



Université du Québec
à Rimouski

**APPLICATION ET DÉVELOPPEMENT DE L'APPROCHE
HYDROGÉOMORPHOLOGIQUE AUX PLAINES
ALLUVIALES DU QUÉBEC MÉRIDIONAL**

Mémoire présenté

dans le cadre du programme de maîtrise en géographie

en vue de l'obtention du grade de maître ès sciences

PAR

© **CLÉMENT BESNARD**

Août 2016

Composition du jury :

Freddy Vinet, examinateur externe, Université Paul Valéry-Montpellier 3

Pascal Bernatchez, examinateur interne et président du jury, Université du Québec à Rimouski

Thomas Buffin-Bélanger, directeur de recherche, Université du Québec à Rimouski

Dépôt initial le 31 mars 2016

Dépôt final le 11 août 2016

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI
Service de la bibliothèque

Avertissement

La diffusion de ce mémoire ou de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire « *Autorisation de reproduire et de diffuser un rapport, un mémoire ou une thèse* ». En signant ce formulaire, l'auteur concède à l'Université du Québec à Rimouski une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de son travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, l'auteur autorise l'Université du Québec à Rimouski à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de son travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits moraux ni à ses droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, l'auteur conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont il possède un exemplaire.

REMERCIEMENTS

Voici venue la fin d'une époque enrichissante. Plus ou moins un quart de siècle sans jamais quitter les bancs d'école. Entre la France et le Québec, j'ai connu deux systèmes d'éducation bien différents. L'un m'a appris la rigueur et l'autre m'a permis d'évoluer et de me surpasser. Cette évolution je la dois, entre autre, à Thomas Buffin-Bélanger, mon directeur de maîtrise, qui m'a ouvert les portes de son laboratoire sans hésiter et qui m'a accompagné pendant un peu plus de deux ans dans les différentes étapes de mon projet. Son sang-froid, son positivisme, ses qualités de pédagogue et son aptitude à être disponible et joignable en tout temps m'ont permis d'avancer sereinement jusqu'à la phase finale de mon mémoire et par le fait même de croire en mes capacités.

Avec du recul, je constate que cette maîtrise n'était pas gagnée d'avance. Le complexe historique de l'approche HGM et son adaptation au territoire du Québec qui n'est encore à cet instant pas achevée furent deux choses qui me rendirent la tâche pas toujours évidente. Heureusement, j'ai pu à maintes reprises m'appuyer sur l'expertise et les conseils de Sylvio Demers, agent de recherche au laboratoire de géomorphologie et dynamique fluviale, en qui je voyais souvent le « messie ». Et même si pour Sylvio il n'était également pas toujours gagné d'avance de répondre à mes questions, il prit toujours le temps (parfois jusqu'à 4 h) de m'expliquer et de s'assurer de ma compréhension.

Je remercie Jean-Philippe Marchand et Antonin Montané, anciens étudiants du laboratoire de géomorphologie et dynamique fluviale, qui ont su m'éclairer sur le fonctionnement du MNZI. Aussi, je remercie l'ensemble de mes collègues et amis qui m'ont assisté sur le terrain, c'est-à-dire, Simon Claveau, Simon Massé, Nancy Martel, Antoine Martin-Ouellet, Rock Guèvremont, Alexis Roy Lizotte, Tristan Caron, Sébastien Arz, Alexandre Théberge et Sylvio Demers.

Je remercie toutes les personnes et organismes qui m'ont permis d'obtenir les données sans lesquelles il aurait été impossible de faire ce projet : Katy Brown cartothécaire de l'UQAR, Jean-François Rioux bibliothécaire responsable des archives régionales de l'UQAR, Dany Lechasseur et Alexandre Dionne conseillers en sécurité civile à la direction régionale du MSP, Réjean Savard conseiller en communication et collectivités à la direction régionale d'Hydro-Québec, Jean-Denis Bouchard géologue du CEHQ, Paul Gingras aménagistes, Cédric Charest coordonnateur en géomatique et Jonathan Brunet directeur de la sécurité incendie et civile de la MRC de La Mitis, Gabriel Corriveau inspecteurs des cours d'eau de la municipalité de Sainte-Angèle-de-Mérici, Alexandre Dionne administrateur de la ZEC rivière Mitis ainsi que Serge Réhaume biologiste et Julie Marcoux conseillère en communication du MTQ.

Je remercie les résidents riverains et les agriculteurs de m'avoir accordé le droit de passage sur leur terre et d'avoir participé à l'enquête de terrain dans le cadre de l'inventaire des repères historiques.

Je remercie, mes parents, Claudine et Philippe, ainsi que ma conjointe, Bibie, qui ont toujours cru en moi et qui m'ont soutenu et encouragé tout au long de mon cheminement à la maîtrise.

Je remercie le conseil des maires de la MRC de La Mitis qui a contribué financièrement à la réalisation de ce projet.

Enfin, je remercie le ministère de la Sécurité publique qui, par l'entremise du Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques avec l'appui financier du Fonds vert, a soutenu financièrement le présent projet.

RÉSUMÉ

Le but de ce travail de recherche est de développer et d'appliquer l'approche hydrogéomorphologique (HGM) à la plaine alluviale de la rivière Mitis. Ici, l'approche HGM est perçue comme une approche intégrée qui est construite à partir de plusieurs méthodes de manière à s'adapter le plus adéquatement possible aux conditions du milieu et parvenir à une cartographie juste des aléas d'inondation. L'élaboration de la démarche cartographique est basée sur l'historique de l'approche HGM au Québec. Ce mémoire par articles est découpé en quatre chapitres. Le chapitre 1 traite de la problématique en abordant dans un premier temps les origines et les fondements de l'approche HGM et l'histoire récente de la cartographie des zones inondables au Québec avant de dresser un portrait détaillé du site à l'étude. Le chapitre 2 est un article qui fait l'état de l'évolution de l'approche HGM au Québec depuis son émergence en 2007 jusqu'à son institutionnalisation. Le chapitre 3 correspond à la méthodologie employée pour cartographier les zones inondables de la plaine alluviale de la rivière Mitis. Enfin, le chapitre 4 est orienté sur une discussion mettant en avant la pertinence de l'approche HGM à son stade de développement le plus récent ainsi qu'une évaluation du niveau de confiance permettant de justifier l'élaboration de la démarche cartographique utilisée pour la rivière Mitis. Les résultats cartographiques sont le fruit d'une réflexion portant sur la compatibilité avec le cadre normatif de la politique de protection des rives du littoral et des plaines inondables de manière à anticiper leur utilisation locale par les acteurs de la MRC de La Mitis pour des fins de gestion et d'aménagement du territoire.

Mots clés : hydrogéomorphologie, plaine alluviale, zone inondable, rivière Mitis, cartographie, aléa, inondation, fréquence de crue, historique, gestion de l'aménagement.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	v
RÉSUMÉ.....	viii
TABLE DES MATIÈRES.....	x
Liste des tableaux.....	xv
Liste des figures.....	xviii
Liste des équations.....	xxvi
Liste des abréviations, des sigles et des acronymes.....	xxviii
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
CHAPITRE 1 PROBLÉMATIQUE, OBJECTIFS ET SITE D'ÉTUDE.....	4
1.1 PROBLÉMATIQUE.....	4
1.1.1 Origines et fondements de l'approche HGM.....	4
1.1.2 Histoire récente de la cartographie des zones inondables du Québec.....	8
1.2 OBJECTIFS.....	11
1.3 SITE D'ÉTUDE.....	13
1.3.1 Localisation du site d'étude.....	13
1.3.1 Contexte biophysique.....	15
1.3.2 Contexte humain.....	19
1.3.3 Historique des crues.....	25
1.3.4 Cartographie actuelle des zones inondables.....	32
1.3.5 Segmentation morphogénétique de la plaine alluviale à l'étude.....	33
CHAPITRE 2 ÉVOLUTION DE L'APPROCHE HGM AU QUÉBEC.....	41
2.1 RESUME.....	41

2.2	INTRODUCTION	42
2.3	ÉVOLUTION DES FONDEMENTS THEORIQUES DE LA CARTOGRAPHIE HGM	44
2.3.1	Application de la méthode HGM française	44
2.3.2	Développement d'une approche québécoise.....	48
2.4	INTEGRATION LEGISLATIVE ET INSTITUTIONNALISATION DE L'APPROCHE HGM	61
2.5	DEFIS ET DEVELOPPEMENTS FUTURS	71
2.6	CONCLUSION.....	74
	CHAPITRE 3 CARTOGRAPHIE HGM DE LA PLAINE ALLUVIALE DE LA RIVIERE MITIS	77
3.1	INTRODUCTION	77
3.2	CONCEPTS - OBJET D'ETUDE ET INDICATEURS	79
3.2.1	La plaine alluviale.....	79
3.2.2	Les indices de crue.....	80
3.2.3	Les indices de non-inondabilité	87
3.3	METHODOLOGIE.....	91
3.3.1	Rationnel méthodologique	91
3.3.2	Méthode géomorphologique	95
3.3.2.1	Acquisition des données	97
3.3.2.2	Délimitation de la plaine alluviale.....	98
3.3.2.3	Délimitation des unités HGM.....	99
3.3.3	Méthode historique	106
3.3.3.1	Acquisition des données	107
3.3.3.2	Analyse fréquentielle des débits de crue annuels de la rivière Mitis.....	110
3.3.4	Méthode complémentaire : l'analyse pédologique	116
3.3.5	Indices de crue validant le caractère inondable d'une surface.....	122
3.3.5.1	Laises de crue.....	122
3.3.5.2	Cicatrices glacielles	122
3.3.6	Rendu cartographique	123

3.4	RESULTATS.....	125
3.4.1	Analyse des indicateurs pédologiques.....	125
3.4.2	Cartographie HGM pour les tronçons amont et aval de la rivière Mitis	134
3.4.2.1	Optimisation de la méthode historique pour la cartographie HGM de la portion aval.....	134
3.4.2.2	Optimisation de l'analyse morphologique pour la cartographie HGM de la portion amont.....	139
3.4.3	Comparaison avec les cartographies en vigueur à la MRC.....	149
3.4.3.3	Comparaison avec la cartographie HHS	149
3.4.3.4	Comparaison avec la cartographie historique (pinceau large)	152
3.5	DISCUSSION.....	154
3.5.1	Sources d'incertitude.....	154
3.5.2	Recommandations pour la gestion de l'aménagement.....	159
3.5.2.1	Cartographie aval	159
3.5.2.2	Cartographie amont.....	162
3.5.2.3	Mentions générales.....	163
3.5.3	Conclusion.....	164
	CHAPITRE 4 DISCUSSION	166
4.1	PERTINENCE DE L'APPROCHE HGM.....	167
4.1.1	Améliore la compréhension des dynamiques fluviales	168
4.1.2	Considère l'intégrité de la plaine alluviale.....	169
4.1.3	Adaptée aux particularités du milieu.....	170
4.1.4	Compatible avec la législation	171
4.1.5	Cadre avec un mode de gestion intégrée et durable	173
4.1.6	Conclusion.....	174
4.2	ÉVALUATION DU NIVEAU DE CONFIANCE DU TRACE GEOMORPHOLOGIQUE	175
4.2.1	Description des concepts encadrant le niveau de confiance : imprécisions et incertitudes	176
4.2.2	Éléments nuisant à l'interprétation géomorphologique.....	179

4.2.3	Niveau de confiance de la cartographie HGM de la rivière Mitis	184
4.2.4	Avantages de l'utilisation d'un LiDAR	189
4.3	PARAMETRES POUVANT INTERVENIR SUR LA PERIODE DE VALIDITE ET L'INCERTITUDE DES LIMITES DE LA CARTOGRAPHIE HGM DE LA PLAINE ALLUVIALE DE LA RIVIERE MITIS	190
4.3.1	Gestion des barrages : régulation des crues	191
4.3.2	Constriction, obstruction et comblement de la plaine alluviale et du chenal : remblais, ponts et résidus de dragage	193
4.3.3	Excavation dans la plaine alluviale.....	200
4.3.4	Changement climatique et réponse hydrologique.....	201
4.3.5	Géométrie et rugosité du chenal et de la plaine alluviale	205
4.3.6	Perspectives sur la pérennité de la cartographie	207
4.4	CONCLUSION.....	209
	CONCLUSION GÉNÉRALE	210
	ANNEXES	215
	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	218

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 - Années de référence relevées lors de l'enquête de terrain menée auprès des riverains de la rivière Mitis en 2015.	29
Tableau 2 – Classification des types de plaine alluviale sans les facteurs géomorphologiques. Traduit et abrégée de Nanson et Croke, 1992.	35
Tableau 3 – Données utilisées pour le calcul de la puissance spécifique.....	38
Tableau 4 – Terminologie utilisée pour la cartographie HGM des aléas. Source : Demers et al., 2012.	49
Tableau 5 – Intégration des approches méthodologiques pour la cartographie de l'aléa d'inondation et l'application d'un cadre normatif pour l'aménagement du territoire. Source : Demers et al., 2014.	54
Tableau 6 – Clef hydrogéomorphologique des quatre modèles de la plaine alluviale fonctionnelle et des milieux humides alluviaux. Source : Demers et al., 2014.	55
Tableau 7 – Hiérarchisation des critères basés sur des notions d'aléa et d'intégrité pour la composition de l'espace d'inondabilité (EI). Source : Biron et al., 2013.	60
Tableau 8 – Synthèse de l'imbrication des approches hydrogéomorphologique, événementielle et hydraulique menant à la définition des zones inondables. Source : adapté de MDDELCC, 2015.	68
Tableau 9 – Principaux indices de crue utilisés en hydrogéomorphologie.	82
Tableau 10 – Méthodes employées pour calculer la distribution de fréquences.	113
Tableau 11 – Résultats de la distribution LPT3 et de la distribution régionale selon la méthode d'Anctil et al. (1998) pour la série de débits de la période 1924 – 2015.	114
Tableau 12 – Attributs pédologiques qui accompagnent et illustrent la variabilité de l'indice B.-W.	119

Tableau 13 - Limites de stabilité en position debout d'un individu en fonction du produit du rapport taille/poids ($H.M. = mkg$) sur le produit du rapport hauteur/vitesse d'écoulement ($D.V. = m^2/s^{-1}$). Source :. Cox et al., 2010..... 123

Tableau 14 – Informations obtenues lors de l'échantillonnage des sols des plaines alluviales de la rivière Mitis et du ruisseau Bernier. Les lignes colorées correspondent aux données qui furent retirées de l'analyse comparative (littérature/Mitis). Les lignes bleues correspondent aux pédons dont l'environnement proximal possède un ou plusieurs facteurs perturbateurs d'origine naturelle ou anthropique qui ont une influence sur le développement pédogénétique du sol. La ligne rose correspond à un indice B.-W. imprécis (> 10 ou < 10). Les lignes vertes correspondent aux pédons de la plaine alluviale du ruisseau Bernier dont le caractère est diachronique..... 126

Tableau 15 – Clef décisionnelle des classes de fréquence d'inondation. 141

Tableau 16 – Superficie occupée par chacune des unités HGM à l'intérieur des limites de la plaine alluviale et nombre de bâtiments associé à chacune d'entre elles. 149

Tableau 17 – Récapitulatif des superficies comparées des zones inondables HHS avec la zone inondable du MNZI. Les nombres colorés identifient des anomalies..... 151

Tableau 18 – Recommandations de gestion de l'aménagement émises en fonction du type d'aléa d'inondation associé aux unités HGM. 161

LISTE DES FIGURES

<p>Figure 1 – Localisation du site d'étude. 0 : barrage Mitis, 1 : barrage Mistigougèche, 2 : barrage des Eaux-Mortes, 3 : barrage de la Mitis-1, 4 : barrage de la Mitis-2.</p>	14
<p>Figure 2 – Carte des reliefs du bassin versant de la rivière Mitis (plaine côtière : surfaces transgressées par la mer de Goldthwait).</p>	16
<p>Figure 3 - Formes sédimentaires héritées en périphérie de la plaine alluviale des secteurs de Sainte-Angèle-de-Mérici (a : confluence Mitis/Neigette, b : confluence Neigette/Rouge) et de Sainte-Jeanne-d'Arc (c : confluence Mitis/Bernier).</p>	18
<p>Figure 4 – Barrage de la centrale Mitis-1 (numéro du barrage : X0000536). Source : Milieuinc.com, 2015.</p>	21
<p>Figure 5 - Barrage du lac Mitis (numéro du barrage : X0000543). Source : CEHQ, 2015b.</p>	23
<p>Figure 6 – Extrait du plan 6.2 (Les zones à risque d'inondation) du schéma d'aménagement et de développement de la MRC de La Mitis. Source : MRC de La Mitis, 2016.</p>	23
<p>Figure 7 – Archives évoquant les inondations de la rivière Mitis. (A) Photographie de la Collection des Jardins de Métis prise par Robert Wilson Reford entre 1900 et 1950. (B) Édition du 3 février 1955 de La Voix de Matane relatant les caprices de la rivière Mitis à Sainte-Angèle-de-Mérici.</p>	26
<p>Figure 8 - Illustrations parues dans la presse de la crue printanière du 5 mai 2011 (A et B) et de l'embâcle de glace du 9 mai 2014 (C) à Sainte-Angèle-de-Mérici.</p>	27
<p>Figure 9 – Aperçu de la crue du 5 mai 2011 dans la plaine alluviale de la rivière Mitis en face de l'exutoire de la rivière Neigette ($Q_{(moy)}$ à la centrale Mitis-1 : 433 m³/s). Source : MRC de La Mitis, 2011.</p>	31
<p>Figure 10 – Localisation des principaux sites touchés par les inondations de la rivière Mitis.</p>	32
<p>Figure 11 – Segmentation morphogénétique de la plaine alluviale de la rivière Mitis.</p>	37

