réduire les risques liés aux inondations en eau libre et par embâcle de glace.

Le mandat du comité expert était d'examiner un ensemble de solutions porteuses pour réduire le risque d'inondation sur le tronçon Scott-Sartigan (Saint-Georges). L'évaluation du caractère porteur des solutions s'est fait en accord avec différents principes dont s'est doté le comité pour avoir une lecture aussi objective et transparente que possible. Le comité a examiné les solutions porteuses en prenant en compte a) les processus naturels en cause et les modifications anthropiques qui ont transformé le bassin versant au cours du temps, b) les éléments de vulnérabilité du territoire, c) le savoir et l'expérience locale d) les effets négatifs que pourraient entraîner certaines solutions sur l'environnement et les communautés en amont et en aval et e) l'expertise existante et les bonnes pratiques courantes.

Le caractère « porteur » des solutions possibles a été évalué à partir d'une grille d'analyse fondée sur quatre critères, soit la réduction du risque, le coût, l'impact environnemental et l'acceptabilité sociale. De manière concertée entre les membres du Comité expert, toutes les solutions retenues ont été évaluées semi-quantitativement et le score de chacune des solutions a été calculé à partir de l'algorithme Prométhée.

À la lumière de ces analyses, le comité expert souhaite formuler les recommandations suivantes :

Inondations en eau libre

Concernant les inondations en eau libre sur le tronçon Scott / Saint-Joseph, le comité recommande, dans la mesure du possible, de délocaliser les populations et infrastructures les plus exposées et vulnérables aux inondations. Il s'agit de la solution qui aura les meilleurs effets sur la réduction du risque, pour autant qu'une délimitation précise de l'espace inondable soit faite et disponible. Cette modélisation des niveaux et zones d'inondations devra prendre en compte les données hydrologiques les plus à jour (notamment liés aux événements de 2019) et intégrer les scénarios en contexte de changement climatique. La délocalisation hors des milieux inondables est bien entendu une mesure onéreuse et qui a d'importantes répercussions sur le patrimoine individuel et collectif. En revanche, il s'agit d'une solution bénéfique sur le plan environnemental, et qui permet de redonner à la rivière un espace qui « appartient » à la rivière. Il n'est pas inutile de rappeler que ces nouveaux espaces offrent potentiellement de nouvelles opportunités d'aménagement durable pour les municipalités; des aménagements moins vulnérables, accessibles à tous et plus résilients aux inondations : parcs linéaires, sentiers pédestres, et autres aménagements végétalisés. Il n'est pas prévu au mandat du comité de se prononcer de manière détaillée sur le type d'aménagement qui doit être réalisé dans les secteurs où il y aurait délocalisation. Néanmoins,

le comité invite les municipalités entre le tronçon de Scott et Vallée-Jonction à planifier cette opération de manière consciencieuse, éclairée par les données scientifiques les plus à jour, et à saisir cette opportunité pour faire preuve de créativité et d'audace pour proposer des solutions innovantes en matière d'aménagement, lesquelles pourraient même devenir attrayantes sur le plan du développement municipal. Pour l'instant, et d'après les discussions tenues en séance avec les autorités municipales, plusieurs municipalités semblent être fortement affectées par l'insécurité et l'imprévisibilité des inondations, ce qui se traduit par des effets délétères et contre-productifs tant sur le plan de la valeur de l'immobilier que sur le plan des possibilités de développement économique. Par ailleurs, le gouvernement du Québec vient tout juste de présenter un nouveau plan de protection du territoire face aux inondations (Gouvernement du Québec, MAMH, 2020) visant à assister économiquement les municipalités à réduire la vulnérabilité et l'exposition des populations et infrastructures en milieu inondable. Un budget de 75 M\$ est alloué au soutien à la relocalisation « afin de réduire l'exposition des personnes et des biens aux aléas d'inondations et de redonner aux cours d'eau leur espace de liberté » (p. 19). La recommandation du comité expert va donc tout à fait dans le sens des recommandations gouvernementales les plus à jour. Il est par ailleurs intéressant de noter qu'une recommandation semblable avait été émise il y a plus d'un siècle. En effet, le journal L'Éclaireur, établi en Beauce depuis 1908, publiait ceci dans son édition du 16 août 1917 : « Le premier et le grand remède, c'est de mettre nos chemins et rues en dehors de l'eau. La chose est plus facile que l'on croit, avec l'aide des pouvoirs publics. Placer nos grands artères commerciaux [sic] à l'abri des colères de la rivière, les maisons d'affaires, les bureaux publics et les résidences privées qui sont situées sur les rives, « émigreront » insensiblement. Nous comprenons que, dans le cas de Beauceville tout particulièrement, le problème est beaucoup plus ardu, mais sans fermer la rue commerciale actuelle qui sera protégée par les travaux que l'on va faire sur la rivière, une rue nouvelle, un quartier nouveau sera créé et d'un mal profond naîtra un bien appréciable et le crédit de notre ville en profitera d'autant. (...) donc comme principe général, et qu'il faudrait appliquer et se mettre à l'abri, « gagnons les hauteurs », et demandons au gouvernement de nous aider. »

Le comité ne peut exclure que le dragage du lit de la rivière sur une quinzaine de kilomètres entre le seuil en aval de Scott et Sainte-Marie, si exécuté correctement, aurait un effet bénéfique sur le risque et diminuerait substantiellement les niveaux d'eau (de près d'1m) lors de crues équivalentes à la crue centennale. Cette solution originalement proposée par Tecsub (1993) est bien documentée et appuyée par une modélisation hydraulique convaincante. Cela dit, il importe de rappeler le caractère drastique de la solution et de bien prendre la mesure de ce qu'elle représente opérationnellement. Premièrement, il s'agit d'un dragage dont la profondeur varie entre 1,56m et 2,78m selon les sections, sur une largeur variant entre 120m et 137m sur près d'une quinzaine de kilomètres. Pour mettre cette solution en perspective, cela dépasse en dimension le canal Lachine à Montréal. De plus, ce dragage s'avérerait inefficace si le seuil situé en aval de Scott n'est pas écrêté par dynamitage. Et bien évidemment, il ne faut pas négliger les opérations d'entretien de ce chenal, car cette opération va rabaisser le niveau du lit en deçà du niveau d'équilibre hydro-sédimentaire. Inévitablement, le ralentissement de l'écoulement engendré par le dragage favorisera l'accumulation et le comblement sédimentaire dans ce chenal surcreusé. Il n'est pas possible à l'heure actuelle de définir en combien de temps précisément ce comblement s'effectuera. Dans d'autres systèmes, en Gaspésie notamment, Bourdon (2013) a estimé que le comblement des chenaux dragués s'effectue dès le premier événement morphogène, en plus de

généraliser d'importantes instabilités morphosédimentaires par recul de tête dans les sections situées en amont des secteurs dragués. Si cela est aussi rapide sur la Chaudière, cela revient à dire que le dragage sera non pas une opération ponctuelle, mais une opération perpétuelle. Enfin, il faut considérer les impacts environnementaux multiples associés à un dragage récurrent : nuisance aux frayères, perturbation de la végétation aquatique, sans compter la contamination directe du milieu aquatique liée à la machinerie utilisée pour l'excavation. S'il était encore possible d'envisager ce genre de solutions d'« ingénierie dure » dans les années 1990, le contexte passablement différent de 2020 ne le permet simplement pas.