Figure 12 – Illustration de la stabilité du chenal entre 1963 et 2014. Cercle : intervention anthropique correspondant à une déviation du chenal lors de la reconstruction de la route 132 en 1980; flèche : début d’un recouplement de méandre.	40
Figure 13 – Cartographies des aléas (A) et des risques d’inondation (B) dans un secteur de la vallée de la rivière au Renard. Source : Lelièvre et al., 2008.	46
Figure 14 - Cartographie des lits de la rivière Cap-Chat. Source : Demers et al., 2009.	47
Figure 15 – Cartographies (A) des aléas d’inondation de la plaine alluviale de la rivière Matane et (B) d’un exemple d’une proposition des zones de contrainte à l’aménagement qui leur sont associées (zonage faible non représenté). Source : Demers et al., 2012.	52
Figure 16 – Illustration des modelés principaux identifiés sur la plaine alluviale de la rivière Matane. Ér : érosion, Sed : sédimentation, St : stable. Les lignes discontinues indiquent une limite en transition. Source : Demers et al., 2014.	54
Figure 17 – Cartographies des modelés (A) de la plaine alluviale de la rivière Matane et des zones de contrainte à l’aménagement (B) qui leur sont associées. Adapté de : Demers et al., 2014.	55
Figure 18 - Exemples de cartographies hydrogéomorphologiques appliquées aux rivières de la Roche, Yamaska Sud-Est et Matane. Source : Biron et al., 2013.	57
Figure 19 - Exemples cartographiques de l’espace d’inondabilité appliqué aux rivières de la Roche, Yamaska Sud-Est et Matane. N1 = très fréquente et/ou avec fort courant (\approx 0-20 ans), N2 = fréquente de faible courant (\approx 20-100 ans) et N3 = peu fréquente (\approx >100 ans). Source : Biron et al., 2013.	58
Figure 20 – Variabilité longitudinale de la puissance spécifique sur la rivière Yamaska-Sud-Est (municipalité de Brigham). Adapté de : Biron et al., 2013.	61
Figure 21 – Carte des zones de grands et de faibles courants HGM de la rivière Bonaventure. Source : Marchand et al., 2014.	63
Figure 22 – Carte des hauteurs d’eau HGM de la rivière Bonaventure. Source : Marchand et al., 2014.	64

Figure 23 – A) Délimitation du bas du premier talus à partir d’une couche matricielle de pente. B) Reconstitution de l’inondation lors de la tempête post-tropicale Irène à partir des délaissés de crue. Source : MDDELCC, 2015.	67
Figure 24 – Cartographies des aléas fluviaux centrées sur les processus d’inondabilité et de mobilité. Source : MDDELCC, 2015.....	70
Figure 25 – Cartographie des zones inondables de grand courant, de faible courant et de l’espace de liberté. Source : MDDELCC, 2015.	70
Figure 26 – Localisation des cartographies HGM ou utilisant les prémisses de l’approche HGM des cours d’eau du Québec.	74
Figure 27 - Schéma conceptuel intégrant les limites de la plaine alluviale et de la plaine inondable. Adapté de : Freinet, 2013.....	80
Figure 28 – Profil stratigraphique d’un sol mature typique de la plaine alluviale de la rivière Mitis. O (ou LFH) = horizon organique ou litière forestière.	90
Figure 29 – Composantes de l’approche HGM et facteurs qui ont participé à la configuration amont/aval du rationnel méthodologique.	93
Figure 30 – Localisation des cartographies amont et aval.	95
Figure 31 – Étalement urbain (polygones rouges) et alternatives pour contourner l’obstruction anthropique des unités HGM. 1) Extrapolation temporelle : la forme A, qui est beaucoup moins apparente sur les imageries satellite de 2014 et LiDAR de 2009, a pu être délimité à partir de la série photographique de 1963 antérieure aux installations anthropiques. 2) Extrapolation spatiale : à défaut de pouvoir recourir à cette première alternative, il reste la possibilité d’effectuer un tracé approximatif de la forme A en affichant l’altitude d’un MNT (exprimée ici par un dégradé de couleurs) avec une résolution spatiale suffisamment fine pour extrapoler les limites morphologiques d’une forme distincte (forme B) en rive opposée à l’aide de la topographie.	97
Figure 32 – Matrice des pentes.	99
Figure 33 – Dépressions humides ou surfaces d’exfiltration situées en périphérie de la plaine alluviale de la rivière Mitis. Unités HGM délimitées à l’aide de la topographie du LiDAR (A) et des surfaces inondées sur les images satellites	

Google Earth du 05/05/2014 (B). Les étoiles correspondent à des points de validation pédologique où un entourage a pu être constaté avec présence de la nappe en surface.....	101
Figure 34 – Formes fluviales périphériques. (A) profil longitudinal en forme convexe et légèrement exponentielle d'un cône alluvial. (B) petite vallée affluente.	103
Figure 35 – Situation où l'interprétation géomorphologique n'est pas possible. (A) photographie aérienne de 1963 de faible résolution topographique avec infrastructures et activités humaines obstruant la plaine alluviale. (B) LiDAR de 2009 avec impossibilité d'interpréter la géomorphologie en raison de l'étalement urbain. Les lignes pointillées indiquent les lignes droites raccordant les limites géomorphologiques périphériques connues. (C) image satellite Google Earth de 2014. ...	105
Figure 36 - Compilation des débits testant la représentativité des débits de la rivière Rimouski pour la rivière Mitis et des débits transposés de la rivière Rimouski vers la rivière Mitis. Représentativité : comparaison des débits journaliers (Q) des rivières Mitis et Rimouski entre 1968 et 1984 aux mêmes dates (n = 16). Transposition : transfert de 15 années de débits de la station hydrométrique de la rivière Rimouski vers la station hydrométrique de la centrale de Price.	111
Figure 37 - Comparaison des débits de récurrence 2 - 100 ans des distributions de LPT3 et d'Anctil et al. (1998) pour les mêmes récurrences (n = 11).	115
Figure 38 – Hydrogramme des débits maximums annuels journaliers moyens de 1924 à 2015. Les lignes verte, orange et rouge représentent les seuils de récurrence obtenus à l'aide de la distribution de LPT3.	116
Figure 39 – Différence de coloration entre des sols prélevés à différentes hauteurs dans la plaine alluviale. (1) sol prélevé à un niveau alluvial annuellement inondé (indice B.-W. = 6); (2) sol prélevé à environ 1,5 m au-dessus du sol 1 (indice B.-W. = 9); (3) sol prélevé à un environ 1 m au-dessus du sol 2 (B.-W. = 18 à 32).	120
Figure 40 – Profils de sol saturé en eau ou influencé par le battement de la nappe phréatique. (A) sol organique, (B) sol hydromorphe (Ruellan, 1985).	121
Figure 41 - Diagramme représentant la moyenne des valeurs de l'indice B.-W. en fonction de la distance altitudinale relative par rapport au chenal. Ae : horizon cendré, Proche : ~ 0-2 m, Intermédiaire : ~ 2-4 m, Éloigné : ~ > 4m.....	130

- Figure 42 – Exemple illustré de l’insertion du stade de développement des sols (indice B.-W.) dans le profil topographique transversal de plaine alluviale de la rivière Mitis. C : chenal, DAR/C : distance altitudinale relative par rapport au chenal, P : proche, I : intermédiaire, É : éloignée. Un point noir à l’intérieur d’un cercle blanc indique la présence d’un horizon Ae. 132
- Figure 43 - Extrait cartographique représentant la validation des zones non inondables à l’aide de l’analyse pédologique. Zone bleue : zone inondable ; zone jaune : zone dont le caractère inondable est incertain ; ligne rouge : limite de la plaine alluviale ; cercle blanc : pédon ; point noir : présence d’un horizon cendreuse ; nombre noir : numéro du pédon ; nombre blanc : indice B.-W. 133
- Figure 44 – Vue en plan d’un MNZI. Source : Montané, 2014. 134
- Figure 45 – Profils en Long de Zones Inondables (PLZI) construits à partir de l’altitude maximale des repères historiques projetée vers l’amont de la rivière Mitis. 135
- Figure 46 – Cartographie de l’aléa d’inondation dans la section aval de la plaine alluviale de la rivière Mitis. Classification du MNZI choisie en fonction du seuil de stabilité d’un individu en position debout dans une hauteur d’eau donnée : 0,5 m - la stabilité d’un enfant est compromise; 0,8 m - la stabilité d’un adulte (moyen) est compromise; 1,2 m - la stabilité d’un secouriste est compromise. 138
- Figure 47 - Détermination de la fréquence de crue des unités HGM contenant des milieux humides (délimitées par des lignes blanches : A) et des chenaux de débordement (photo oblique) à partir des surfaces inondées des images satellites du 5 mai 2014 (B). L’unité HGM représentée en orange (A) est associée à une fréquence d’inondation 0-2 ans. 144
- Figure 48. Cartographie de l’aléa d’inondation dans la section amont de la plaine alluviale de la rivière Mitis. 147
- Figure 49 – Comparaison de la zone inondable 0-15 ans du MNZI aux zones inondables 0-20 ans et 20-100 ans de la cartographie HHS du secteur proximal au périmètre urbain de Sainte-Angèle-de-Mérici. 150
- Figure 50 – Exemples d’anomalies identifiées dans la cartographie HHS et de différences cartographiques constatées entre les cartographies HGM et HHS. Flèches vides : reliefs négatifs topographiquement connectés à des zones inondées par

débordement; Flèches pleines : reliefs négatifs topographiquement déconnectés des zones inondées par débordement. 152

Figure 51 – Comparaison des zones inondables de la cartographie HGM à la zone inondable de la cartographie historique de la MRC de La Mitis réalisée avec la méthode du « pinceau large » dans un secteur représentatif. Les flèches indiquent des surfaces inondables qui ne devraient pas l'être en raison de leur élévation importante. 153

Figure 52 – Illustration des incohérences topographiques du tracé de la cartographie historique des zones inondables de la MRC de La Mitis réalisée avec la méthode du « pinceau large ». 154

Figure 53 – Cartographie aval du secteur du lac Ouellet. Cercle rouge : sous-estimation de l'étendue de l'inondation par embâcle de glace de 1994. 155

Figure 54 – Extrait de profils en long de zones inondables (PLZI) identifiant les incongruités constatées sur la cartographie des zones inondables dans le secteur du lac à Ouellet. Cercle rouge : altitude du PLZI de la crue de 2011 approximative à celle de l'embâcle de glace de 1994. Lignes en pointillés rouges : point d'inflexion dans la pente du lit. 157

Figure 55 – Illustration de la procédure recommandée pour modéliser le niveau d'eau d'un réservoir de barrage. Étoile : repère historique. Point rouge et ligne pointillée rouge : transect de points d'élévation. 159

Figure 56 – Application des concepts d'imprécision et d'incertitude à la cartographie des zones inondables. Source : Montané, 2014. 177

Figure 57 – Schématisation des paramètres influençant le niveau de confiance d'une cartographie HGM. Source : Montané, 2014. 179

Figure 58 – Échelles spatiales et temporelles de l'ajustement des formes fluviales. D'après Knighton, 1984. Source : Pinto Martins, 2008. 183

Figure 59 – Démarche et résultats de l'estimation du niveau de confiance des segments de plaine alluviale des rivières Mitis et Neigette. 186

Figure 60 – Débit (m^3/s), température ($^{\circ}C$) et précipitation (mm) enregistrés entre le 1er janvier et le 26 mai 2015. Sources : Hydro-Québec (débits à la centrale

Mitis-1) et Gouvernement du Canada (températures et précipitations à Mont-Joli), 2015.	193
Figure 61 – Illustration des principaux types de remblai rencontrés dans la plaine alluviale de la rivière Mitis. a) remblais d’infrastructure routière; b) remblais d’infrastructure résidentielle contigus à un remblai routier.	195
Figure 62 - Remblai contigu correspondant à un ancien site d’enfouissement de résidus de bois de la scierie de la compagnie Bowater (B). Les lignes pointillées correspondent aux limites d’un paléo-chenal (A).	196
Figure 63 – Constriction de la plaine alluviale de la rivière Mitis causée par le rehaussement de la route 132 en 1980 et la présence du pont Marcel (P) construit en 1936.	198
Figure 64 – Résidus de dragage endiguant le chenal de la rivière Mitis.	199
Figure 65 – Excavation dans la plaine alluviale de la rivière Neigette correspondant à un banc d’emprunt (gravière).	200
Figure 66 – (A) Températures moyennes annuelles (°C) de 1953 à 2014, (B) précipitations totales annuelles (mm) de 1955 à 2014 et (C) débits maximums annuels (m ³ /s) de 1950 à 2012 provenant de la station météorologique de Rimouski et des stations hydrométriques 02QA010 et 02QA002 de la rivière Rimouski. Source : Gouvernement du Canada, 2016.	202
Figure 67 – Pluie totale (mm) en fonction de la saison pour les périodes de 1953 à 1972, 1973 à 1992 et 1993 à 2012 provenant de la station de Rimouski. Source : Gouvernement du Canada, 2015.	204

LISTE DES EQUATIONS

Équation 1 - Équation de la puissance spécifique (Nanson et Croke, 1992). Où ω représente la puissance spécifique (W/m^2), ρ la densité de l'eau ($\approx 1000 \text{ kg/m}^3$), g l'accélération due à la gravité (9.8 m/s^2), Q un débit (m^3/s), S une pente d'énergie (m/m), et w une largeur de cours d'eau (m). 35

Équation 2 – Équation de la méthode du transfert de bassin versant (CEHQ, 2015). Où Q_{T2} représente un débit de crue de récurrence T au site de la centrale de Price, Q_{T1} un débit de crue de récurrence T au site de la station 022003 situé sur la Rimouski, A_1 la superficie du bassin versant du site donneur (Rimouski - secteur A20 : 1615 km^2) et A_2 la superficie du bassin versant du site receveur (Mitis - centrale de Price : 1800 km^2). 111

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

AZI	atlas des zones inondables.
B.-W.	Buntley-Westin (indice).
CEHQ	Centre d'expertise hydrique du Québec.
DECCW	Department of Environment, Climate Change and Water.
EMA	Emergency Management Australia.
HGM	hydrogéomorphologie (approche).
HHS	hydrologique, hydraulique et statistique (approche).
IRDA	institut de recherche et de développement en agroenvironnement.
LGDF	laboratoire de géomorphologie et dynamique fluviale.
MAMROT	ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire.
MDDEFP	ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs.
MDDELCC	ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (ou anciennement MDDEFP).
MNLE	modèle numérique de ligne d'eau.
MNZI	modèle numérique des zones inondables.
MSP	ministère de la Sécurité publique.
PACES	programme d'acquisition des connaissances sur les eaux souterraines.
PAF	plaine alluviale fonctionnelle.

PANF	plaine alluviale non fonctionnelle.
PDCC	programme de détermination des cotes de crue (de récurrence 20 ans et 100 ans).
PLZI	profil longitudinal de zones inondables.
PPRI	plan de prévention des risques d'inondation.
PPRLPI	politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables.
SAD	schéma d'aménagement et de développement.
SIEF	système d'information écoforestière.
UQAR	Université du Québec à Rimouski.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La cartographie des zones inondables connaît d'importants changements depuis les trente dernières années. Au Québec comme ailleurs, la modélisation hydraulique constituait la seule issue pour cartographier l'aléa d'inondation permettant l'identification de niveaux d'inondation. Cependant, les changements climatiques et quelques autres lacunes tels que l'absence de prise en compte du morphodynamisme des cours d'eau ont poussé à réfléchir sur la conception de méthodes alternatives ou complémentaires à l'approche hydraulique qui permettraient de mieux intégrer l'ensemble des mécanismes fondamentaux à l'hydrogéomorphologie des plaines alluviales.

Ce projet de maîtrise qui en soit est autonome, s'inscrit dans un projet plus large de cartographie des espaces de liberté des cours d'eau piloté par Simon Massé, étudiant au doctorat au *laboratoire de géomorphologie et de dynamique fluviale* (LGDF) à l'*Université du Québec à Rimouski* (UQAR). Le *ministère de la Sécurité publique* (MSP), qui en est le porteur financier, cherche à promouvoir une méthode complémentaire à l'approche hydraulique. La cartographie *hydrogéomorphologique* (HGM) des zones inondables, qui est comprise dans la cartographie des espaces de liberté, est l'objet central dont traite le présent mémoire. L'application de la cartographie HGM à la plaine alluviale de la rivière Mitis fait suite à une réflexion qui mûrit depuis 2007, année de l'émergence de la cartographie HGM au Québec. Ce projet participe donc au développement des connaissances sur la cartographie HGM sur le territoire du Québec méridional. Il contribue également à parfaire et alimenter un second volet financé par le MSP sur le transfert de l'expertise HGM vers le secteur privé.

Ce mémoire est structuré selon les normes de représentation d'un mémoire par article. Le chapitre 1 traite de la problématique en abordant dans un premier temps les origines et les fondements de l'approche HGM et l'histoire récente de la cartographie des

zones inondables au Québec avant de dresser un portrait détaillé du site à l'étude. Le chapitre 2 est un article qui fait l'état de l'évolution de l'approche HGM au Québec depuis son émergence en 2007 jusqu'à son institutionnalisation. Le chapitre 3 est un chapitre autonome qui a été structuré dans le but d'en faire éventuellement un article, mais qui dans le cadre du mémoire est beaucoup plus exhaustif. Il présente la méthodologie employée pour cartographier des zones inondables de la plaine alluviale de la rivière Mitis ainsi que des résultats et une discussion. Enfin, le chapitre 4 est tourné vers une discussion mettant en avant la pertinence de l'approche HGM à son stade de développement le plus récent ainsi qu'une évaluation du niveau de confiance permettant de justifier l'élaboration de la démarche cartographique utilisée pour la rivière Mitis.