Il importe enfin de discuter de la problématique du comblement sédimentaire à l'embouchure des tributaires de la rivière Chaudière. Ce problème a été relevé par de nombreuses autorités municipales lors des rencontres avec le comité expert. Or, le comité expert est d'avis que ces structures du lit mineur ont peu d'effet sur la dynamique et sur l'hydraulique des inondations en eau libre, puisque lors de ces événements, les niveaux d'eau atteints excèdent de plusieurs mètres ceux auxquels ces structures ont un effet sur l'hydraulique. Il faut savoir que la rivière Chaudière est une rivière très dynamique sur le plan morphosédimentaire, en raison notamment de la disponibilité sédimentaire dans le bassin versant et en raison également des pentes fortes qui confèrent au système une énergie considérable lors des événements morphogènes. Par ailleurs, des traces évidentes et multiples de ce dynamisme sédimentaire sont visibles sur des photographies aériennes datant de 1935, où l'on peut apercevoir, dès cette époque, d'imposantes accumulations sédimentaires à l'embouchure des tributaires. Il est important de rappeler que le lit de la rivière Chaudière a également fait l'objet d'importants travaux d'extraction du gravier pendant plusieurs décennies et que, suite à l'abandon de ces travaux au début des années 1990, la rivière Chaudière amorce probablement une forme de « retour à l'équilibre » hydrosédimentaire. Ce retour à l'équilibre se fait notamment dans le contexte d'une tendance à la hausse des débits de pointe (voir section hydrologie) et dans le contexte d'un bassin versant où plusieurs tributaires ont été linéarisés et dénaturés, ce qui contribue sans doute également à l'aggravation des problèmes d'érosion dans les tributaires et d'accumulation sédimentaire à leur embouchure.

Inondations par embâcles de glace

Concernant les inondations par embâcles de glace sur le tronçon Beauceville / Notre-Dame-des-Pins, il n'existe pas de solution unique, mais le comité recommande plutôt un ensemble de solutions jouant sur diverses facettes de la problématique. La vision du comité est que différents facteurs aggravent les problèmes sur ce tronçon. Ces facteurs sont 1) les importantes quantités de frasil produites en amont de Beauceville et contribuant à épaissir et à solidifier le couvert de glace 2) les imposants volumes de glace qui dévalent de l'amont et s'accumulent contre des couverts de glace résistants et 3) les difficultés d'évacuation de la glace dans le secteur entre le Rocher et le centre-ville de Beauceville.

Pour solutionner le premier problème (production de frasil), l'installation de l'estacade sud proposée par l'équipe de B. Morse apparaît comme la solution la plus porteuse. Cette infrastructure a fait ses preuves ailleurs (notamment sur la rivière Ste-Anne), et bien qu'il faille fixer et ajuster les modalités opérationnelles associées à son installation sur le terrain, le comité expert croit qu'une fermeture hâtive

du couvert de glace a de bonnes chances de réduire la production et l'accumulation de frasil dans ce secteur.

Pour régler les problèmes associés aux volumes de glace provenant de l'amont, le comité recommande d'installer des infrastructures légères de rétention des glaces dans la rivière Chaudière et dans les tributaires. Ces ouvrages légers auraient pour objectif de réduire le transit glacial de l'amont vers l'aval du bassin versant, et au besoin de favoriser la formation d'embâcles de glace dans des secteurs moins menaçants pour les populations et infrastructures et qui, en raison de leur géométrie particulière, pourraient accueillir des volumes de glace plus imposants. Ces structures plus légères sont préférables à la construction d'une nouvelle infrastructure plus lourde de rétention des glaces (de type Sartigan). Cette dernière est onéreuse, non-esthétique et dommageable sur le plan environnemental. On lui préfère bien entendu des ouvrages plus légers qui ont le même effet en terme de rétention de glace mais distribué sur trois secteurs, qui sont moins coûteux et sont moins invasifs sur l'environnement du cours d'eau.

Pour améliorer les capacités d'évacuation du train de glace en aval de Beauceville, plusieurs actions peuvent être envisagées. D'abord, les travaux d'affaiblissement du couvert de glace dans ce secteur faciliteront considérablement le départ des glaces dans les secteurs de formation d'embâcles avant l'arrivée des trains de glace venant de l'amont. Le comité expert a examiné trois secteurs à affaiblir de manière prioritaire : le secteur du Rocher, le secteur du pont de Beauceville et le secteur du pont-route de St-Georges. S'il faut choisir, le comité est d'avis que les deux premiers sont les plus porteurs, en particulier l'affaiblissement de la glace dans le secteur du pont de Beauceville. L'évacuation rapide de ces glaces, idéalement avant même que n'arrive le train de glace de l'amont, permettrait de réduire les problèmes à Beauceville. Le comité conseille également de retirer les résidus de batardeaux ayant autrefois servi à l'extraction du gravier dans ce secteur, toujours bien visibles dans le lit de la Chaudière, et qui constituent des obstacles « évitables » à la libre circulation des glaces. Enfin, le comité recommande de libérer progressivement le lit de ses obstacles artificiels, avant de s'attaquer aux obstacles naturels (amoncellements en sédiments à la sortie des tributaires, ou autre protubérance rocheuse ex. rocher en face de « Pavages de Beauce Ltée », végétation arborescente en rive) et de ne s'attaquer à ces structures naturelles qu'en dernier recours.

Enfin, la délocalisation du centre-ville de Beauceville est aussi une option à considérer. Le comité expert est conscient que cette solution ne fait pas l'unanimité, mais invite les autorités municipales à la considérer de manière sérieuse. Le comité invite d'ailleurs les autorités municipales à produire une analyse coûts-avantages plus poussée et considérer dans la balance le caractère récurrent de certaines mesures comme les travaux d'affaiblissement de glace (qui devront être effectuées à chaque année) et l'impact de l'installation de structures légères de rétention des glaces dans les différents tributaires. Le comité rappelle que la délocalisation des populations et des infrastructures est la seule solution qui puisse, hors de tout doute, réduire le risque lié aux inondations et ce, pour une raison bien simple : si on réduit l'exposition, on réduit la vulnérabilité.

Programme de suivi de processus glaciels et hydro-sédimentaires.

Le comité souhaite en terminant souligner le fait que cette rivière pourrait bénéficier d'un programme d'acquisition de connaissances scientifiques sur les processus et mécanismes générant les inondations. Malgré l'importance du problème dans ce secteur de la Chaudière, il est paradoxal de constater que les informations et données scientifiques soient aussi fragmentaires. Ces connaissances permettront d'éclairer les décisions de manière plus précise en lien avec les inondations.

Selon l'avis du comité, ce programme se subdiviserait quatre catégories :

- 1- *Acquisition d'information sur l'évolution géomorphologique des tronçons et le transit sédimentaire.* Le comité a été quelque peu surpris de constater la faible quantité d'information disponible permettant de retracer l'évolution des propriétés du chenal. Il serait utile de déployer un suivi systématique de l'évolution des apports en sédiments (charge en suspension et charge de fond, doublé d'un suivi serré des sections alluviales de manière à identifier l'emplacement et les taux d'ajustement morphologique de la rivière. Cela permettrait de répondre à différentes questions cruciales : le chenal est-il en aggradation verticale ? quelle est la vitesse de la sédimentation ? Quel volume de sédiment transite entre l'amont et l'aval annuellement ? À cet effet, l'acquisition de données au moyen d'un LiDAR vert (LiDAR bathymétrique) permettrait à tout le moins de dresser un premier portrait de l'état de la situation. Ces informations seraient également très importantes pour améliorer la modélisation hydraulique.
- 2- *Acquisition de connaissances sur les processus glaciels.* Un suivi serré des conditions de glace en fin d'hiver et au printemps devrait être effectué pour caractériser la sévérité et le séquençage de la débâcle (et les différents processus associés) entre Saint-Georges et Saint-Joseph. Ce volet devra également permettre d'accroître la prédictibilité des phénomènes d'embâcles et d'intégrer ces derniers à l'analyse fréquentielle des cotes de crue si utiles pour la délimitation des milieux inondables.
- 3- *Acquisition de connaissances sur les milieux inondables en contexte de changement climatique.* Une modélisation hydrologique en climat futur devra être effectuée afin de déterminer si la tendance récente à l'augmentation de l'hydraulicité de la rivière Chaudière va se poursuivre dans le futur. Par ailleurs, cette modélisation devra également quantifier l'effet qu'auront les changements climatiques sur les milieux inondables, et ainsi orienter la délimitation des espaces d'inondabilité dans un contexte de climat changeant. La mise au point de solutions doit être adaptée à des conditions hydrologiques qui doivent être minimalement prévisibles sur un horizon temporel déterminé.
- 4- *Analyses coût-avantages.* Le comité suggère enfin que des études coûts-avantages plus poussées soient effectuées pour bien départager le bénéfice associé à chacune des solutions et examiner de manière plus approfondie, et à la lumière de chiffres avérés, le potentiel de ces dernières pour la réduction du risque lié aux inondations.

Références

- Biron, P.M., Buffin-Bélanger, T., Larocque, M., Choné, G., Cloutier, C.-A., Ouellet, M.-A., Demers, S., Olsen, T., Desjarlais, C., Eyquem, J. (2014) Freedom space for rivers: a sustainable management approach to enhance river resilience. *Environmental Management*, 54, 5, 1056-1073.
- Biron, P.M., Thomas, I. (2019) Mieux vivre avec l'eau, pour être plus résilient face aux inondations. *La Conversation*
<https://theconversation.com/mieux-vivre-avec-leau-pour-etre-plus-resilient-face-aux-inondations-122250>
- Bourdon, P. (2013) Analyse de l'ajustement morphosédimentaire d'une rivière divagante à des travaux d'excavation de sédiments : le cas de la rivière de l'Anse Pleureuse en Gaspésie. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Rimouski, 135 p.
- Brans, J. P., Vincke, P., Mareschal, B. (1986). How to select and how to rank projects: The PROMETHEE method. *European journal of operational research*, 24(2), 228-238.
- Burge, L.M. (2005) Wandering Miramichi rivers, New Brunswick, Canada. *Geomorphology*, 69, 253-274.
- CEHQ (Centre d'Expertise Hydrique du Québec) (2005) Rivière Chaudière – Municipalités régionales de comté de La Nouvelle Beauce, de Robert-Cliche et de Beauce-Sartigan : Révision des cotes de crue. CEHQ 12-001, 180 p.
- Choné, G., Benacchio, V. Biron, P., Buffin-Bélanger, T. (2020) Vers une cartographie générale des zones inondables : Modélisation hydraulique appliquée à large échelle pour des cours d'eau du Québec habité. Rapport final, Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. 150 p.
- CIWEM (2014) Floods and Dredging : a Reality Check, 25 p.
<https://www.ciwem.org/assets/pdf/Policy/Reports/Floods-and-Dredging-a-reality-check.pdf>
- COBARIC (2014). Plan directeur de l'eau du bassin versant de la rivière Chaudière : Mise à jour 2014 - Portrait. Comité de bassin de la rivière Chaudière, 2014, 256 p.
- Committee on Risk-Based Analysis for Flood Damage Reduction. (2000). *Risk Analysis and Uncertainty in Flood Damage Reduction Studies*. Washington, DC: National Academy Press
- Desloges, J.R., Church, M.A. (1989) Wandering gravel-bed rivers. *The Canadian Geographer*, 33, 4, 360-364.
- Gouvernement du Québec, ministère des Affaires municipales et de l'Habitation (2020) Plan de protection du territoire face aux inondations : des solutions durables pour mieux protéger nos milieux de vie, 44 p.
https://www.mamh.gouv.qc.ca/fileadmin/publications/amenagement_territoire/plan_protection_territoire_inondations/PLA_inondations.pdf

Hartmann, D.L., et al "Observations: Atmosphere and Surface. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change". Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 2013

Hutton, N.S., Tobin, G.A., Montz, B.E. (2018) The levee effect revisited: Processes and policies enabling development in Yuba County, California. *Journal of Flood Risk Management*, 12:e12469, 1-13.

Martel, J.-L., Mailhot, A., Brissette, F., Caya, D. (2018). Role of natural climate variability in the detection of anthropogenic climate change signal for mean and extreme precipitation. *Journal of Climate*, 31(11), 4241–4263. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0282.1>

Martel, J.-L., Mailhot, A., Brissette, F. (2019). Evolution of precipitation extremes in three large ensembles of climate simulations – impact of spatial and temporal resolutions. *Journal of Climate*, 33, 1089–1103. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0764.1>

Massé, S, Demers, S, Buffin-Bélanger, T, Biron, P.M., Choné, G, Massey W. (2020) Development of a mapping approach encompassing most fluvial processes: Lessons learned from the freedom space for rivers concept in Quebec (Canada). *River Research and Applications*. Early View, DOI: 10.1002/rra.3567

Moriasi, D. N. et al. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900. doi:10.13031/2013.23153.

Morse, B., Turcotte, B. (2018) Risque d'inondations par embâcles de glaces et estimation des débits hivernaux dans un contexte de changements climatiques, Rapport Ouranos. 79p.

Morse, B. (2019) Estacades Beauceville – Résumé du projet. Rapport soumis au Ministère de l'environnement et de la lutte contre les changements climatiques. Décembre 2019.

Nash, J. E.; Sutcliffe, J. V. (1970). "River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles". *Journal of Hydrology*. 10 (3): 282–290. doi:10.1016/0022-1694(70)90255-6

OBV-RPNS (2019) Rivière de la Petite Nation : Perception citoyenne des risques face aux inondations et aux changements climatiques. <https://storymaps.arcgis.com/stories/d87054f0d68f41899b950d58e3def05e>

Oudin, L., Hervieu, F., Michel, C., Perrin, C., Andréassian, V., Anctil, F., & Loumagne, C. (2005). Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall–runoff model?: Part 2—Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall–runoff modelling. *Journal of Hydrology*, 303(1), 290-306. doi: 10.1016/j.jhydrol.2004.08.026

Perrin, C., Michel, C., & Andréassian, V. (2003). Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, 279(1), 275-289. doi: 10.1016/S0022-1694(03)00225-7.

Tecslult (1993) Étude de modélisation du bassin versant de la rivière Chaudière – rapport d'étape n. 1 : État de la situation. 253 p.