CHAPITRE 1

PROBLÉMATIQUE, OBJECTIFS ET SITE D'ÉTUDE

Le chapitre 1 inclut la problématique, les objectifs, une explication de la structure du mémoire et une description détaillée de l'environnement du site d'étude. La problématique permettra de mettre en contexte et d'étayer la pertinence des objectifs proposés dans le cadre de ce mémoire.

1.1 PROBLEMATIQUE

Cette partie met d'abord en exergue l'origine et les fondements de l'approche hydrogéomorphologique, une approche développée en parallèle par plusieurs géomorphologues devant la contribution potentielle de leur discipline pour la cartographie des zones inondables. L'histoire récente de la cartographie des zones inondables soulignera ensuite l'importance de considérer cette approche complémentaire aux approches traditionnelles, mais aussi la nécessité de développer et d'adapter celle-ci au contexte québécois.

1.1.1 Origines et fondements de l'approche HGM

Le terme « hydrogéomorphologie » contient les racines des mots « géomorphologie » et « hydrologie ». Ceux-ci ont pour particularité d'être des disciplines qui se distinguent l'une de l'autre par leur domaine d'intérêt, soit l'étude des formes et des processus à la surface de la Terre et l'étude des propriétés de l'eau, de ses réservoirs et de ses échanges à

la surface de la Terre. Par le fait même, l'hydrogéomorphologie peut être désignée comme science interdisciplinaire (Scheidegger, 1973).

Dans le présent mémoire et probablement au-delà, la géomorphologie fluviale et l'hydrogéomorphologie sont utilisées comme synonyme. Cependant, d'un point de vue épistémologique, il est important de préciser que l'hydrogéomorphologie est une extension disciplinaire plus englobante que la « géomorphologie fluviale ». Depuis le début des années 2000, l'hydrogéomorphologie prend davantage de place dans l'enseignement des départements de géographie où elle est désormais appréciée en tant que science intégrative (approche systémique) à l'interface des sciences de la terre, de la géographie physique et de l'ingénierie hydraulique. Elle apporte des compléments d'information à de nombreux champs disciplinaires tels que l'écologie, la chimie, l'hydrologie ainsi qu'une meilleure compréhension de notre environnement. Elle permet d'étudier tout ce qui a trait à l'environnement physique des cours d'eau, et ce, à travers différents niveaux de perception temporels et spatiaux. Toutes surfaces soumises à un écoulement, qu'il soit de l'ordre du ruissellement, du ravinement ou encore du torrent de montagne jusqu'au fleuve qui s'écoule dans la mer par un large estuaire, justifient l'intérêt de l'hydrogéomorphologue. L'hydrogéomorphologie fournit également plusieurs outils et méthodes pour quantifier l'influence des changements climatiques sur l'environnement fluvial. Aussi, elle offre des cadres d'analyses qui s'avèrent nécessaires à la restauration des écosystèmes riverains ainsi qu'à l'aménagement et la gestion durable du territoire (Arnaud-Fassetta et al., 2009; Biron et al., 2013).

L'approche hydrogéomorphologique (HGM) ou la cartographie HGM utilise les fondements de la géomorphologie fluviale, car elle est basée sur l'étude et la cartographie des aléas liés à l'eau auxquels sont principalement associées les inondations, l'aggradation et l'érosion des berges. Elle s'effectue par le biais de l'analyse des formes et des dépôts sédimentaires laissés par la dynamique fluviale à l'intérieur de la *plaine alluviale fonctionnelle* (PAF). En débordant sur la plaine alluviale et en s'y déplaçant, le cours d'eau

laisse des indices utiles pour la cartographie des zones inondables, tels que des chenaux et des dépôts de débordements.

L'approche HGM est une approche « naturaliste » qui suit une démarche inductive (Ballais et al., 2011b; Buffin-Bélanger et al., 2012). En effet, elle se base sur l'observation des caractéristiques morphogènes de la plaine alluviale pour tirer ses conclusions. D'autre part, comme elle s'appuie essentiellement sur l'interprétation des formes, qui sont induites par la nature hydraulique des écoulements, il s'agit plutôt d'une démarche qualitative que d'une démarche quantitative (Buffin-Bélanger et al., 2012). Par le fait même, l'observateur fait preuve d'une certaine subjectivité au moment de l'interprétation. Toutefois, cette subjectivité provient d'un jugement basé sur l'expérience même du géomorphologue, qui elle-même est construite sur des connaissances fondées. Il n'existe pas encore de démarche stricte et rigide dans l'emploi de l'approche HGM. C'est pourquoi l'hydrogéomorphologue doit l'adapter aux conditions du milieu qu'il aborde et faire preuve d'un bon jugement. L'expertise de l'hydrogéomorphologue est donc prédominante dans l'application de l'approche HGM. Ainsi, en appuyant l'approche HGM sur les fondements de la géomorphologie fluviale, il est possible de converger vers une interprétation réciproque du milieu tout en cheminant à travers une démarche scientifique.

Ces constats nous amènent à souligner l'appartenance de l'approche HGM à la géographie classique. Également, cette approche semble davantage intégrer les sciences idiographiques et rejoindre les écoles de pensée allemande et française qui croient énormément en l'interprétation génétique (Bailly et al., 2001). À l'évidence, c'est l'unicité intrinsèque propre à chacun des cours d'eau qui rend sa standardisation complexe et qui par le fait même la rend moins proche des sciences nomothétiques.

C'est seulement au début des années 70, à la suite d'une remise en question de la méthode hydraulique de détermination des zones inondables¹ que la communauté scientifique commença à intégrer progressivement les principes fondamentaux de la géomorphologie fluviale dans le processus cartographique des inondations. Dès lors, des

¹ La raison de cette remise en question est développée dans le prochain paragraphe.

méthodes basées sur des indicateurs botaniques, pédologiques et géomorphologiques du paysage fluvial furent développées (Baker, 1976; Wolman, 1971). Vers la fin des années 80, la stratigraphie séquentielle et la dendrochronologie ont conjointement commencé à être utilisées aux côtés de la méthode hydraulique dans le but de préciser la fréquence des crues. En effet, ces techniques permettent d'obtenir des cotes de crue et de situer les aléas dans le temps à partir d'indices d'inondations récents, passés et anciens (aussi appelés *paleostage indicators* en anglais) (Jarret et England, 2002). Qu'elle procède par inférence ou qu'elle s'oriente à partir des formes et des processus actuels, la cartographie HGM permet une meilleure compréhension des aléas d'inondation présents et futurs (Demers et al., 2012).

Au début des années 80, les Français développent une approche HGM pour les cours d'eau méditerranéens. Cependant, ce n'est seulement qu'à partir des années 90 que cette approche suscite un intérêt législatif pour la gestion des aléas fluviaux. En effet, c'est en 1996 que celle-ci est reconnue par l'État français comme méthode conventionnelle de cartographie des zones inondables sous le nom de *Méthode hydrogéomorphologique de détermination des zones inondables*² (DIREN, PACA, 2007).

Selon Ballais et al. (2011), l'État français cherchait à trouver une alternative aux coûteuses et lourdes analyses mathématiques de la modélisation hydraulique, car l'approche hydraulique de détermination des zones inondables était employée en toutes circonstances quel que soit le degré de l'enjeu. Son application répétée sur des tronçons de faibles enjeux engageait des dépenses inappropriées. De plus, l'insuffisance de données hydrologiques observée sur certains bassins versants ne permettait pas de cartographier avec précision les limites des inondations. Le succès des nombreuses applications de la Méthode HGM sur des cours d'eau du Midi méditerranéen suscita l'intérêt de l'appliquer à d'autres environnements interne et externe à la France (Ballais et al., 2011b; Demers et al., 2014; Dupont et al., 2005; Lastra et al., 2008; Wulamu et al., 2013; Hallouche et al., 2010). Cependant, comme la Méthode HGM a été conçue pour des plaines alluviales qui suivent

² Nommée par la suite Méthode HGM française.

une représentation topographique de lits imbriqués, elle est difficilement applicable aux plaines alluviales dont la configuration diffère (Demers et al., 2014).

Au Québec, il faudra attendre l'évènement dramatique de Rivière-au-Renard en 2007 pour voir émerger l'approche HGM dans la cartographie des zones inondables. Vingt-quatre ans après les premiers développements de la Méthode HGM française, le Québec investit dans la recherche afin de bonifier la cartographie des zones inondables et ainsi renforcer la sécurité sur son territoire. C'est pourquoi dès 2007 le LGDF de l'UQAR par l'entremise de subventions provenant du ministère de la Sécurité publique développe une approche HGM adaptable aux conditions intrinsèques des cours d'eau du Québec méridional. Dans le cas des rivières Matane et Bonaventure, la cartographie HGM fut développée de façon à rejoindre le cadre normatif de la *politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables* (PPRLPI).

Huit années se sont écoulées depuis l'émergence de l'approche HGM au Québec. Aucune recension d'écrits ne fait état du cheminement emprunté, des réflexions et des grandes conclusions qui ressortent de cette période. Un tel travail a déjà été effectué par Montané (2014) et Goutx (2014) pour ce qui est de l'approche HGM développée en France, mais rien de comparable n'a encore été fait au Québec. C'est pourquoi le premier objectif spécifique de ce mémoire sera de traiter de l'évolution de l'approche HGM sur le territoire du Québec.

1.1.2 Histoire récente de la cartographie des zones inondables du Québec

Entre 1990 et 2011, le Québec a connu 27 inondations de grandes ampleurs (INSPQ, 2014). En 1996, les averses torrentielles qui s'abattaient dans la région du Saguenay causaient plus d'un milliard de dollars de dégât. Ce déluge provoqua la mort de 10 personnes et l'évacuation de 15 800 résidents (INSPQ, 2014; Parlement du Canada, 2014). À la suite de l'ampleur de ces inondations, le gouvernement mit en place le *programme de*

détermination des cotes de crue de récurrence 20 ans et 100 ans (PDCC) afin de poser les mesures nécessaires pour éviter que de tels dégâts se reproduisent. Ce programme préconisait une approche de type HHS dont l'acronyme est construit à partir des termes hydraulique, hydrologique et statistique qui décrivent les méthodes sur lesquelles elle se base. La démarche cartographique des zones inondables de l'approche HHS propose l'analyse fréquentielle de séries de débits conjointe à une transposition topographique des cotes de crue via la méthode de relation « niveau-débit » ou la modélisation hydrodynamique (CEHQ, 2014). Bien que le PDCC soit désormais révolu, sa démarche cartographique est toujours reconnue par la PPRLPI comme approche conventionnelle.

La PPRLPI reconnaît aussi l'approche historique, une méthode cartographique depuis longtemps employée au Québec pour délimiter les zones inondables. Cette méthode dite du pinceau large, bien que rudimentaire, est la méthode conventionnelle qui s'apparente le plus aux principes de base de l'approche HGM. Son application repose sur l'inventaire de repères historiques obtenus auprès des riverains et dans les archives documentaires. La position géographique de ces repères permet de reporter une cote altimétrique directement sur une carte topographique. La précision des zones inondables cartographiées varie d'un site à l'autre, car elle dépend de la qualité et de la quantité des données ainsi que du niveau de rareté de la crue qui a généré le repère (CEHQ, 2014). L'approche historique identifie la limite maximale des inondations connues, mais ne permet pas de subdiviser la PAF comme le permettent l'approche HHS et l'approche HGM.

La Loi sur l'aménagement et l'urbanisme (Gouvernement du Québec, 2014) impose aux municipalités régionales de comté (MRC) et aux municipalités de déterminer les zones où l'occupation des sols est soumise à la contrainte des inondations. C'est pourquoi elles doivent suivre les recommandations de la PPRLPI concernant la cartographie des zones de grand courant (débits de récurrence 0-20 ans) et de faible courant (débits de récurrence 20-100 ans). Cependant, l'approche HHS qui sous-tend cette cartographie est conçue pour des environnements statiques en condition d'eau libre. Son application sur des tronçons dynamiques ou propices aux embâcles s'avère donc inadéquate. Et surtout depuis que les changements climatiques ont tendance à forcer la réponse hydrologique des cours d'eau.

Par conséquent, de plus en plus d'inondations surviennent au-delà des limites cartographiques des zones inondables (c.f. Lelièvre et al., 2008). Pourtant, cette cartographie est censée être une norme minimale et préliminaire, mais elle perdure en raison de l'absence d'alternatives méthodologiques (Demers et al., 2014).

Ces dernières décennies et non seulement au Québec, les méthodes HHS ont été beaucoup plus sollicitées que les méthodes basées sur les principes fondamentaux des sciences géomorphologiques. Dans son article controversé, Baker (1994) dénonce les solutions palliatives proposées par l'ingénierie hydraulique comme responsable de l'accroissement du risque d'inondation constaté. Selon lui, celles-ci omettent l'intégrité des mécanismes fluviaux, car elles sont issues de concepts basés sur des théories généralistes considérées immuables. Or, les changements climatiques ont transformé les circonstances du passé et c'est pourquoi ces théories ne sont plus représentatives des conditions actuelles. De plus, les modèles ont tendance à surestimer l'étendue des crues de haute récurrence et à sous-estimer les crues de faible récurrence lorsqu'ils sont comparés aux limites réelles des inondations confirmées par les indices de crue sur le terrain (Lastra et al., 2008). Forcés de constater que les inondations surpassent de plus en plus les limites des zones inondables estimées par les modèles hydrauliques, les gestionnaires n'ont pas d'autres choix que d'ajuster leur approche aux nouvelles conditions du territoire (Baker, 1994; Demers et al., 2014). Pourtant, en 1971, Wolman évoquait déjà la nécessité de trouver une alternative à la méthode hydraulique de détermination des zones inondables.

Toutefois, ce n'est pas pour autant qu'il faut bannir l'approche HHS du processus cartographique des zones inondables. Bien au contraire, lorsque les modèles sont correctement paramétrés et calibrés, ils peuvent s'avérer particulièrement complémentaires à l'approche HGM. En effet, les secteurs où la qualité et la disponibilité des informations ne permettent pas l'applicabilité optimale de l'approche HGM, l'approche HHS se révèle incontournable pour combler les vides d'interprétation morphologique (Lastra et al., 2008). Par le fait même, l'inverse est également possible. En effet, une cartographie HHS peut

également faire appel à l'approche HGM pour compléter ou valider les résultats obtenus par modélisation.

Le portrait historique de la cartographie post-HGM des zones inondables du Québec justifie ici la nécessité d'appliquer la cartographie HGM des zones inondables de façon intégrée. Cette vision d'intégration est traitée dans le second objectif du mémoire qui propose l'élaboration d'une cartographie HGM des zones inondables adaptée au contexte de la plaine alluviale de la rivière Mitis. Dans cet objectif, la cartographie HGM est vue comme une démarche cartographique combinant différentes méthodes dans le but de parvenir à une cartographie des zones inondables des plus exhaustives et de manière à pouvoir renforcer le niveau de confiance de celle-ci et d'en augmenter son étendue.

1.2 OBJECTIFS

L'objectif principal de ce mémoire est de contribuer au développement de la cartographie HGM sur des cours d'eau du Québec méridional. Pour cela, deux objectifs spécifiques, déjà identifiés dans la description de la problématique, sont mis de l'avant et explicités ici.

Objectif spécifique 1

Le premier objectif spécifique vise à dresser un portrait de l'évolution de la cartographie HGM au Québec. Pour cela, l'état de la divergence dans l'utilisation de l'approche HGM au Québec est abordé et traité à travers un portrait détaillé de l'évolution de la cartographie HGM des zones inondables de 2007 à 2015. Un tel exercice est important à faire pour éviter que ne perdurent des informations des premières versions de l'approche HGM. Cet objectif spécifique met en évidence la nécessité d'adapter la cartographie à l'unicité de chaque cours d'eau, mais laisse entrevoir la possibilité d'une standardisation de l'approche et par le fait même une intégration législative envisageable.

Objectif spécifique 2

Le deuxième objectif spécifique vise à appliquer la cartographie HGM à un tronçon de plaine alluviale de la rivière Mitis. Pour cela, les méthodes géomorphologique, historique et pédologique sont utilisées. La part active ou le potentiel cartographique de ces méthodes dans le processus d'identification des zones inondables et fonctionnelles de la plaine alluviale de la rivière Mitis y est évalué. La variabilité longitudinale au sein d'un même tronçon fluvial oblige à adopter une segmentation contenant autant de démarches cartographiques que de segments homogènes avec des particularités différentes. À travers cet objectif spécifique ressort la nécessité de combiner plusieurs méthodes dans le but d'obtenir une cartographie continue et robuste de l'aléa d'inondation.

Les objectifs spécifiques visent à faciliter l'intégration de l'approche HGM au cadre normatif de la PPRLPI et à valoriser l'expertise hydrogéomorphologique dans le processus de cartographie des zones inondables.

Le mémoire se structure sous forme d'articles. Les chapitres 2 et 3 répondent respectivement aux objectifs spécifiques 1 et 2. Le chapitre 2 comporte un article synthèse du développement de l'approche HGM au Québec qui sera soumis à la *Revue canadienne des ressources hydriques*. Le chapitre 3 est un chapitre autonome structuré sous la forme d'un article en vue d'être éventuellement publié, mais qui dans le cadre du mémoire est beaucoup plus exhaustif. Celui-ci expose le projet de cartographie des zones inondables par l'approche HGM avec les concepts, la méthodologie, les résultats et la discussion. Le chapitre 4 est un chapitre ouvert qui se base sur des éléments de discussion tels que la pertinence d'une telle approche, le niveau de confiance du tracé géomorphologique dans la démarche cartographique des zones inondables de la plaine alluviale de la rivière Mitis et les paramètres qui peuvent influencer la durée de vie de la cartographie des zones inondables.