Tecsult (1994) Étude de modélisation du bassin versant de la rivière Chaudière – rapport d'étape n. 2 : Solutions aux inondations en eau libre. 282 p.

Tecsult (1994) Étude de modélisation du bassin versant de la rivière Chaudière – rapport d'étape n. 3 : Solutions aux inondations avec glace. 137 p.

Tecsult (1994) Étude de modélisation du bassin versant de la rivière Chaudière – rapport final. 132 p.

Valéry, A. (2010). Modélisation précipitations–débit sous influence nivale. Élaboration d'un module neige et évaluation sur 380 bassins versants. Thèse doctorale, Agro Paris Tech, 417 pp. <https://webgr.irstea.fr/wp-content/uploads/2012/07/2010-VALERY-THESE.pdf>.

Wishart, D., Warburton, J., Bracken, L. (2005) Gravel extraction and planform change in a wandering gravel-bed river: The River Wear, Northern England. *Geomorphology*, 94, 131-152.

Annexe A

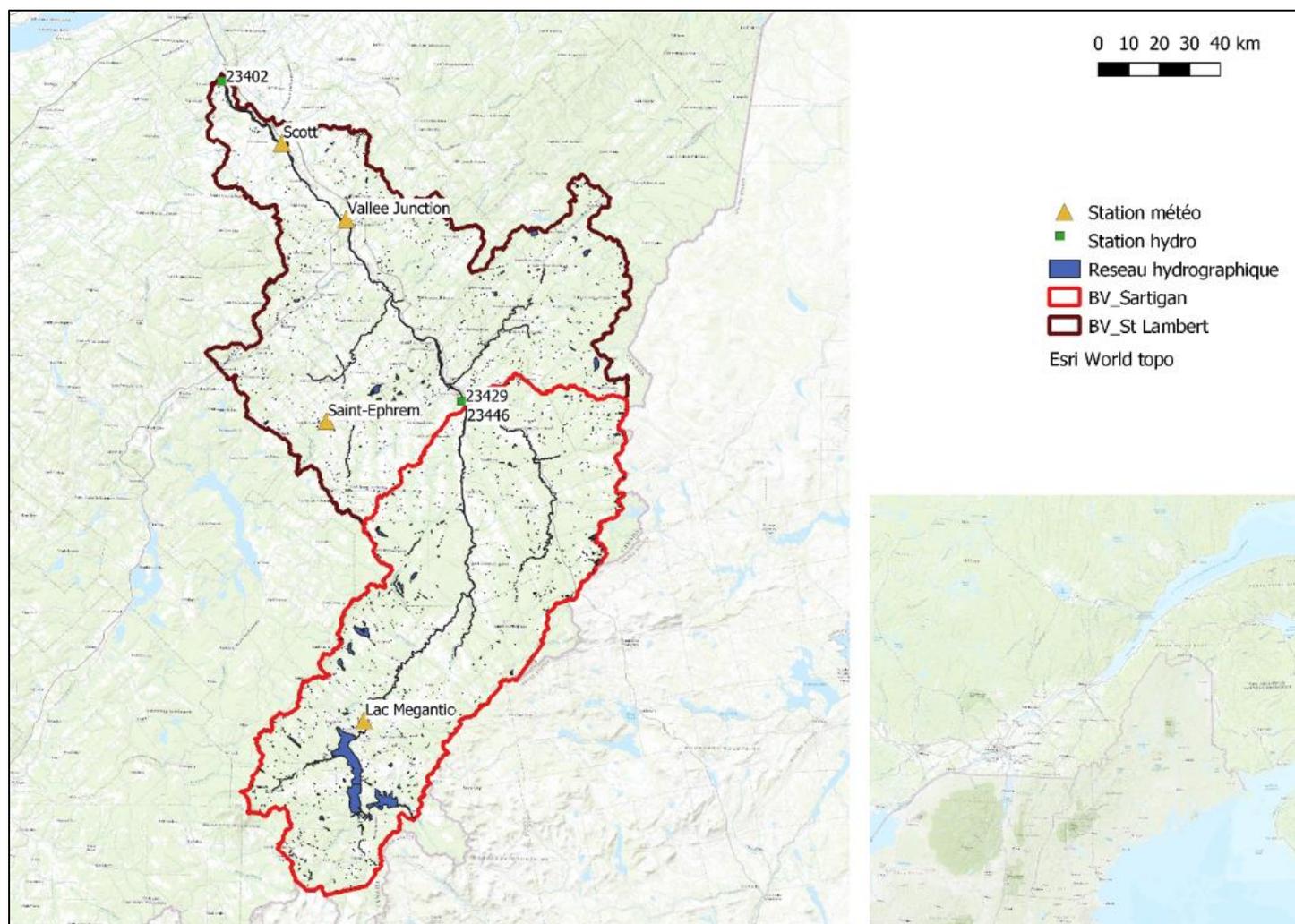


Figure A1. Sous-bassins versants de la rivière Chaudière à Saint-Lambert (station 023402) et au barrage Sartigan (station 023429). Les triangles jaunes représentent les quatre stations météorologiques et les carrés verts les deux stations hydrométriques à l'étude.

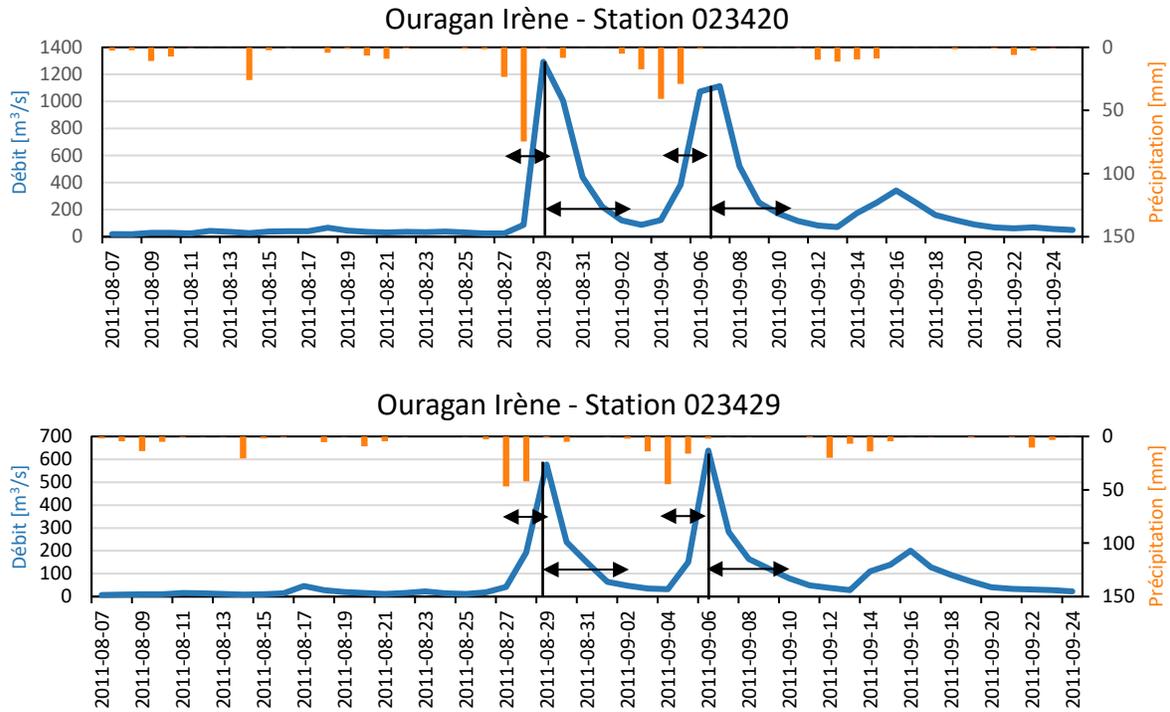


Figure A2. Hydrogrammes résultants des précipitations de l'ouragan Irène et séparation du ruissellement rapide et de base pour les stations 023420 et 023429.

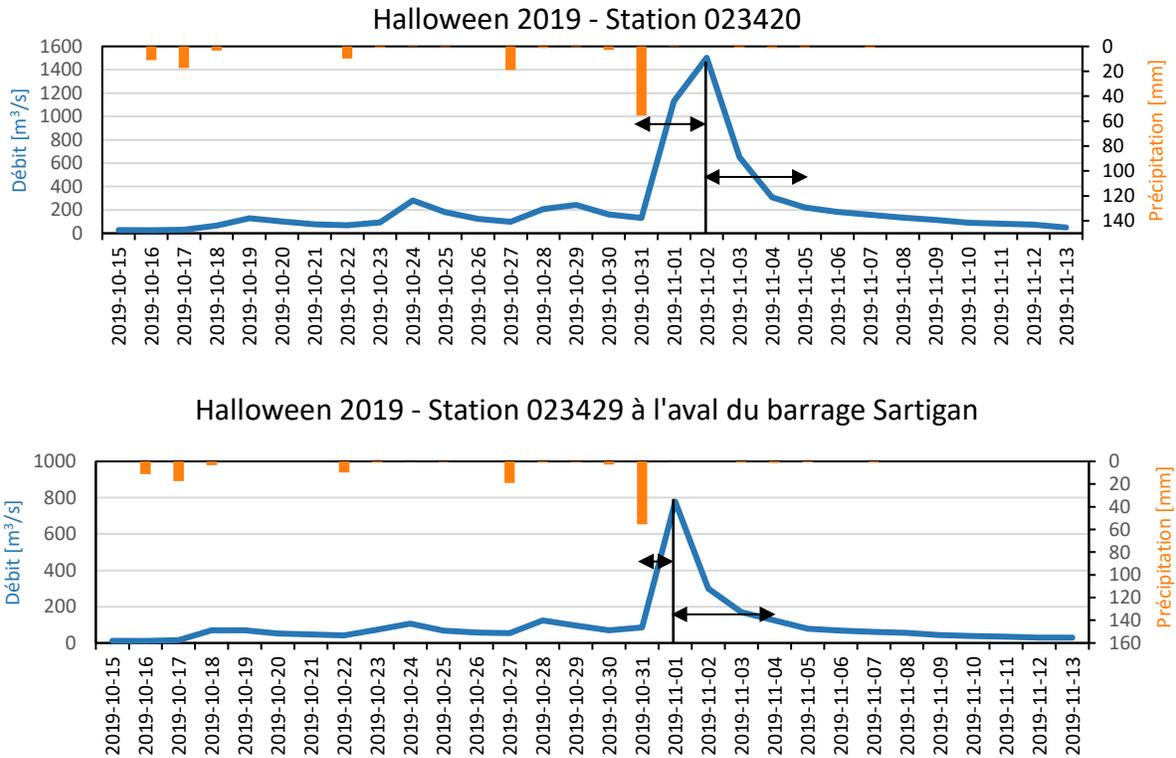


Figure A3. Hydrogrammes résultants des précipitations de l'orage de l'Halloween 2019 et séparation du ruissellement rapide et de base pour les stations 023420 et 023429.

Tableau A1. Résultats des analyses de stationnarité pour les périodes de 1950 à 1984 et 1985 à 2019 pour les stations hydrométriques et météorologiques. Les résultats du test de Mann-Kendall sont le h (valeur de 1 correspondant à une tendance statistiquement significative avec un $\alpha < 0,05$) et la p-value (α correspondante) et ceux de l'estimateur de Theil-Sen sont une tendance en unité/année.

Station	Variable	1950-1984			1985-2019		
		h	p-value [α]	Tendance [$^*/$ année]	h	p-value [α]	Tendance [$^*/$ année]
023402	$Q_{\max;obs}$ [m^3s^{-1}]	0	0.2217	7.2	0	0.3202	6.0833
024329					0	0.222	4.7185
023402	V_{obs} [$10^9 m^3$]	0	0.2559	0.0152	1	0.0332	0.0287
024329					1	0.0231	0.0154
7027200	$P_{\max;obs}$ [mm]	0	0.8535	0.0385	0	0.5796	-0.1679
7027840		0	0.1023	-0.3625	0	0.8535	0.0444
7023677					0	0.887	-0.0464
7028676					0	0.8524	0.0325
7027200	$P_{cum;obs}$ [mm]	0	0.4432	1.6211	0	0.0691	4.3722
7027840		0	0.7982	0.8321	0	0.1914	3.7565
7023677					1	0.0115	6.0426
7028676					1	0.0163	8.5266

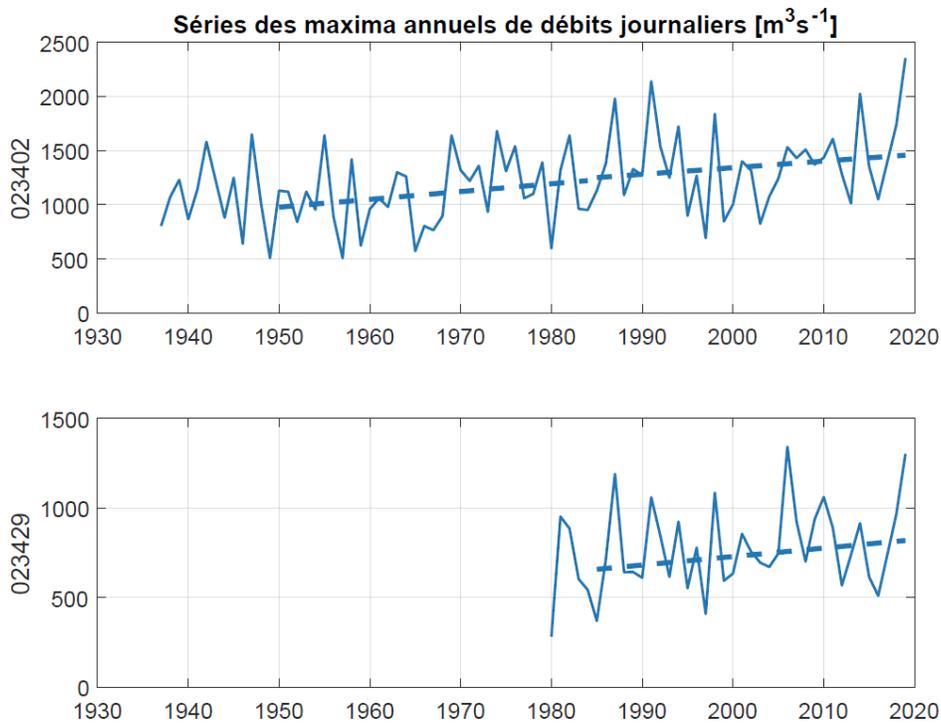


Figure A4. Séries des maxima annuels de débits journaliers pour les stations hydrométriques de Saint-Lambert (023402) et en aval du barrage Sartigan (023429). Les traits pointillés indiquent les tendances non significatives observées entre 1950 et 1984 puis 1985 et 2019.