1.3 SITE D'ÉTUDE

1.3.1 Localisation du site d'étude

Le secteur d'étude est situé dans l'est du Québec dans la MRC de La Mitis (Figure 1). Le projet de cartographie compte près de 42 km de cours d'eau, dont les rivières Mitis, Neigette, Mistigouèche, Rouge et le ruisseau Bernier font partie. Six municipalités sont concernées. Il s'agit des municipalités de Price, Mont-Joli, Saint-Octave-de-Métis, Saint-Joseph-de-Lepage, Saint-Angèle-de-Mérici et Sainte-Jeanne-d'Arc. Le tronçon sélectionné, et le bassin versant en général, possède un riche héritage d'occupation du territoire et des propriétés biophysiques contribuant de manière significative à sa réponse hydrologique. Les prochaines sections explorent les contextes humain et physique du bassin versant de la rivière Mitis ainsi que l'historique des crues, la cartographie actuelle des zones inondables et la segmentation morphogénétique de la plaine alluviale du tronçon à l'étude.

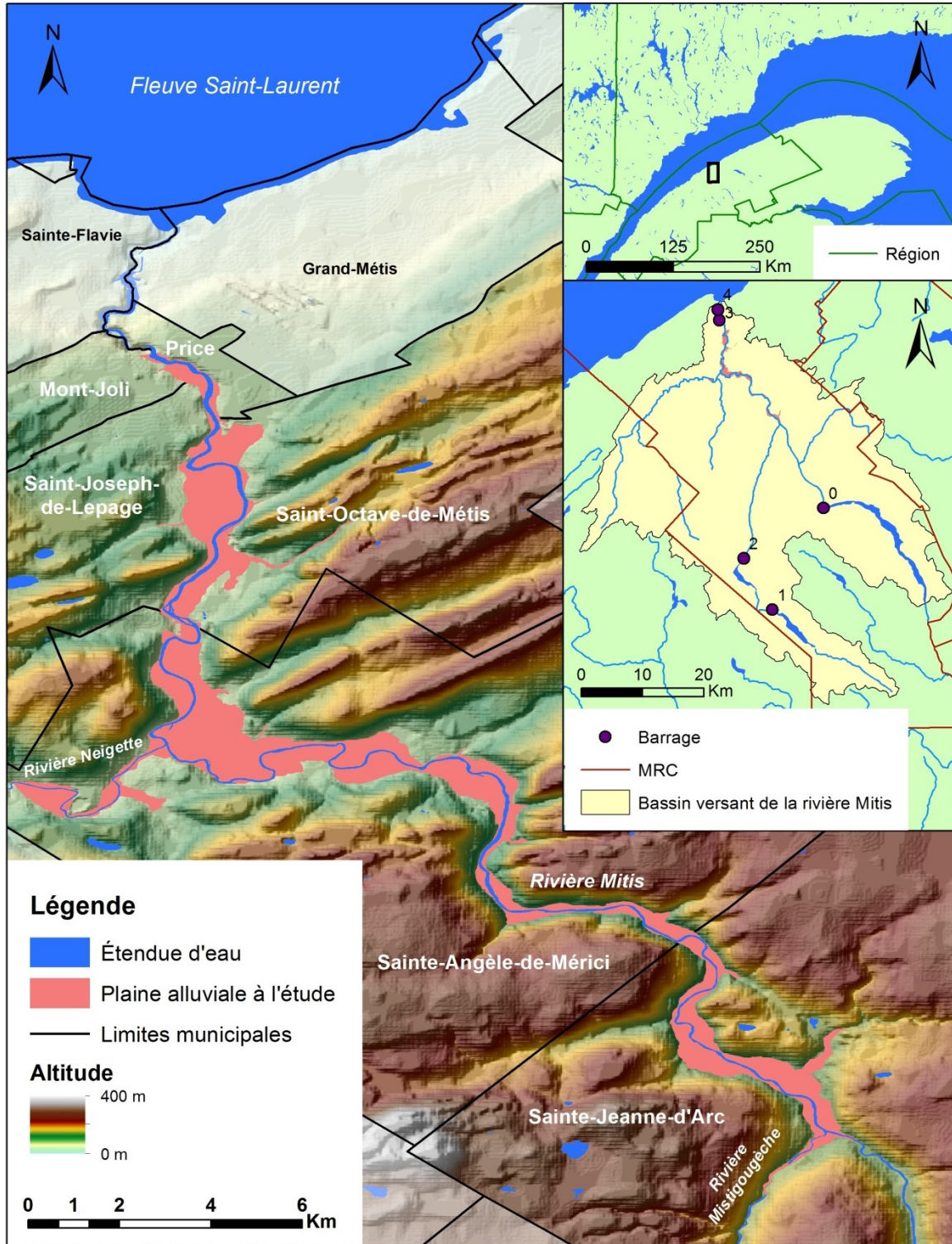


Figure 1 – Localisation du site d'étude. 0 : barrage Mitis, 1 : barrage Mistigouèche, 2 : barrage des Eaux-Mortes, 3 : barrage de la Mitis-1, 4 : barrage de la Mitis-2.

1.3.1 Contexte biophysique

Le bassin versant de la rivière Mitis est situé dans la chaîne des Appalaches à cheval sur les orogènes taconien et acadien (Figure 2). Il couvre une superficie de 1828 km² et contient les sous-bassins versants des rivières Mitis (788 km²), Neigette (554,3 km²) et Mistigouèche (486,2 km²). Du haut de ses 906 m, le Mont Saint-Pierre y est le point culminant. La rivière Mitis prend sa source dans les Monts Notre-Dame à 305 m d'altitude et se jette 68 km plus bas dans les eaux du fleuve Saint-Laurent au niveau de la municipalité de Price (Naturam, 1992). Ainsi, celle-ci s'écoule sur une pente moyenne de 0,5 %. Les trois plus grands lacs de son bassin versant sont les lacs Mitis (22,4 km²), Mistigouèche (8,3 km²) et des Eaux-Mortes (4,3 km²).

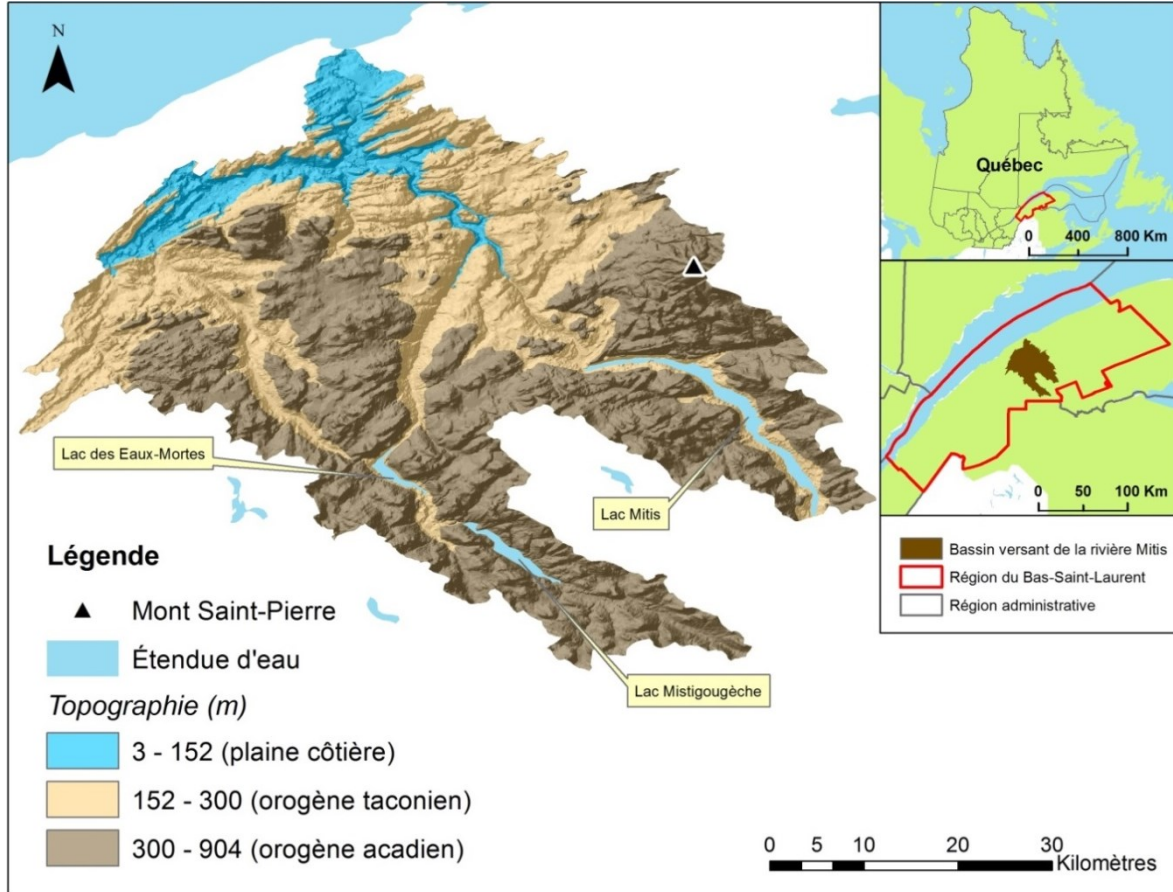


Figure 2 – Carte des reliefs du bassin versant de la rivière Mitis (plaine côtière : surfaces transgressées par la mer de Goldthwait).

Le réseau hydrologique de la rivière Mitis draine les formations calcaires et basiques friables de la région géologique des Appalaches. De l’amont vers l’aval, il traverse la série des calcaires de Gaspé du Dévonien, les formations de grès et de schistes argileux du Silurien ainsi que les formations de calcaires de l’Ordovicien inférieur (Naturam, 1992).

Les vallées des rivières Neigette et Mitis se situent dans la portion aval du bassin versant entre 0 et 120 m d’altitude. Ces vallées ont une forme en auge typique des paysages post-glaciaires (Lévesque et Lévesque, 1974). Après 13400 ans (BP) le retrait du glacier et la transgression marine de la mer de Goldthwait laissent des dépôts pro-glaciaires (Figure 3a et c) et marins (Figure 3a et b) qui subsistent encore aujourd’hui en périphérie des

plaines alluviales des rivières Mitis et Neigette (Desmarais, 1988). Les terrasses marines répertoriées dans le secteur de Sainte-Angèle-de-Mérici témoignent du relèvement isostatique qui s'est produit dans la région (Figure 3a). L'altitude de la plus haute terrasse marine (152 m) concorde avec l'altitude suggérée par Locat en 1978 (Desmarais, 1988; Chauvette, 1992). Aussi, des terrasses fluviales (Figure 3a et c) qui correspondent à d'anciens niveaux de base de la plaine alluviale de la rivière Mitis sont répertoriées par Desmarais (1988).

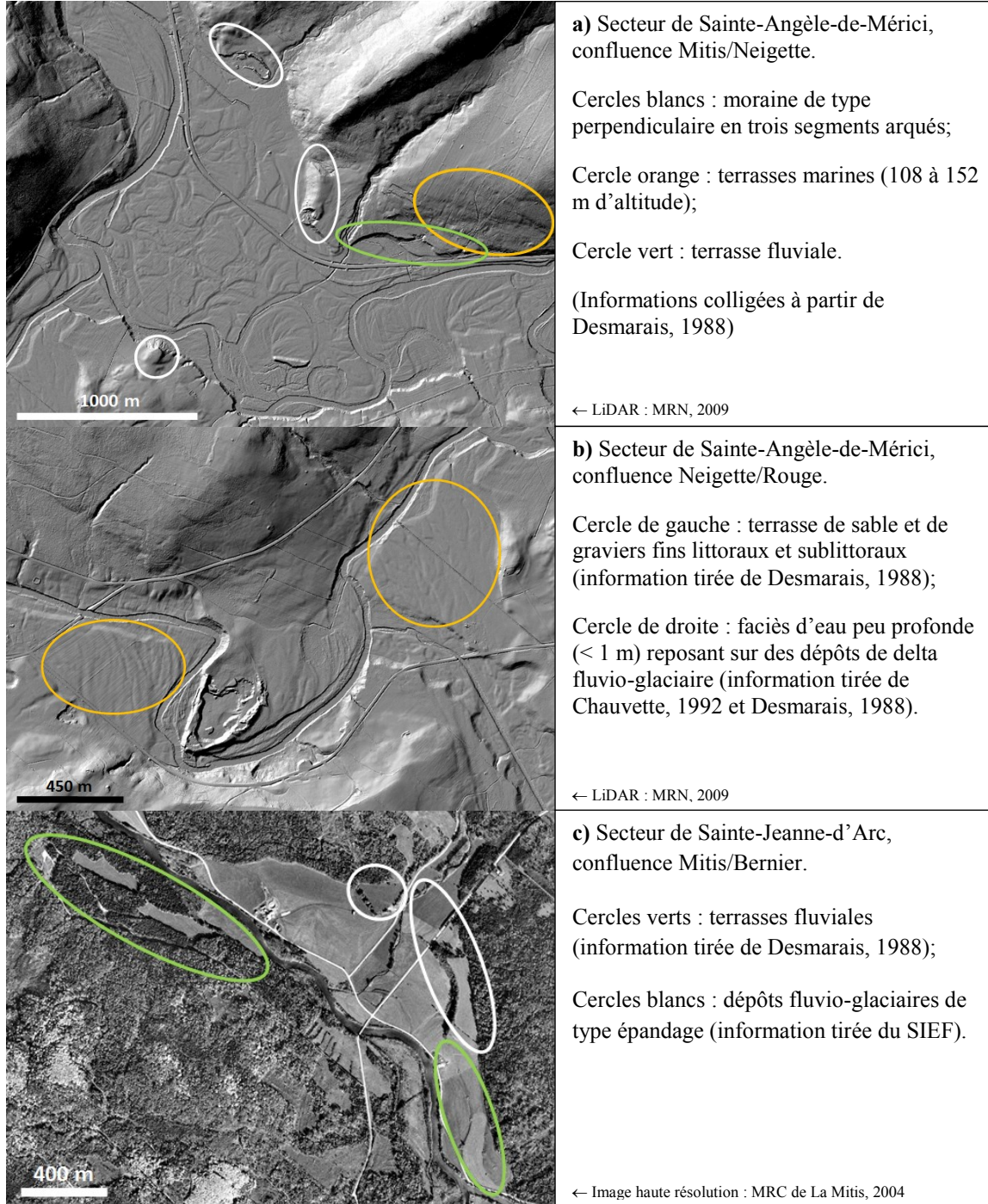


Figure 3 - Formes sédimentaires héritées en périphérie de la plaine alluviale des secteurs de Sainte-Angèle-de-Mérici (a : confluence Mitis/Neigette, b : confluence Neigette/Rouge) et de Sainte-Jeanne-d'Arc (c : confluence Mitis/Bernier).

La description des sondages réalisée dans le cadre du *programme d'acquisition des connaissances sur les eaux souterraines* (PACES) permet d'anticiper les réponses hydrologiques et morphosédimentaire de certains secteurs de la rivière Mitis. Des unités argileuses faisant jusqu'à 25 m d'épaisseur ont été observées dans les vallées des rivières Neigette et Mitis. Ce contexte sédimentaire indique un indice de confinement plus grand de la nappe phréatique et donc une connectivité moins grande entre les aquifères et les eaux de surfaces (Buffin-Bélanger et al., 2015b).

La température moyenne annuelle de 2,6°C caractérise un climat de type continental. Le mois le plus froid est janvier avec -17,5°C et le mois le plus chaud est juillet avec 23°C. Les précipitations totales annuelles sont de 1013,4 mm dont 607,1 mm tombe sous forme de pluie (SARRM, 1983).

Les domaines climaciques de végétation du bassin versant sont l'érablière à bouleau jaune, la sapinière à bouleau jaune, la sapinière à épinette blanche, la sapinière à bouleau blanc et la sapinière à épinette noire (SARRM, 1983).

L'hydrogramme de la rivière Mitis est tout à fait typique des régions sous l'influence d'une dynamique glacielle, soit avec un pic de crue observé à la débâcle printanière. Malgré la présence du barrage du lac Mitis qui induit une homogénéisation du régime hydrologique (Landry, 2013), l'hydrogramme des débits enregistré en aval à la centrale Mitis-1 conserve un profil naturel. Une période d'étiage avec un débit minimal moyen de 12,6 m³/s en février précède un pic de crue avec un débit maximal moyen de 125,6 m³/s qui est habituellement observé lors de la débâcle printanière entre fin avril et début mai. Quant au débit annuel moyen, celui-ci est de 33,8 m³/s (Couture et al., 1984).

1.3.2 Contexte humain

Le bassin versant de la rivière Mitis est situé à l'est de la région administrative du Bas-Saint-Laurent (Figure 2) entre les municipalités côtières de Sainte-Luce et de Baie-des-

Sables. Les surfaces boisées occupent près de 90 % de son territoire, alors que les surfaces agricoles en couvrent moins de 10 % (SARRM, 1983). Le bassin versant de la rivière Mitis contient 19 municipalités et 4 TNO. Les centres urbains situés dans les limites de son territoire regroupent un peu plus de 8000 personnes (MAMROT, 2014). L'histoire de la rivière Mitis est riche et les usages de l'eau sont nombreux. À travers cette section, nous verrons que certaines activités humaines actuelles et même passées peuvent avoir un intérêt marqué dans la compréhension et la connaissance des aléas hydrologiques du bassin versant.

Usages des eaux du bassin versant

Les eaux de son bassin versant ont à la fois une vocation récréative et une vocation énergétique (Lévesque et Courtois, 1983). Avec ses 37 fosses à saumons officielles, la rivière Mitis possède un statut de rivière à Saumon depuis 1966 qui attire chaque année de nombreux amateurs de pêche sportive. De plus, celle-ci compte deux sanctuaires de pêche dont un est situé en aval du barrage de la centrale Mitis-1 et un autre dans la portion aval de la rivière Mistigouèche (Couture et al., 1984; Lévesque et Courtois, 1983). Les barrages constituent un obstacle pour la montaison des saumons d'Atlantique. Pour contourner ce problème, une passe migratoire a été aménagée sur le barrage Mitis-2 et un dispositif de capture a été mis en place en 1965 pour transporter les saumons par camion-citerne en amont du barrage Mitis-1 (Lévesque et Courtois, 1983; Naturam, 1992).

L'usage récréatif de la rivière n'est pas seulement réservé aux pêcheurs. En effet, de nombreux locaux profitent de la saison estivale pour descendre la rivière en embarcation pneumatique. Comme la cohabitation avec les pêcheurs n'est pas toujours évidente, l'Organisme des Bassins Versants du Nord-Est du Bas-Saint-Laurent (OBVNEBSL) a entrepris en 2012 une étude ayant pour objectif de mieux cerner la problématique. Le sondage révèle qu'une minorité des usagers sont en désaccord avec l'activité de l'autre partie. Pour ces raisons, des campagnes de sensibilisation sur le respect du droit des autres furent prescrites (Beaudry-Pilotte et al., 2012).

Le bassin versant de la rivière Mitis contient cinq barrages dont quatre sont gérés par Hydro-Québec pour la production d'hydro-électricité. Les lacs Mitis et Mistigouèche sont en fait des réservoirs qui servent à alimenter les centrales des barrages Mitis-1 et Mitis-2 construites respectivement en 1922 et en 1945 non loin de l'embouchure de la rivière Mitis (Couture et al., 1984; Lévesque et Courtois, 1983). Le réservoir de la centrale Mitis-1 (Figure 4) est compris dans le tronçon à l'étude. Sa distance de refoulement est de deux kilomètres (CEHQ, 2016).



Figure 4 – Barrage de la centrale Mitis-1 (numéro du barrage : X0000536).
Source : Milieuinc.com, 2015.

Le cinquième barrage dont le réservoir n'est tout autre que le lac des Eaux-Mortes, soit le troisième plus grand lac du bassin versant, est un héritage de l'époque de la drave. En effet, celui-ci était utilisé pour stocker les billots de bois avant leur transport vers la scierie de Price Inc. en aval (Couture et al., 1984). Depuis l'interdiction du flottage du bois en 1979, des billots de bois subsistent encore sur les berges et au fond du réservoir du lac des Eaux-Mortes (Couture et al., 1984; Lévesque et Courtois, 1983). Lors de la rupture du barrage en 1984, des billots ont été remobilisés et disséminés le long de la rivière Mitis entravant l'écoulement et accélérant la sédimentation par endroits. Depuis, un barrage de

type déversoir a été reconstruit un kilomètre en amont et est dorénavant géré par le ministère de l'Environnement qui lui réserve un usage strictement récréatif (Couture et al., 1984).

Risque de rupture de barrage

Le niveau d'eau du lac Mitis est régulé par l'ouverture manuelle des vannes du barrage Mitis (Figure 5). Ce réservoir draine un bassin versant d'une superficie de 300 km². Le barrage du lac Mitis fut construit en 1924 et modifié en 1944 (CEHQ, 2015b).

Des riverains ont affirmé que par le passé le niveau d'eau du lac Mitis aurait atteint un seuil critique et suscité une crainte quant à la rupture potentielle du barrage. Suite à cet évènement, un plan d'action régional aurait été mis sur pied pour finalement aboutir à des travaux de consolidation³. Encore aujourd'hui, des doutes subsistent quant à l'état précaire du barrage. Dans le numéro du journal Progrès-Écho paru le 8 mai 2011 est mentionné que lors de la crue du 5 mai 2011 les vannes furent ouvertes pour éviter une trop forte pression sur l'ouvrage déjà fissuré. Suite à une discussion avec Hydro-Québec au sujet de cette crue, la MRC laissa miroiter un projet de restauration du barrage pour 2012 (L'Avantage, 2011; TV Mitis, 2011a). En 2000, Hydro-Québec spécifiait déjà que le barrage nécessitait des rénovations (Radio-Canada, 2005). Cependant, d'après le témoignage d'une riveraine, aucune restauration n'a encore été entreprise. Pourtant, la fiche descriptive du barrage accessible sur le site internet du *Centre d'expertise hydrique du Québec* (CEHQ) stipule noir sur blanc que le niveau des conséquences en cas de rupture de barrage est « très important » (CEHQ, 2015b). Une carte des zones inondables en cas de rupture de barrage montre d'ailleurs que la totalité de la plaine alluviale serait inondée (Figure 6). Lors de la séance d'information de juillet 2011, Hydro-Québec précisait qu'il n'y avait pas de quoi s'inquiéter sur l'état du barrage bien qu'il paraisse vétuste (L'Avantage, 2011). Malgré tout, en plus de l'abaissement du niveau du lac pour limiter la pression de l'eau sur le

³ Informations à vérifier.

Résidus industriels, agricoles et ménagers présents dans la rivière Mitis

En octobre 2007, André Doyer, un biologiste de formation, entreprenait des travaux de récolte du bois submergé de la rivière Mitis, vestige d'un siècle de drave et de la période où le moulin à scie de la Price Brothers and Company était encore actif. Ainsi, pas moins de 400 billots de bois qui pour la plupart mesuraient près de cinq mètres purent être extraits du lit de la Mitis. Bien que cette opération paraisse comme une intervention de nettoyage, celle-ci aurait avant tout été effectuée à des fins commerciales pour la revente du bois (Frigon, 2008).

Compte tenu des informations disponibles pour ce secteur, il est difficile de dire si l'extraction d'une telle quantité de bois a pu avoir une quelconque influence sur la section transversale et la rugosité du chenal. En règle générale, ces deux variables sont corrélées avec la vitesse des écoulements et l'étendue des inondations, mais aucune information à ce sujet n'a pu être filtrée.

Comme c'est le cas le long de plusieurs cours d'eau au Québec, le déboisement excessif des zones riveraines, l'amendement excessif des terres agricoles et la présence du bétail à même le cours d'eau ont provoqué de la pollution et de l'érosion sur les bords de la rivière Mitis (Couture et al., 1984). Sur les sept rivières étudiées par le ministère de l'Environnement en 1999 dans les régions de la Gaspésie et du Bas-Saint-Laurent, le bassin versant de la rivière Mitis ressort comme étant le plus agricole de tous (Robitaille, 1999). Dans les conclusions de cette étude (Robitaille, 1999), il est indiqué que l'eau de la rivière Mitis est de très bonne qualité (IQBP = 90), sauf en aval de la municipalité de Price en raison d'une forte concentration en coliformes fécaux (IQBP = 74). Pourtant, encore aujourd'hui, il est possible d'observer en amont de la municipalité de Price des résidus de déchet fermier directement entreposés à même le sol de la plaine sans installation sanitaire pour limiter la percolation des lixiviats vers le système fluvial. Les municipalités de Mont-Joli et de Sainte-Flavie qui pompent leur eau potable dans la rivière Mitis dépendent de la qualité des eaux de celle-ci. C'est pourquoi elles doivent garder un œil sur les activités anthropiques du bassin versant pour que ce mode d'alimentation reste viable à long terme.

Il est indéniable que les municipalités qui rejettent leurs eaux traitées directement dans la rivière doivent s'assurer de la conformité de leurs installations (MRC de La Mitis, 2007).

Il est certain que la qualité des eaux de la rivière Mitis n'a aucun effet sur la fréquence ni même la magnitude des inondations. À l'inverse, cependant, il est possible que les inondations puissent influencer la qualité des eaux. En effet, même si en règle générale les résidus agricoles semblent ne pas incommoder les municipalités riveraines, il se peut qu'il en soit autrement lorsque surviennent des inondations capables d'atteindre les sources de pollution stockées sur la plaine.

1.3.3 Historique des crues

Les inondations de la rivière Mitis sont loin d'être un phénomène nouveau comme en témoigne une photographie tirée de la collection des Jardins de Mitis prise dans la première moitié du XX^e siècle illustrant un homme dans une barque sur la plaine inondée de la rivière Mitis (Figure 7a). Dès 1955, les archives régionales recensent ces problématiques que les communautés se sont elles-mêmes créées en investissant les plaines (Figure 7b). À en croire les écrits et à en écouter la majorité des riverains de la rivière Mitis, les inondations ont toujours fait partie du décor. La plupart des articles de presse parus dans les dix dernières années évoquent surtout les environs du village de Sainte-Angèle-de-Mérici pour ce qui est des inondations (Figure 8).

A



Inondation à Ste-Angèle

La rivière Mitis, qui était restée bien sagement dans son lit depuis environ un quinzaine d'années, a gonflé soudainement ses eaux, hier midi, pour déferler sur un secteur de la route nationale, à Ste-Angèle de Mérici, à l'entrée du village, et inonder quelques bâtiments de ferme. On croit que la cru des eaux est attribuable au fait que le poids d'une épaisse couche de neige a fait caler la glace dans la rivière. Le redressement de la route nationale est recouvert de deux pieds d'eau sur une longueur de près de trois arpents et le trafic y est interdit aux usagers de cette route qui doivent passer par l'ancien tracé.

Deux fermes construites sur ce parcours sont aussi éprouvées par l'inondation. M. Charles Levesque a dû évacuer de son étable un troupeau de 12 vaches laitières, des génisses, des chevaux, des porcs et des moutons qui ont été conduits chez M. Achille Levesque qui leur a donné asile dans son écurie. Les caves des cemeuriers de MM. Albert Levesque et Albert Plante sont remplies d'eau.

D'autre part, le chemin de partage de la rivière Mitis conduisant au Camp No 1 n'est plus utilisable et on doit passer par La Rédemption pour atteindre cet endroit.

Deux fermes situées sur le chemin inondés, celles de M. Philippe Rioux et Joseph Du-

B

LA VOIX DE MATANE

LA VOIX DE MATANE, Jeudi 3 février 1955

M. BENOIT GABOURY, MAIRE DE MONT-JOLI

100,839.85 VERSES AUX SANS-TRAVAIL EN JANVIER

75% des électeurs votent

Le projet d'une fédération des œuvres temporairement suspendu

Pénurie de conseillers municipaux à Surobec-paroisse

M. Réginald Bélanger, élu maire

Inondation à Ste-Angèle

La rivière Mitis, qui était restée bien sagement dans son lit depuis environ un quinzaine d'années, a gonflé soudainement ses eaux, hier midi, pour déferler sur un secteur de la route nationale, à Ste-Angèle de Mérici, à l'entrée du village, et inonder quelques bâtiments de ferme. On croit que la cru des eaux est attribuable au fait que le poids d'une épaisse couche de neige a fait caler la glace dans la rivière. Le redressement de la route nationale est recouvert de deux pieds d'eau sur une longueur de près de trois arpents et le trafic y est interdit aux usagers de cette route qui doivent passer par l'ancien tracé.

Deux fermes construites sur ce parcours sont aussi éprouvées par l'inondation. M. Charles Levesque a dû évacuer de son étable un troupeau de 12 vaches laitières, des génisses, des chevaux, des porcs et des moutons qui ont été conduits chez M. Achille Levesque qui leur a donné asile dans son écurie. Les caves des cemeuriers de MM. Albert Levesque et Albert Plante sont remplies d'eau.

D'autre part, le chemin de partage de la rivière Mitis conduisant au Camp No 1 n'est plus utilisable et on doit passer par La Rédemption pour atteindre cet endroit.

Deux fermes situées sur le chemin inondés, celles de M. Philippe Rioux et Joseph Du-

Communales de M. M. N. Bernier

Le conseil municipal de Mont-Joli, qui se réunit hier soir, a tenu sa séance hebdomadaire sous la présidence de M. Benoit Gaboury, maire de la ville. Le conseil a traité de nombreuses affaires d'ordre municipal.

La neige ouvre la voie d'un bûcheron coincé sous un arbre qui s'était abattu sur lui

M. Antoine Gauthier, fils de M. Jean Paul Gauthier, de Ste-Angèle de Mérici, a été victime d'un accident dans ses champs des Coteaux-François, il y a quelques jours. Le bûcheron, qui travaillait à défricher un terrain, s'était coincé sous un arbre qui s'était abattu sur lui. Il a été libéré par ses voisins et transporté à l'hôpital.

École incendiée à Ste-Luce

Une école à Ste-Luce a été incendiée hier soir. Les causes de l'incendie sont inconnues. Les dommages sont évalués à plusieurs milliers de dollars.

Le conseil municipal de Ste-Angèle de Mérici

Le conseil municipal de Ste-Angèle de Mérici s'est réuni hier soir. Le conseil a traité de nombreuses affaires d'ordre municipal.

Figure 7 – Archives évoquant les inondations de la rivière Mitis. (A) Photographie de la Collection des Jardins de Mitis prise par Robert Wilson Reford entre 1900 et 1950. (B) Édition du 3 février 1955 de La Voix de Matane relatant les caprices de la rivière Mitis à Sainte-Angèle-de-Mérici.



A) Crue printanière du 5 mai 2011

Chemin de la rivière Mitis-Nord à
Sainte-Angèle-de-Mérici

L'Avantage, 2011



B) Crue printanière du 5 mai 2011

Ferme sur le bord de la route 132 à
Sainte-Angèle-de-Mérici

L'Avantage, 2011



C) Embâcle de glace du 9 mai 2014

Résidence à l'entrée du village de
Sainte-Angèle-de-Mérici

Archive Québecor Média, 2014

Figure 8 - Illustrations parues dans la presse de la crue printanière du 5 mai 2011 (A et B) et de l'embâcle de glace du 9 mai 2014 (C) à Sainte-Angèle-de-Mérici.

Les embâcles de glace et de frazil sont monnaie courante et les secteurs sensibles aux inondations sont pour la plupart connus de tous. Le Tableau 1 met en avant les années de référence qui furent relevées lors de l'enquête de terrain⁴ menée auprès de la population riveraine de la rivière Mitis. L'enquête de terrain fut réalisée dans le but de collecter des repères historiques (niveaux d'eau de crues passées) pour la cartographie des zones inondables, mais aussi dans le but de recueillir des renseignements pour effectuer le portrait historique des crues de la rivière Mitis. Le portrait historique permet de faire ressortir des éléments qui sont utiles à la cartographie des zones inondables. Les années de références du Tableau 1 brossent le portrait historique des inondations de la rivière Mitis. Ce portrait met en évidence l'importance relative des inondations par embâcle de glace dans la plaine alluviale de la rivière Mitis et leur particularité à toucher des endroits hors de portée des inondations en eau libre. Par conséquent, il a été décidé d'inclure les surfaces inondées par les embâcles de glace dans la cartographie des zones inondables lorsque les données le permettaient. De plus, la grande quantité d'informations collectées sur le terrain auprès des riverains concernant la crue de 2011 a permis d'identifier cette crue comme une année de référence notable pour la modélisation des étendues inondées pour une récurrence donnée.

⁴ Se référer à la section « Méthode historique » (3.3.3) pour consulter les détails de l'acquisition des données historiques auprès de la population riveraine ainsi que leur analyse.

Tableau 1 - Années de référence relevées lors de l'enquête de terrain menée auprès des riverains de la rivière Mitis en 2015.

Année	Type d'évènement	Impact
1979	Plus ancienne crue évoquée lors de l'enquête de terrain. Selon les séries de débit compilées pour la rivière Mitis, il s'agit de la deuxième crue d'importance enregistrée dans les 92 dernières années.	Un agriculteur est contraint de déplacer un bâtiment de ferme pour se prémunir des inondations futures. En 1980, la route 132 est reconstruite sur un remblai plus élevé.
1984	Rupture du barrage des Eaux-Mortes sur la rivière Mistigouèche.	Le pont du Portage à Sainte-Jeanne-d'Arc est endommagé et certaines zones se retrouvent inondées alors qu'elles ne le sont habituellement pas. L'Avenue de la Vallée dans le cœur du village de Sainte-Angèle-de-Mérici et la route du Grand-Remous juste en amont de la voie ferrée à Saint-Octave-de-Métis furent submergées par l'onde de crue.
1992 ou 1993	Embâcle de glace.	Refoulement des égouts dans l'avenue de la Vallée et ennoisement du sous-sol des résidences qui la bordent. L'entrepôt du BMR est cerné par l'eau.
1994	Embâcle de glace majeur. Selon les riverains, c'est la grève d'Hydro-Québec qui en serait la cause. Habituellement, Hydro-Québec ouvre préventivement les vannes du barrage du lac Mitis pour faire fondre le couvert de glace juste avant la débâcle printanière. L'omission de cette opération leur serait incombée.	Un agriculteur et sa famille situés à Saint-Joseph-de-Lepage sont contraints de quitter en urgence leur résidence et d'évacuer le matériel périssable des bâtiments de ferme. L'étable d'une ferme à Saint-Octave-de-Métis est cernée par l'eau. Dans le secteur du lac Ouellet, la route du Grand-Remous est submergée sous 15 po d'eau et des blocs de glace sont poussés hors de la rivière. Des arbres sont littéralement arrachés de la berge et des blocs de glace s'empilent jusqu'à la hauteur du toit d'un cabanon.