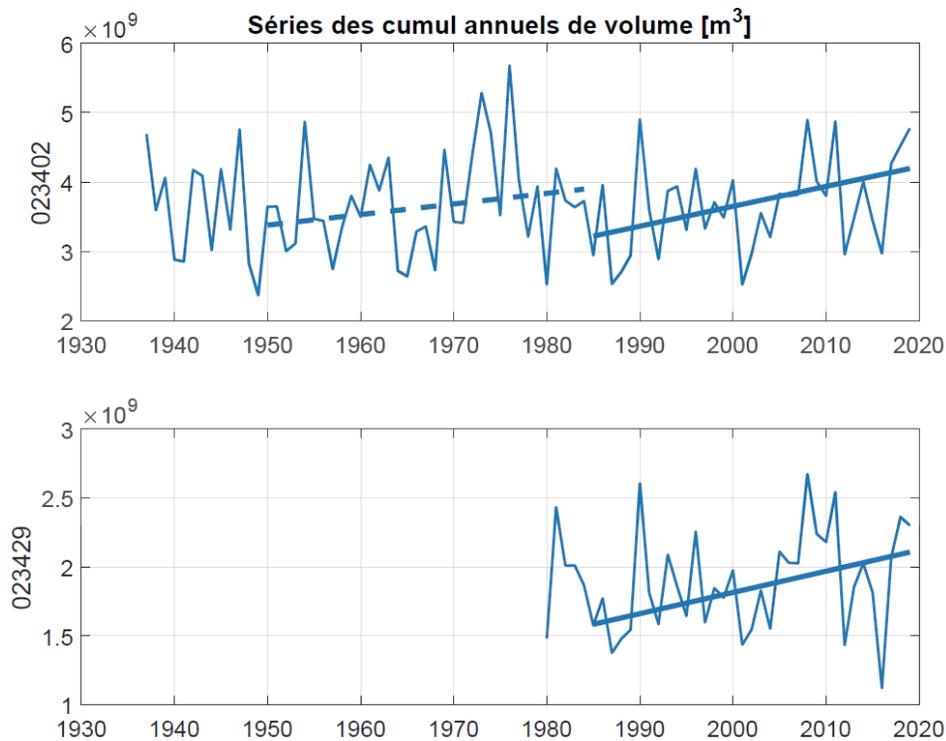


Figure A5. Comme la figure A4, mais pour les séries des cumuls annuels de volume. Les traits pointillés et pleins indiquent respectivement les tendances non significatives et significatives observées.

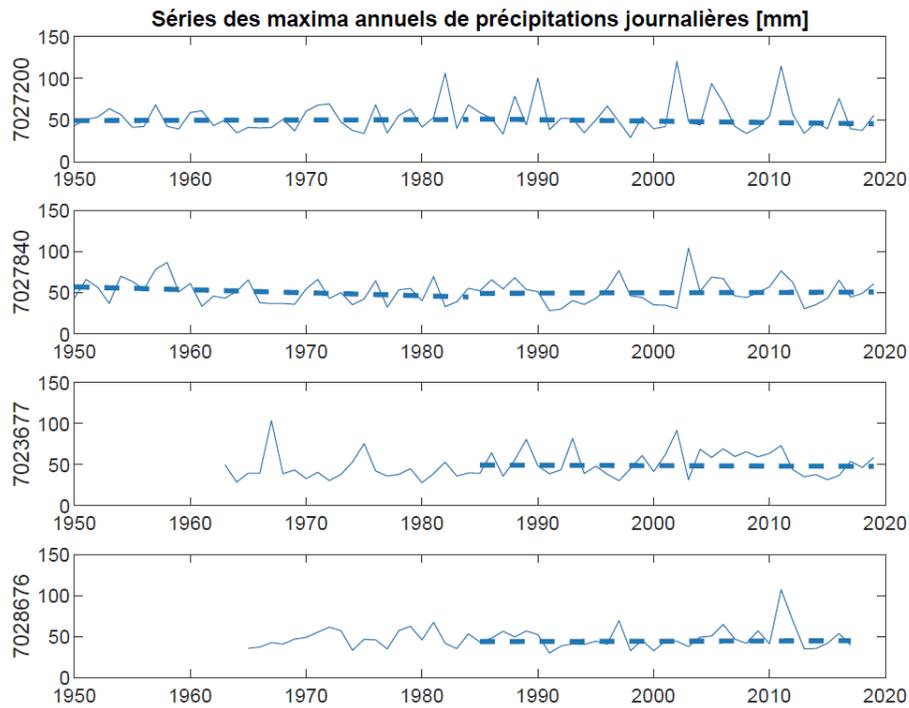


Figure A6. Séries des maxima annuels de précipitations journalières pour les quatre stations météorologiques. Les traits pointillés indiquent les tendances non significatives observées entre 1950 et 1984 puis 1985 et 2019.

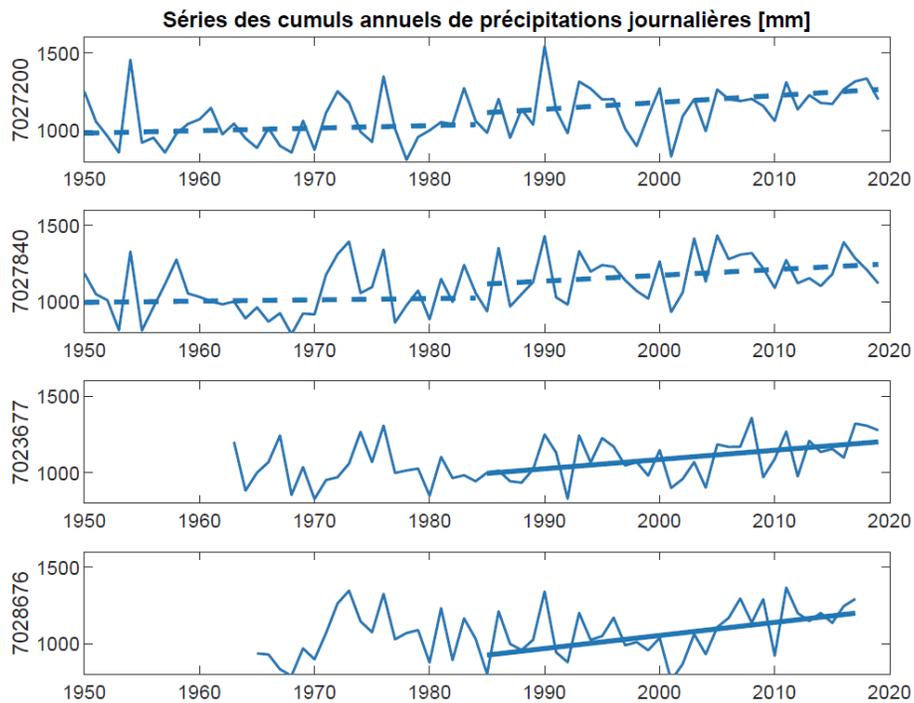


Figure A7. Comme la figure A6, mais pour les séries de cumuls annuels de précipitations journalières. Les traits pointillés et pleins indiquent respectivement les tendances non significatives et significatives observées.