Tableau 1 - suite

Année	Type d'évènement	Impact
2008	Embâcles de glace successifs.	Plusieurs embâcles de glace se produisent au cours de l'hiver et du printemps (Jousse, 2013).
2011	Crue faisant le plus écho dans l'esprit des riverains, car elle est récente et relativement importante.	En plus des routes connues pour fermer régulièrement, le chemin de la rivière Mitis-Nord se retrouve submergé sur près de 700 m. Plusieurs résidences sont évacuées et une entreprise de transport est affectée. Autre fait saillant, la plaine alluviale entre le pont Marcel et la confluence des rivières Mitis et Neigette est inondée sur sa quasi-totalité voire même sa totalité (Figure 9). Seuls quelques lambeaux de terre en périphérie de la plaine alluviale et des remblais restent épargnés. Les riverains pensent que c'est Hydro-Québec qui est responsable de l'importance de cette crue. L'ouverture excessive des vannes du barrage du lac Mitis pendant la crue printanière en serait la cause.
2014	Embâcle de glace.	L'eau de la rivière refoule par le chemin déneigé de la rue des Riverains imposant l'évacuation de certaines résidences.



Figure 9 – Aperçu de la crue du 5 mai 2011 dans la plaine alluviale de la rivière Mitis en face de l'exutoire de la rivière Neigette (Q_{moy} à la centrale Mitis-1 : 433 m³/s). Source : MRC de La Mitis, 2011.

L'enquête de terrain couplée à la documentation des archives a permis de localiser des sites régulièrement touchés par les inondations de la rivière Mitis. Les résidences et les chalets sur la rue des Riverains et le chemin du Portage sont les premières habitations évacuées lorsque le service de sécurité et d'incendie de la MRC de La Mitis active son plan d'intervention d'urgence. La route du Grand-Remous entre Sainte-Angèle-de-Mérici et Price ainsi que le chemin du Portage entre Sainte-Angèle-de-Mérici et Sainte-Jeanne-d'Arc sont régulièrement fermés à la circulation lors de la débâcle printanière (Figure 10).

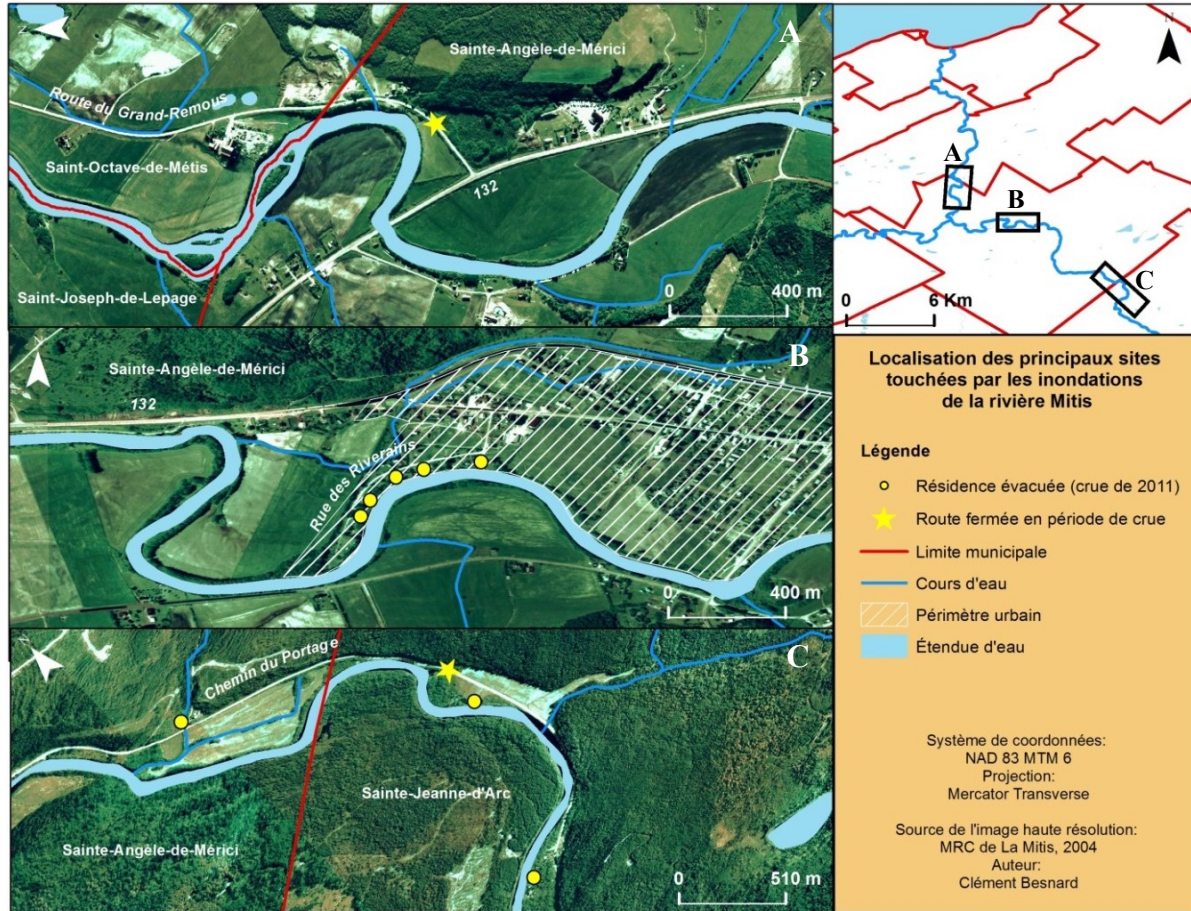


Figure 10 – Localisation des principaux sites touchés par les inondations de la rivière Mitis.

1.3.4 Cartographie actuelle des zones inondables

La cartographie actuelle des zones inondables de la plaine alluviale de la rivière Mitis a été réalisée avec la méthode du « pinceau large » sur des cartes topographiques à l'échelle 1 : 20 000 (Figure 6). Cette cartographie, réalisée il y a près de trente ans, est très peu précise et comporte de nombreuses anomalies telles que des secteurs connus comme étant inondables situés à l'extérieur des limites des zones inondables.

En 2000, la MRC a entrepris un travail de jaugeage des débits qui mena en 2007 à la production d'une carte des zones inondables des crues de récurrences 0-20 et 20-100 ans pour le secteur de Sainte-Angèle-de-Mérici. Cette cartographie, qui est réalisée à l'aide de la méthode de relation « niveau-débit », comporte également des incohérences (Martel, 2007). Ces biais sont probablement causés par la précision planimétrique de ± 1 m des points topo mesurés sur le terrain pour la construction de la grille d'élévation sur laquelle les cotes de crue furent interpolées. Aussi, la transposition des débits de la centrale Mitis-1 vers le secteur de Sainte-Angèle-de-Mérici ainsi que la position des points topo (qui semble avoir été déterminée au jugement) et leur densité (< 800 sur un peu plus de 1 km^2) peuvent en être la cause.

Une cartographie des zones inondable en cas de rupture de barrage (Figure 6) a été réalisée par Hydro-Québec en 2013 (Tremblay, 2016). Il n'a pas été possible d'obtenir de l'information quant à la méthode qui fut utilisée pour l'obtenir. Toutefois, celle-ci semble grossièrement calquée sur les limites de la plaine alluviale.

Les plans d'action de la planification stratégique et du schéma d'aménagement et de développement révisé de la MRC de La Mitis suggèrent la poursuite de l'amélioration de la cartographie des zones inondables.

1.3.5 Segmentation morphogénétique de la plaine alluviale à l'étude

Afin de mieux comprendre le morphodynamisme amont/aval du tronçon à l'étude, une segmentation morphogénétique selon la classification des types de plaine alluviale de Nanson et Croke (1992) a été effectuée. Il existe de nombreuses configurations de faciès alluviaux à travers le monde. Leur diversité est à priori bien représentée dans la classification des types de plaines alluviales de Nanson et Croke (1992). La classification des types de plaine alluviale propose une typologie morphogénétique basée sur les formes et les processus (accrétion/érosion) du régime hydrologique actuel des plaines alluviales.

Les types de plaine alluviale sont hiérarchisés en trois grandes classes basées sur la puissance spécifique (ω) de l'écoulement en conditions plein bord et la composition sédimentaire du plancher alluvial (Tableau 2). Selon Nanson et Croke (1992), la combinaison de ces deux variables comme premier niveau hiérarchique de distinction repose sur les fondements relationnels génétiques du cours d'eau et de la plaine qu'il construit. La puissance spécifique constitue une preuve tangible du potentiel énergétique d'un écoulement pour des conditions hydrauliques spécifiques. Elle permet donc de déduire l'effet que l'écoulement aura sur le déplacement des particules et la morphologie du chenal (Bagnold, 1966). De plus, le choix de cette variable résulte de la large disponibilité/accessibilité des trois paramètres nécessaires à son estimation : le débit (Q), la pente (S) et la largeur du chenal. Deux autres niveaux hiérarchiques découlent des trois premières classes. Le premier niveau comporte 9 ordres et le second 5 sous-ordres. Ces niveaux hiérarchiques apportent un degré de précision supplémentaire à la distinction des plaines alluviales en distinguant l'agencement de facteurs essentiellement géomorphologiques dans la plaine (Tableau 2).

La composition sédimentaire du plancher alluvial peut être obtenue à partir de cartes des dépôts de surface ou, sur le terrain, par identification du substrat composant les talus d'érosion et les berges à l'aide de l'échelle granulométrique de Blott et Pye (2001). Un dépôt dominé par les classes granulométriques sableuses et graveleuses caractérise un plancher alluvial non cohésif, alors qu'un dépôt dominé par les classes granulométriques limoneuses et argileuses caractérise un plancher alluvial cohésif. Cette intervention permet de vérifier le niveau d'instabilité du chenal et la force de résistance à l'érosion du plancher alluvial. La puissance spécifique en condition de débit plein bord peut être extraite à partir d'un modèle numérique de terrain à l'aide d'un modèle hydraulique ou en intégrant dans l'Équation 1 les valeurs des paramètres nécessaires pour l'estimer :

$$\omega = \rho \cdot g \cdot Q \cdot S / w$$

Équation 1 - Équation de la puissance spécifique (Nanson et Croke, 1992). Où ω représente la puissance spécifique (W/m^2), ρ la densité de l'eau ($\approx 1000 \text{ kg/m}^3$), g l'accélération due à la gravité (9.8 m/s^2), Q un débit (m^3/s), S une pente d'énergie (m/m), et w une largeur de cours d'eau (m).

La puissance spécifique des écoulements se décline en trois classes d'intervalle, soit élevée ($\geq 300 \text{ W/m}^2$), modérée ($10 - 300 \text{ W/m}^2$) et faible ($\leq 10 \text{ W/m}^2$).

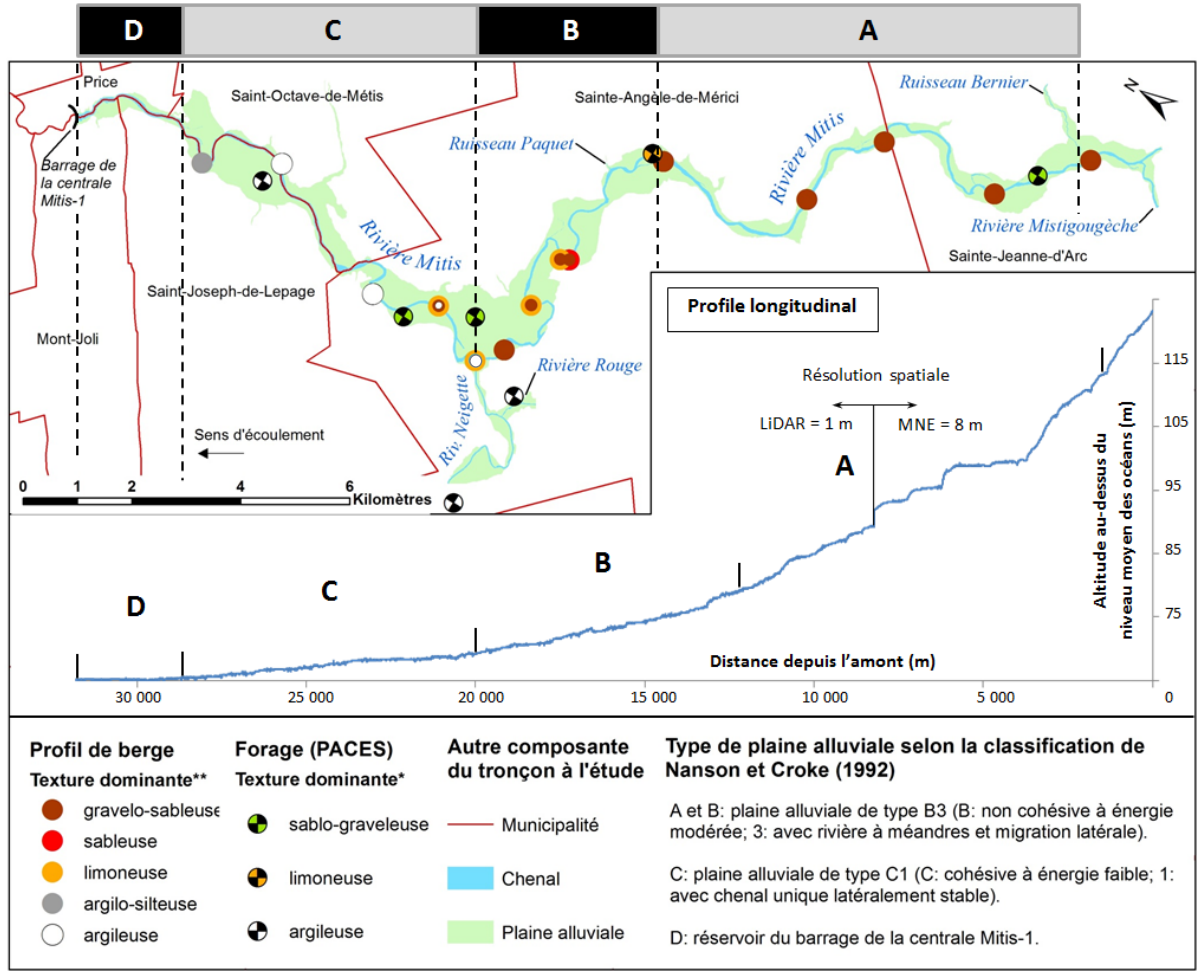
Tableau 2 – Classification des types de plaine alluviale sans les facteurs géomorphologiques. Traduit et abrégé de Nanson et Croke, 1992.

Classes					
Sableux - graveleux				Limoneux - argileux	
$\omega \geq 300 \text{ W/m}^2$		$\omega = 10 - 300 \text{ W/m}^2$		$\omega \leq 10 \text{ W/m}^2$	
A		B		C	
Non cohésive à énergie élevée		Non cohésive à énergie modérée		Cohésive à énergie faible	
Ordres					
A1	Confinée à texture grossière	B1	Avec rivière à tresses	C1	Avec chenal unique latéralement stable
A2	Confinée à accrétion verticale sableuse	B2	Avec rivière divagante à lit de graviers	C2	Avec rivière anastomosée
A3	Non confinée à accrétion verticale sableuse	B3	Avec rivière à méandres et migration latérale		
A4	Avec recoupements et comblements de méandres				
Sous-ordres					
		B3a	Sans crêtes et sillons	C2a	Riche en matière organique
		B3b	Avec crêtes et sillons	C2b	Riche en matière inorganique
		B3c	Avec marais périphériques		

La segmentation morphogénétique de la plaine alluviale est fortement recommandée comme étape préalable à la cartographie des zones inondables dans la perspective où un cours d'eau, de sa source à son exutoire, est susceptible de traverser divers environnements qui transparaissent plus ou moins dans sa dynamique morphosédimentaire. En connaissant les variations longitudinales de la dynamique morphosédimentaire, il est alors possible

d'entrevoir rapidement et simplement les endroits où la dynamique du cours d'eau pourrait avoir une influence sur la durée de vie de la cartographie et de poser un premier diagnostic sur l'inondabilité de la plaine alluviale. Ainsi, cela permet d'anticiper le mode de gestion et d'adapter la démarche cartographique de façon à mieux intégrer l'évolution probable de l'environnement fluvial et d'appliquer un zonage adapté aux conditions du milieu. Ce type d'analyse segmentaire du milieu fluvial est comparable à la trajectoire géomorphologique et à d'autres méthodes telles que la sectorisation morphodynamique de Demers et Buffin-Bélanger (2011) qui permettent de mieux cerner la diversité fluviale et de ne pas considérer les cours d'eau comme de simples entités homogènes et statiques.

La segmentation du tronçon à l'étude s'est faite en recoupant cinq critères principaux. Le confinement du chenal, la variation du débit (position des affluents), la sinuosité du chenal, la pente et la composition sédimentaire des berges permettent de distinguer quatre segments morphogénétiquement homogènes: A, B, C et D (Figure 11). De manière plus spécifique, la composition sédimentaire des berges a été obtenue par un échantillonnage au jugement lors d'une descente en canot de la rivière. Au départ, l'échantillonnage devait se faire de façon systématique, mais très vite, il fut convenu d'opter pour une méthode d'échantillonnage plus adaptée aux conditions du terrain. En effet, la forte densité végétale de la bande riveraine rendait l'opération trop difficile. Par conséquent, il a été décidé d'échantillonner uniquement les berges en érosion où le substrat était facile d'accès. D'où cette répartition aléatoire des sites échantillonnés visibles sur la Figure 11. Considérant la taille restreinte de l'échantillon ($n = 14$), il fut également décidé d'élargir l'effort d'échantillonnage en ajoutant à l'échantillon les données des sites de forage ($n = 7$) du PACES (Buffin-Bélanger et al., 2015b). C'est une fois la segmentation effectuée que la puissance spécifique fut calculée pour chaque segment, sauf pour le segment D, car celui-ci correspond au réservoir du barrage de la centrale Mitis-1 (Tableau 3).