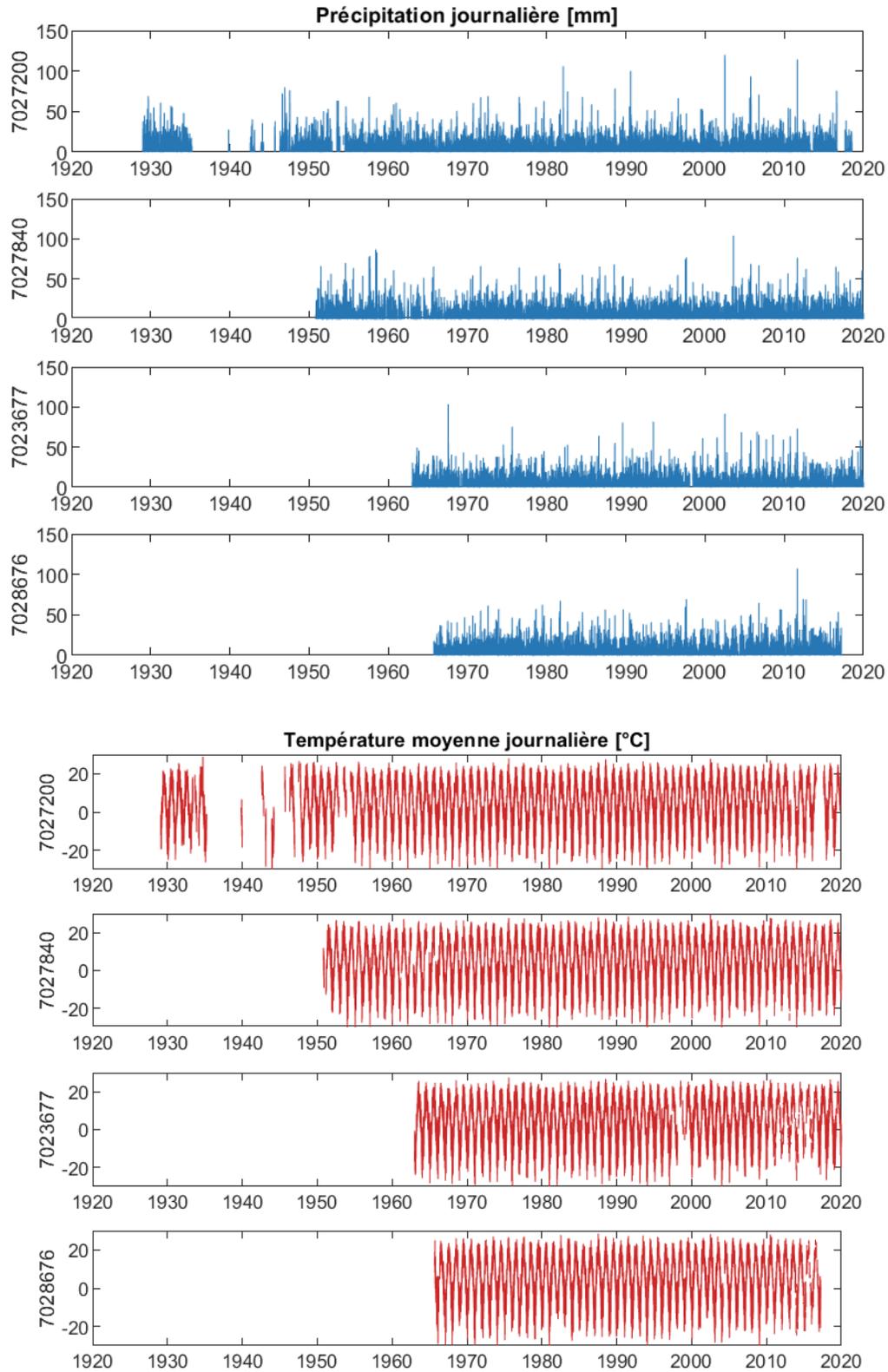


Figure A8. Couverture temporelle des précipitations (haut) et températures (bas) journalières pour les quatre stations météorologiques.

Tableau A2. Résultats des analyses de stationnarité pour les périodes de 1950 à 1984 et 1985 à 2019 pour les deux sous-bassins. Les résultats du test de Mann-Kendall sont le h (valeur de 1 correspondant à une tendance statistiquement significative avec un $\alpha < 0,05$) et la p-value (α correspondante) et ceux de l'estimateur de Theil-Sen sont une tendance en unité/année.

Sous-bassin de Saint-Lambert [023402]						
1950-1984				1985-2019		
Variable	h	p-value [α]	Tendance [*/année]	h	p-value [α]	Tendance [*/année]
$Q_{\max;obs}$ [m^3s^{-1}]	0	0,222	7,200	0	0,320	6,083
$Q_{\max;sim}$ [m^3s^{-1}]	0	0,236	-5,837	0	0,182	9,433
V_{obs} [$10^9 m^3$]	0	0,256	0,015	1	0,033	0,029
V_{sim} [$10^9 m^3$]	0	0,358	0,016	0	0,074	0,020
SWE_{sim} [mm]	0	0,374	-1,212	0	0,570	0,593
$P_{cum;obs}$ [mm]	0	0,410	1,790	0	0,078	3,952
ET_{sim} [mm]	0	0,103	-1,264	1	0,021	1,668
$T_{min;obs}$ [°C]	0	0,211	0,017	1	0,008	0,043
$T_{max;obs}$ [°C]	0	0,514	-0,011	1	0,010	0,035

Sous-bassin en aval du barrage Sartigan [024329]						
1950-1984				1985-2019		
Variable	h	p-value [α]	Tendance [*/année]	h	p-value [α]	Tendance [*/année]
$Q_{\max;obs}$ [m^3s^{-1}]				0	0,222	4,719
$Q_{\max;sim}$ [m^3s^{-1}]	0	0,155	-5,685	0	0,100	7,218
V_{obs} [$10^9 m^3$]				1	0,023	0,015
V_{sim} [$10^9 m^3$]	0	0,678	0,027	1	0,044	0,013
SWE_{sim} [mm]	0	0,146	-1,703	0	0,691	0,525
$P_{cum;obs}$ [mm]	0	0,495	1,287	1	0,014	5,335
ET_{sim} [mm]	1	0,033	-2,239	1	0,031	1,580
$T_{min;obs}$ [°C]	0	0,589	0,007	1	0,005	0,048
$T_{max;obs}$ [°C]	0	0,112	-0,017	1	0,007	0,035

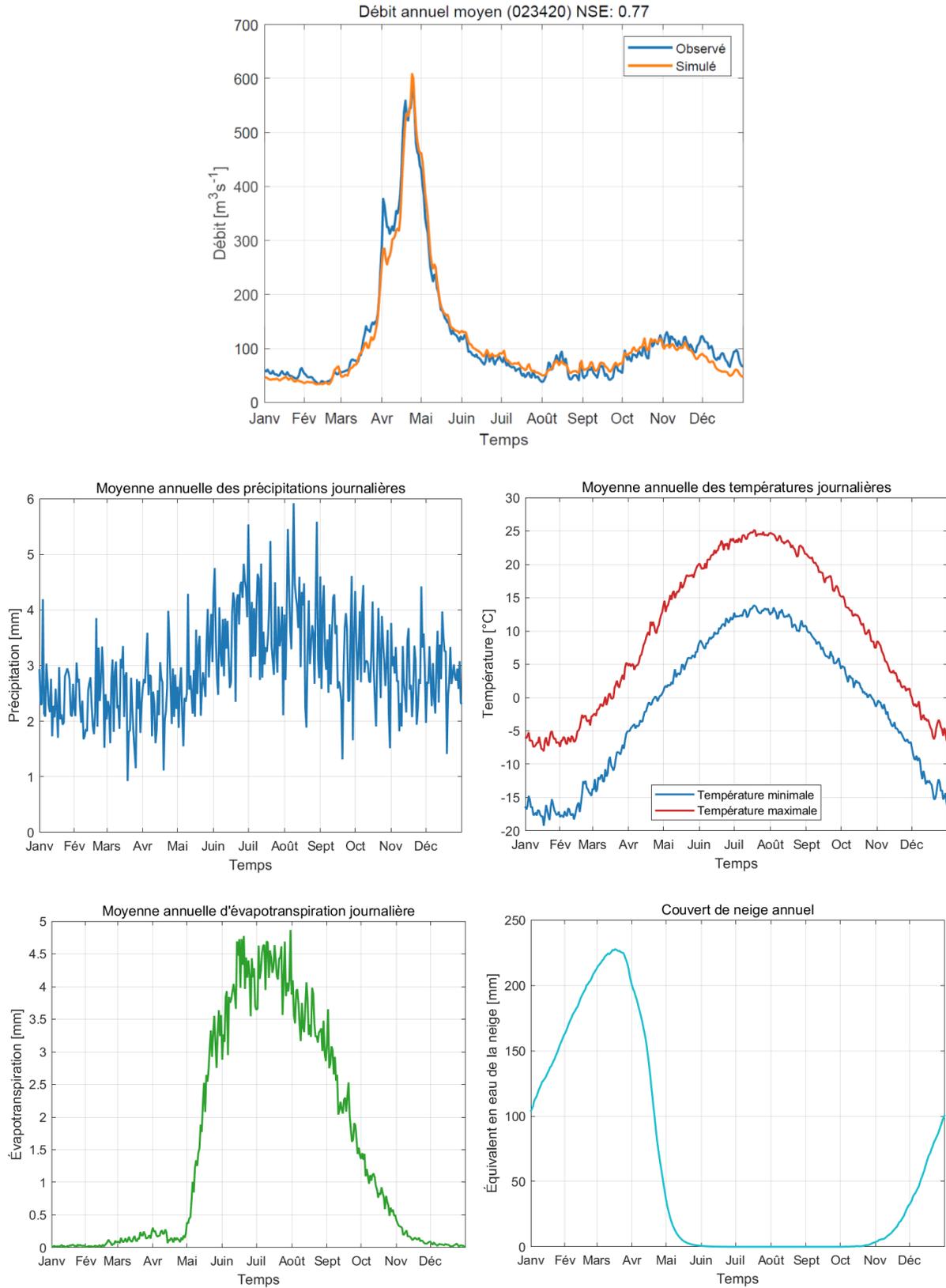


Figure A9. Bilan hydrique annuel pour le bassin versant de la station hydrométrique de Saint-Lambert (023420).

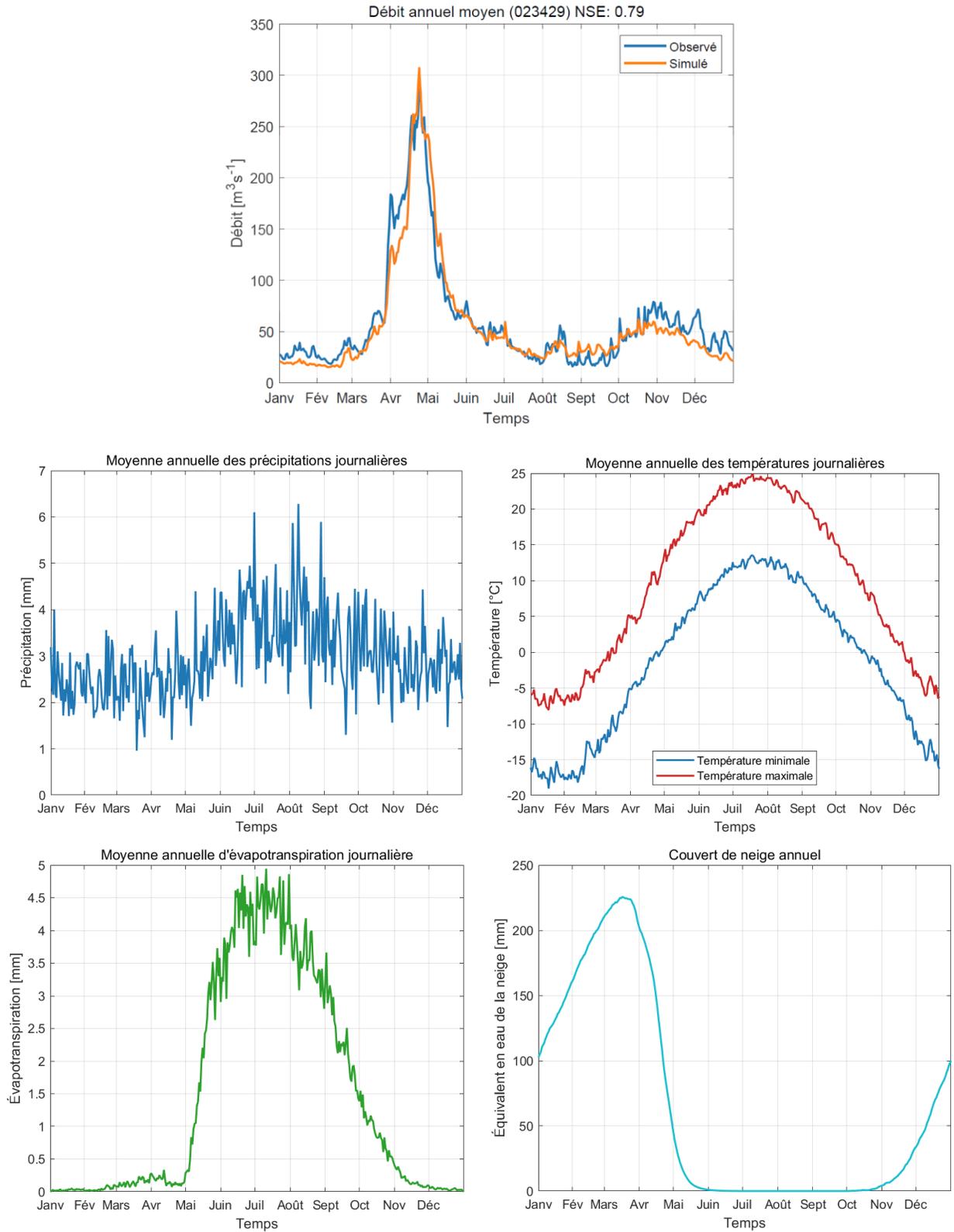


Figure A10. Comme la figure A9, mais pour la station 023429 en aval du barrage Sartigan.