* Texture dominante des six premiers mètres uniquement.

** La taille du cercle varie en fonction de l'épaisseur de l'unité stratigraphique dans laquelle la classe texturale a été échantillonnée.

Figure 11 – Segmentation morphogénétique de la plaine alluviale de la rivière Mitis.

Tableau 3 – Données utilisées pour le calcul de la puissance spécifique

Segment	Ad (km ²)	Q _{pb} ⁵ (m ³ /s)	Dénivelé (m)	L (m)	S	W _{pb} (m)	ω (W/m ²)
A	1135	120	37	9934	0,0037	52	79
B	1191	125	12	8551	0,0014	47	36
C	1784	172	4	9910	0,0004	64	11
A+B+C	1784	172	53	28395	0,0019	54	59
Formule du débit plein bord			$Q_{pb} = 0,4415 \cdot Ad^{0,7967} (R^2 = 0,8039)^*$				
Formule de la puissance spécifique			$\omega = \rho \cdot g \cdot Q \cdot S / w$				

* Source: Dubé, 2014

Le segment A est situé à l'extrémité amont du tronçon à l'étude. Il commence juste en aval de la rivière Mistigouèche à la hauteur du ruisseau Bernier et se termine au niveau de l'élargissement de la plaine alluviale. Les données de forage et de profil de berge indiquent une composition sédimentaire grossière qui fait de son plancher alluvial, un plancher alluvial non cohésif. Pour ce qui est de sa puissance spécifique, celle-ci a été estimée à 79 W/m². Une plaine étroite, une pente forte (0,0037) et un chenal avec une faible sinuosité caractérisent ce segment. Selon la classification des types de plaine alluviale de Nanson et Croke, le segment A a une plaine alluviale de type B3 (B: non cohésive à énergie modérée; 3: avec rivière à méandres et migration latérale).

Le segment B débute en aval du segment A et se termine en face de la confluence de la rivière Neigette. La composition sédimentaire du plancher alluvial y est de nature variable, mais plus souvent marquée par une unité gravelo-sableuse sous-jacente à une unité limoneuse. La cohésion sédimentaire y est donc peu élevée. La puissance spécifique de ce segment a été estimée à 36 W/m². Celui-ci s'élargit progressivement vers l'aval. Une plaine large (±1 km), une pente modérée (0,0014) et un chenal avec une forte sinuosité caractérisent ce segment. Le type de plaine alluviale du segment B est identique à celui du segment A.

Le segment C débute en aval du segment B et se termine au rétrécissement de la plaine alluviale au début du réservoir du barrage de la centrale Mitis-1. La grande proportion d'argile constatée dans les berges de ce segment offre une grande cohésion sédimentaire au plancher alluvial. La puissance spécifique a été estimée à 11 W/m². Une plaine plus ou moins large, une pente faible (0,0004) et un chenal avec une sinuosité modérée caractérisent ce segment. La plaine alluviale du segment C est de type C1 (C: cohésive à énergie faible; 1: avec chenal unique latéralement stable).

Le segment D, qui correspond au réservoir du barrage de la centrale Mitis-1, est situé à l'extrémité aval du tronçon à l'étude. Il commence en aval du segment C et se termine au front du barrage.

De manière générale, un affinement granulométrique est observé de l'amont vers l'aval. Aussi, comme il avait été constaté par Demers et Buffin (2011) sur la rivière Neigette, la puissance spécifique décroît de l'amont vers l'aval (Tableau 3). Le type de plaine alluviale des segments A et B est identique. Toutefois, ceux-ci se distinguent par leur pente et leur confinement.

Les photographies aériennes et les images satellites de 1963 à 2014 conjuguées aux observations collectées lors de la descente en canot entre le pont de Sainte-Jeanne-d'Arc et le pont ferroviaire de Price permettent de dire que la rivière Mitis est globalement stable. En effet, très peu de berges en érosion ont été observées tout au long du cours d'eau et seul un recoupement de méandre a été constaté à l'intérieur du segment B (Figure 12). La présence d'argiles de la mer de Goldthwait rend la portion aval du tronçon de la rivière Mitis à l'étude particulièrement stable. Cette observation concorde avec la stabilité de la portion aval de la rivière Neigette mentionnée dans l'étude de Demers et Buffin-Bélanger (2011).



Figure 12 – Illustration de la stabilité du chenal entre 1963 et 2014. Cercle : intervention anthropique correspondant à une déviation du chenal lors de la reconstruction de la route 132 en 1980; flèche : début d'un recouplement de méandre.

CHAPITRE 2

ÉVOLUTION DE L'APPROCHE HGM AU QUÉBEC

2.1 RESUME

Cet article dresse le portrait de l'évolution de l'approche *hydrogéomorphologique* (HGM) au Québec depuis son émergence en 2007 jusqu'à son institutionnalisation. Au total, huit rivières du Québec méridional ont contribué au développement de l'approche HGM. La première application de l'approche HGM sur la rivière au Renard fut directement calquée de la Méthode HGM française décrite par Ballais et al. (2011). Les cartographies des rivières Cap-Chat et Verte furent également effectuées à l'aide de cette méthode. Toutefois, son application répétée dans le contexte fluvial québécois permit rapidement de constater une impropriété. Une adaptation de l'approche HGM fut donc opérée sur les rivières Matane, de la Roche et Yamaska-Sud-Est. Bien que son développement se poursuive encore aujourd'hui, l'approche séduit déjà le secteur gouvernemental. Cet engouement se traduit notamment sous la forme de cartographies HGM intégrées au schéma d'aménagement (rivière Bonaventure) et l'utilisation volontaire de l'approche par les institutions gouvernementales (rivière de La Fourche). Un des buts sous-jacents du développement de l'approche HGM étant à terme de rencontrer les exigences institutionnelles pour que son utilisation soit officiellement recommandée par le cadre normatif de la *politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables* (PPRLPI) et qu'ainsi la méthode trouve écho dans les secteurs extra-académiques pour que son utilisation et son application se développent.

2.2 INTRODUCTION

En 2007, une suite de circonstances aggravantes provoque une inondation sans commune mesure à Rivière-au-Renard, un petit village de l'Est du Québec. Cet événement tragique, auquel deux décès sont rattachés, bouscule le mode de gestion des risques d'inondation et incite le gouvernement à trouver des solutions pour pallier les lacunes de l'approche cartographique conventionnelle basée sur l'ingénierie hydraulique (Lelièvre et al., 2008). Depuis 1998, année de la mise en place du *programme gouvernemental de détermination des cotes de crue de récurrence 20 ans et 100 ans* (PDCC), l'approche hydraulique est systématiquement appliquée pour cartographier les zones inondables des cours d'eau du Québec. Bien que le PDCC ait achevé en 2004, le cadre législatif de la *politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables* (PPRLPI) demeure fondé sur l'approche hydraulique, ce qui incite à utiliser l'approche sans discernement et à omettre une somme d'éléments particulièrement influant sur l'étendue des inondations. En effet, cette approche cartographique a été conçue pour des environnements statiques en condition d'eau libre (Demers et al., 2014). C'est pourquoi son application sur des tronçons dynamiques ou propices aux embâcles de glace s'avère inadéquate, et surtout depuis que les modèles hydroclimatiques confirment que les changements climatiques auront une influence sur la réponse hydrologique des cours d'eau (CEHQ, 2015a). Par conséquent, il n'est plus rare d'observer des inondations survenant au-delà des limites cartographiques des zones inondables comme ce fut notamment le cas lors des inondations des rivières au Renard et Richelieu. D'autre part, cette cartographie est particulièrement favorable à l'aménagement du territoire, dans la perspective où elle sous-estime la portée des crues rares à exceptionnelles (estimées à partir d'échantillon non représentatif) et fait abstraction de la réponse morphologique des crues sur le système fluvial (Lelièvre et al., 2008). Bien que cette cartographie soit censée être une norme minimale et préliminaire, elle perdure en raison de l'absence d'alternatives méthodologiques.

L'approche historique dite du « Pinceau large », bien que rudimentaire, fait également partie des approches cartographiques des zones inondables employées au

Québec. Celle-ci utilise des niveaux d'eau historiques ou cotes altimétriques obtenus dans les archives ou dans la mémoire collective qui sont reportés sur une carte topographique. Son application se limite à la quantité et à la qualité des informations collectées. Contrairement à l'approche hydraulique, elle ne permet pas de subdiviser la *plaine alluviale fonctionnelle* (PAF).

Soutenue par le *ministère de la Sécurité publique* (MSP) et encadré par le *ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques* (MDDELCC⁶), des initiatives de recherche ont vu le jour pour mettre en place une approche fondée sur des concepts *hydrogéomorphologiques* (HGM) de manière à pallier à l'absence d'alternatives méthodologiques permettant une cartographie des zones inondables proche de la réalité. Parce qu'elle s'appuie directement sur la présence et l'agencement structural des éléments du paysage fluvial, la démarche cartographique de l'approche HGM possède l'avantage de se conformer aux processus hydrodynamiques actuels et intrinsèques de chaque cours d'eau. De plus, comme elle intègre l'ensemble des composantes fonctionnelles de la plaine alluviale, sa cartographie inclut avec une plus grande certitude les ajustements climatiques potentiels de la courbe enveloppe des inondations maximales. Ainsi, cette nouvelle approche intégratrice et complémentaire à l'approche conventionnelle propose une alternative abordable à la cartographie des zones inondables pour le développement durable des espaces fluviaux de la société québécoise.

Depuis les travaux de Lelièvre et al. (2008), force est de constater qu'une évolution significative des principes directeurs de la cartographie HGM s'est produite au Québec. Dans ce contexte, cet article vise à décrire cette évolution de l'émergence à l'institutionnalisation de la méthode, exercice qui n'avait jusqu'à présent jamais été fait. L'émergence récente de l'approche HGM au Québec et le nombre limité de contributeurs à son développement rend possible l'établissement d'un portrait historique exhaustif et bien cadré.

⁶ Anciennement encadré par le *centre d'expertise hydrique du Québec* (CEHQ).

2.3 ÉVOLUTION DES FONDEMENTS THEORIQUES DE LA CARTOGRAPHIE HGM

2.3.1 Application de la méthode HGM française

Au Québec, la cartographie des zones inondables repose principalement sur une approche hydraulique (approche conventionnelle ou HHS pour hydrologique, hydraulique et statistique) qui modélise des cotes de crues pour des débits donnés. La PPRLPI exige de subdiviser la plaine inondable en deux zones distinctes : la zone de grand courant et la zone de faible courant qui sont associées à des crues de récurrence 0-20 ans et 20-100 ans. Cette cartographie des zones inondables repose sur les prémisses que les rivières sont statiques et en conditions d'eau libre. C'est pourquoi les limites des zones inondables HHS n'englobent pas l'extension des inondations par refoulement dû aux embâcles et n'anticipent pas la réponse géomorphologique du chenal. Aussi, les changements climatiques ne sont généralement pas considérés dans l'analyse de l'évolution des réponses hydrologiques (Laforce et al., 2011). Les séries de données hydrologiques sur lesquelles les modèles hydrauliques sont calibrés impliquent une portée limitée de l'utilisation des cartes dans le futur.

L'approche HGM émerge pour la première fois au Québec suite à la catastrophe du 8 et 9 août 2007 à Rivière-au-Renard en Gaspésie (Lelièvre et al., 2008). La première cartographie HGM est survenue à la demande du MSP devant l'inadéquation de l'enveloppe des zones inondables établie par la méthode hydraulique et la récurrence de cette crue. Les inondations de la rivière au Renard ont été exacerbées par une série de facteurs aggravants (rupture de barrage de castors, embâcles de débris sous les ponts, niveau marin élevé...) qui ont provoqué des dégâts considérables.

L'approche HGM utilisée dans le cas de la rivière au Renard repose sur les fondements hydrogéomorphologiques de la méthode décrite par Ballais et al. (2011) qui fut développée pour faciliter la gestion des risques d'inondation en France, notamment dans le cas des

plans de prévention des risques d'inondation (PPRI). La Méthode HGM française associe des unités morphologiques (et/ou topographique) telles que les lits mineur, moyen et majeur (Figure 13a) à des fréquences d'inondation : les lits mineur et moyen sont associés à des fréquences d'inondation élevées⁷, et le lit majeur à des fréquences d'inondation rares à exceptionnelles. Le processus cartographique utilisé pour la rivière au Renard est donc centré sur la représentation des formes, mais aussi sur la délimitation des crues historiques et notamment sur la crue de 2007 qui sert pour valider la cartographie HGM. Les principaux indices utilisés pour la délimitation des trois unités morphologiques sont les ruptures de pente et les éléments issus de la dynamique hydraulique (formes et granulométrie des dépôts superficiels). La cartographie a été faite à partir de l'interprétation stéréoscopique de photographies aériennes, d'observations sur le terrain et de l'analyse historique des crues. Ces observations et analyses ont mené à une cartographie des aléas reposant notamment sur les styles fluviaux et les formes fluviales. La cartographie HGM de la rivière au Renard était sommaire, mais elle révélait tout l'intérêt d'utiliser la morphodynamique fluviale pour produire une cartographie des aléas. La cartographie des aléas combinée à l'occupation des sols (enjeux) a permis de proposer une cartographie des risques (Figure 13b). Les degrés de risque ont été déterminés en fonction de l'importance des enjeux accordés aux différentes catégories d'occupation des sols et de la fréquence d'inondation de chacun des lits.

Dans leur conclusion, Lelièvre et al. (2008) soulignent qu'il est relativement facile de tracer l'enveloppe maximale des crues rares à exceptionnelles, mais qu'il est cependant délicat d'attribuer un niveau de risque dans les limites de celle-ci lorsque l'on sait que la réglementation dépendra de la qualité de la cartographie HGM. Ils soutiennent également qu'une cartographie intégrant les méthodes HGM et hydraulique mènerait inévitablement vers une meilleure gestion du risque d'inondation dans le cas des rivières morphodynamiquement actives.

⁷ Selon Garry et al. (2002), les lits moyens peuvent être inondés par les crues moyennes à décennales.

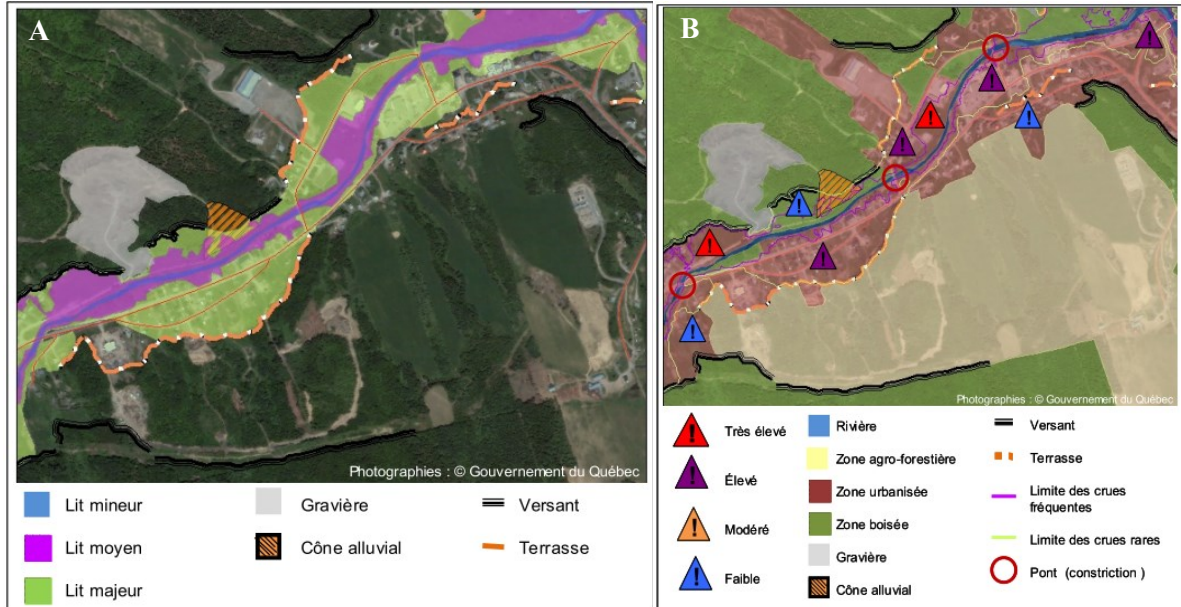


Figure 13 – Cartographies des aléas (A) et des risques d’inondation (B) dans un secteur de la vallée de la rivière au Renard. Source : Lelièvre et al., 2008.

En 2009, la Méthode HGM française est également appliquée aux rivières Verte et Cap-Chat en Gaspésie dans le cadre d’un premier mandat de recherche confié par le MSP sur le développement de la méthode. Les grands volumes de dépôts meubles présents dans les bassins versants de ces rivières favorisent un important transport sédimentaire et donc un ajustement hydrosédimentaire conséquent qui rend l’employabilité de l’approche HHS délicate (Demers et al., 2009). D’autre part, en plus d’encourager le MSP à financer le développement de la méthode, l’inondation de 2007 à Rivière-au-Renard a montré que l’utilisation d’une approche intégratrice⁸ s’avérait plus adaptée pour comprendre et cartographier les risques d’inondation.

De la même façon que pour la rivière au Renard, une typologie des lits fluviaux a été utilisée pour caractériser la plaine alluviale des rivières Cap-Chat et Verte. Chacune de ces enveloppes morphologiques est marquée par des inondations de récurrences différentes, soit les crues annuelles non débordantes et les crues fréquentes et exceptionnelles de la

⁸ Approche qui combine plusieurs méthodes.

plaine de débordement. L'interprétation des photographies aériennes historiques et des relevés topographiques du DGPS ont permis de délimiter les différents lits. Les principaux indices et méthodes utilisés pour délimiter et distinguer ces derniers sont la présence de micro-talus, de méandres abandonnés et d'espèces végétales hygrophiles ainsi que le recours à la granulométrie. Le produit cartographique final inclut les lits mineur, moyen et majeur, les dépressions humides (ou les milieux humides dans le cas de la rivière Verte) et les remblais (Figure 14).

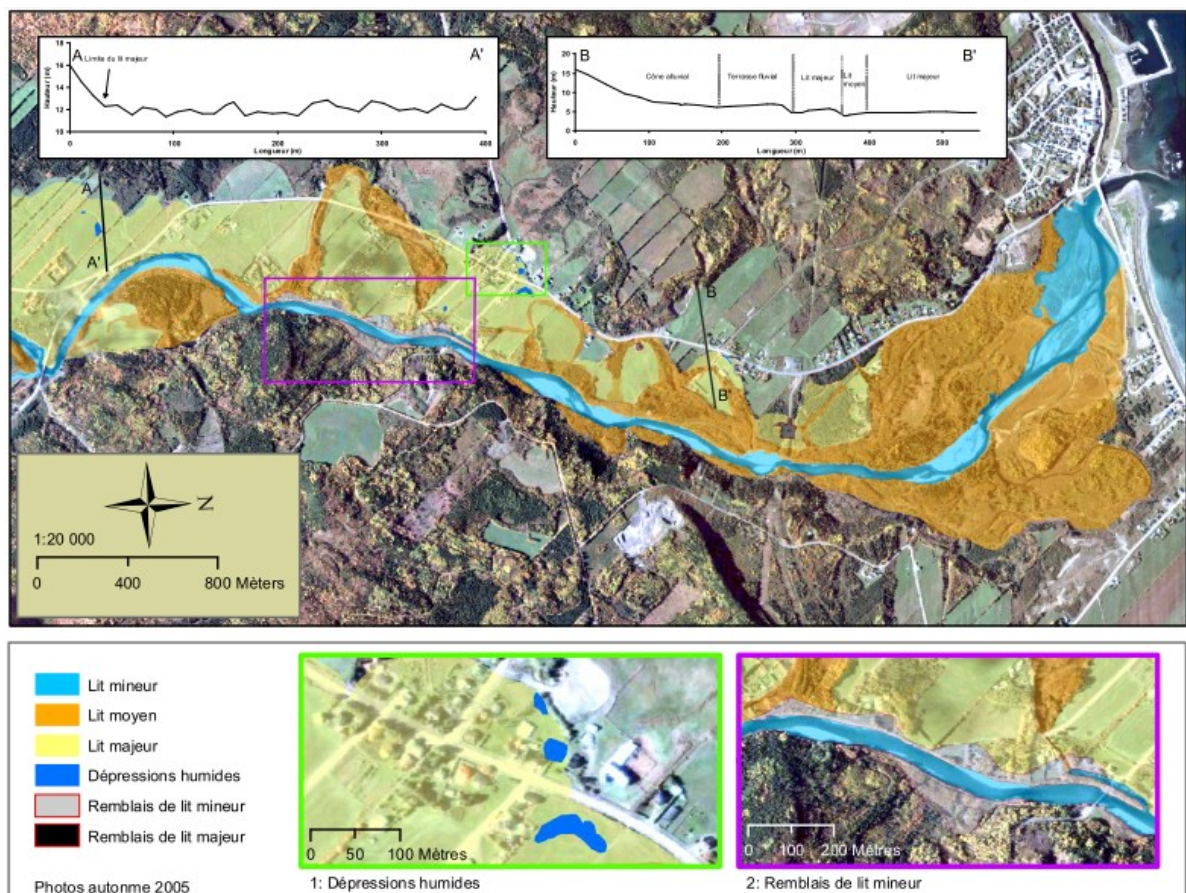


Figure 14 - Cartographie des lits de la rivière Cap-Chat. Source : Demers et al., 2009.

Demers et al. (2009) mentionnent que la rivière Cap-Chat possède deux types de lit moyen : les chenaux abandonnés (artificiellement et naturellement) ainsi que les surfaces construites par migration latérale du chenal. Cette observation fait apparaître ici une

réflexion par rapport à l'employabilité de la Méthode HGM française sur les cours d'eau de la Gaspésie et par le fait même sur ceux de l'ensemble du Québec méridional. En effet, la Méthode HGM française a été conçue pour les cours d'eau sous l'influence d'un régime hydroclimatique méditerranéen. La configuration de la plaine alluviale de ces environnements climatiques reflète une hiérarchie topographique de lits imbriqués. L'applicabilité de la Méthode HGM française est donc particulièrement délicate dans des contextes qui diffèrent. À l'époque, pour contourner cette problématique, Demers et al. (2009) « réinventent » la définition du lit moyen de façon à ce qu'elle puisse refléter leurs observations, tout comme l'avaient fait Fanton et Marre (2007) et Penven et al. (2004) quelques années auparavant pour des cours d'eau situés dans des contextes différents du sud de la France. Dans le contexte de la rivière Cap-Chat, le « lit moyen » reste bel et bien un niveau d'inondabilité intermédiaire entre les lits mineur et majeur, mais dont les caractéristiques géomorphologiques varient d'un site à l'autre. C'est pourquoi de manière à conserver une description universelle du lit moyen pour tous les cours d'eau, les critères de distinction géomorphologiques ont progressivement été substitués par des critères de distinction hydrologique (niveau d'inondabilité). Toutefois, d'un point de vue de la gestion des risques, une telle uniformisation ne permet pas de représenter le risque à sa juste valeur. C'est pourquoi au lieu de représenter les aléas d'inondation sous la définition des lits, qui reste très volatile d'une étude à l'autre, ceux-ci devraient plutôt être représentés sous forme de processus/aléas (Demers, 2015). C'est d'ailleurs ce que firent Demers et al. (2012) trois ans plus tard lors de la cartographie HGM de la rivière Matane.

2.3.2 Développement d'une approche québécoise

En 2012, une évolution majeure survient dans la méthodologie de l'approche HGM au Québec. En effet, Demers et al. (2012) adaptent la Méthode HGM française aux caractéristiques intrinsèques de la rivière Matane. C'est suite à une discussion avec les

gestionnaires de l'aménagement du territoire de la MRC⁹ de Matane sur l'arrimage de la cartographie HGM et le cadre normatif de la PPRLPI, qu'une cartographie des zones inondables centrée cette fois-ci sur une typologie des aléas plutôt que sur une typologie des lits voit le jour (Figure 15). Chaque aléa renvoie à des éléments de risque tels que des processus hydrauliques (fréquence et puissance), une durée et la présence ou non d'impacts de glace et de débris (ex. : les inondations par exfiltration sont associées à une fréquence de 0-20 ans, une faible puissance et une durée élevée sans impact de glace et sans débris). Il est même considéré d'intégrer des indicateurs d'évolution morphologique de la rivière, comme l'augmentation de la surface des bancs d'accumulation, dans la démarche menant à la cartographie des zones inondables. La typologie par aléas se divise en huit classes distinctes définies selon une combinaison de critères spécifiques tels que la morphologie, la pédologie, la sédimentologie et l'écologie végétale (ex. : les surfaces touchées par les inondations par exfiltration peuvent être identifiées par une altitude inférieure au niveau plein bord du chenal actif et la présence de sols hydromorphes et/ou de plantes hygrophiles). La somme des éléments de risque de chacun des aléas permet d'élaborer un zonage à trois niveaux de contraintes à l'aménagement : sévère, modéré et faible (Tableau 4).

Tableau 4 – Terminologie utilisée pour la cartographie HGM des aléas. Source : Demers et al., 2012.

Zonages		sévère	modéré	faible
aléas	inondations par débordements à l'eau claire	<ul style="list-style-type: none"> ▪ grands courants HGM ▪ 0-20 ans 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ faibles courants HGM ▪ 20-100 ans 	inondabilité résiduelle
	inondations par exfiltration	exfiltration		
	inondations par embâcles de glace	embâcles avec blocs de glace	embâcles sans blocs de glace	
	torrentialité (cône alluvial)	torrentialité		

⁹ MRC : municipalité régionale de comté.

Les niveaux de contraintes à l'aménagement pour chaque type d'aléa ont été pensés et déterminés de manière à ce qu'ils puissent se superposer aux niveaux de contraintes à l'aménagement imposés par le cadre normatif en vigueur. C'est pourquoi notamment l'aléa de *grands courants HGM* ($f < 0-20$) possède le même niveau de contrainte que la zone de *grand courant* de la PPRLPI (0-20 ans = sévère) (Tableau 4). Étant donné que les zones de grand courant et de faible courant de la PPRLPI sont associées à des fréquences d'inondation, une analyse fréquentielle a été effectuée pour caractériser la classe de récurrence d'inondation de chacun des aléas qui sont à la base définis par le biais de la géomorphologie. C'est donc la superposition de la cartographie HGM à la cartographie HHS (Ministère de l'Environnement, Direction du milieu hydrique, 1989) exécutée par le CEHQ qui a permis l'arrimage des types d'aléa au zonage du cadre normatif.

Une des particularités de la cartographie HGM proposée par Demers et al. (2012) est qu'elle inclut une troisième zone de contraintes à l'aménagement qui ne figure pas dans la PPRLPI. Celle-ci correspond à une zone de restriction faible qui tient compte des surfaces touchées par les inondations de récurrence supérieure à 100 ans. Bien qu'elle soit associée à une récurrence, celle-ci se détermine à l'aide d'une analyse morphopédologique plutôt qu'avec une analyse hydraulique. En raison de son caractère exceptionnel, cette zone est désignée sous le nom de zone d'inondabilité résiduelle. Ce terme s'inspire directement de la Directive 2000/60/CE du Parlement européen qui réclame l'inclusion des événements de récurrence exceptionnelle dans la cartographie des aléas d'inondation. Son intégration à la cartographie serait particulièrement bénéfique lors de l'élaboration des plans de sécurité civile ou lors de l'implantation d'infrastructures et de services communautaires tels que les hôpitaux et les casernes de pompiers (Demers et al., 2012).

Aussi, contrairement aux premières applications de l'approche HGM au Québec, celle de la rivière Matane est combinée à l'approche historique par recensement des cicatrices glacielles. La hauteur des cicatrices glacielles sur les troncs d'arbre permet de cartographier les zones inondées par les embâcles de glaces. En plus de renseigner sur un niveau d'eau atteint, la cicatrice glacielle permet d'associer une hauteur d'eau à un

évènement temporel précis grâce à la dendrochronologie (Taylor, 2010). Les espaces ainsi définis peuvent être inondés de façon fréquente, considérant le fait que le niveau d'eau refoulé par un embâcle de glaces peut être supérieur au niveau d'eau d'une inondation en eau libre pour un débit similaire (Sui et al., 2004).

Cette cartographie des zones inondables fut également l'occasion de proposer une législation sévère pour l'aléa de torrencialité qui caractérise l'inondabilité des cônes alluviaux. Enfin, les travaux de 2012 ont mené à une cartographie des aléas fluviaux qui incluait la migration latérale; c'était le début de la notion d'« espace de liberté » proposée plus tard par Biron et al. (2013), mais uniquement appliquée à la gestion des risques.

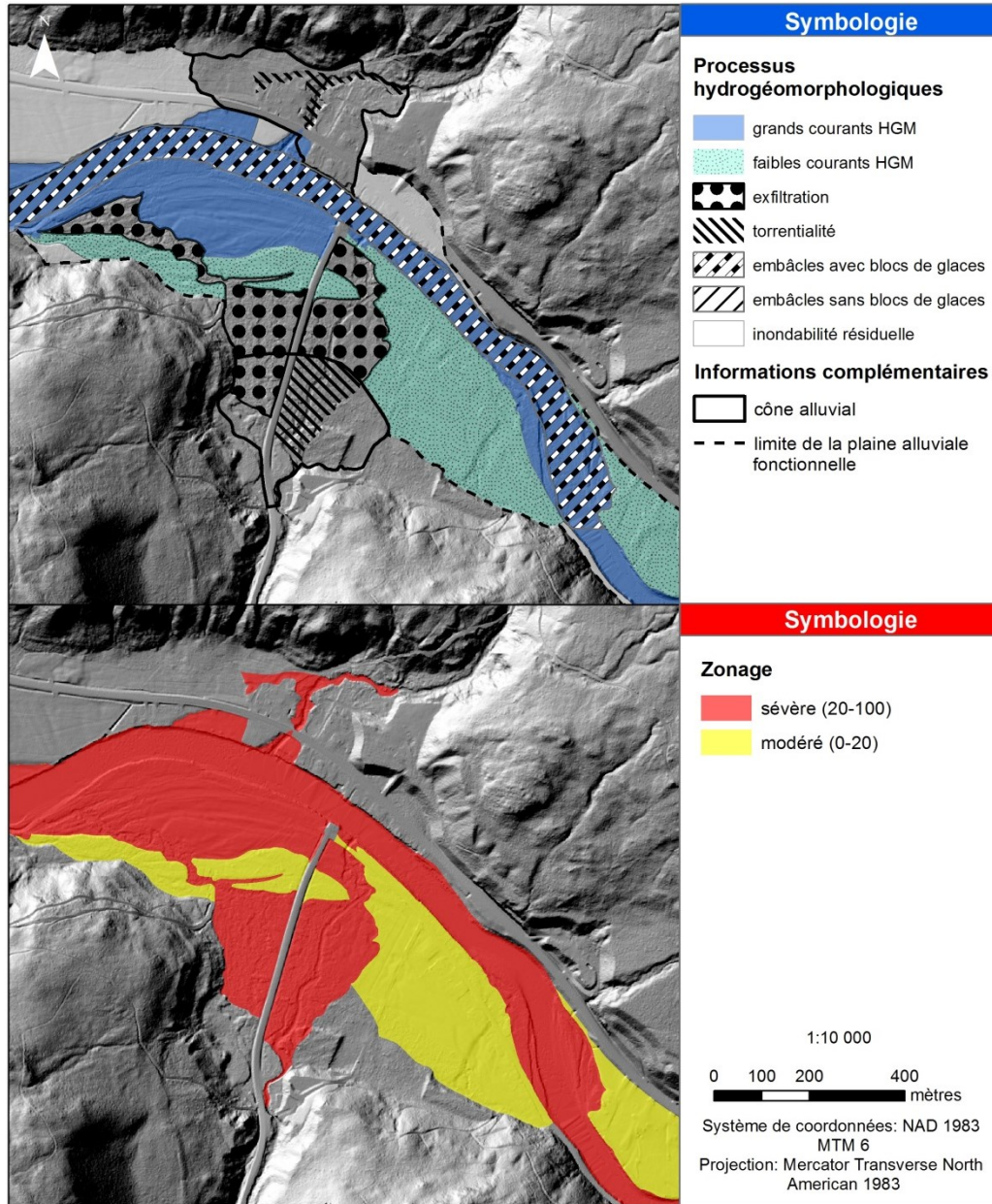


Figure 15 – Cartographies (A) des aléas d’inondation de la plaine alluviale de la rivière Matane et (B) d’un exemple d’une proposition des zones de contrainte à l’aménagement qui leur sont associées (zonage faible non représenté). Adapté de : Demers et al., 2012.

La démarche cartographique des zones inondables proposée en 2012 sera reprise et peaufinée deux ans plus tard par ses auteurs (Demers et al., 2014) dans le but de la rendre méthodologiquement plus transparente. Cette nouvelle démarche méthodologique (résumée

au Tableau 5) est centrée sur la cartographie de modelés et sur la définition de critères pour les identifier (Figure 16). La volonté d'orienter la démarche sur des modelés plutôt que des aléas découle entre autres du principe qu'il est beaucoup plus simple et direct d'illustrer et d'interpréter des processus à partir d'éléments physiques en tout temps identifiables sur la plaine alluviale (Tableau 6). D'autre part, il fallait s'écarter de la terminologie et de la représentation cartographique centrée sur les aléas, car elle employait des termes proches de ceux employés par la PPRLPI, ce qui avait tendance à alimenter la confusion entre les notions d'aléas et de zonages. Les propositions de Demers et al. (2014) s'appuyaient sur des résultats de plusieurs années de réflexions et d'essais/erreurs et représentaient l'occasion de justifier leur décision de renouveler le vocabulaire de la caractérisation HGM. Ainsi, ce renouvellement permis de clarifier le fait qu'il était avantageux (d'un point de vue méthodologique et reproductibilité) de s'adapter à la caractérisation des formes plutôt que de constamment redéfinir la « vocation » des lits moyen et majeur au cas par cas comme il avait été fait pour la rivière Cap-Chat. L'approche HGM française basée sur la représentation de lits qui avait été employée sur les rivières au Renard, Cap-Chat et Verte cédait alors définitivement la place à une approche mieux adaptée au contexte local, soit à une approche HGM configurée pour des plaines alluviales non méditerranéennes. Cette démarche clarifiée d'un point de vue méthodologique aboutie à une cartographie des zones de contraintes à l'aménagement basées sur l'interprétation des processus des divers modelés, mais aussi sur l'information provenant de la modélisation hydraulique et des repères historiques (Figure 17). En ce sens, le zonage qui est proposé est basé sur une approche qui est en fait multidisciplinaire et que l'on désignera également plus tard sous le nom d'approche intégrée ou combinée.

Tableau 5 – Intégration des approches méthodologiques pour la cartographie de l'aléa d'inondation et l'application d'un cadre normatif pour l'aménagement du territoire. Source : Demers et al., 2014.

Approches méthodologiques		Interprétation des processus		Contraintes à l'aménagement
		Fréquence	Puissance	
Modélisation hydraulique		0-20 ans	*	Sévères
		20-100 ans	*	Modérées
Cartographie HGM	Modelé d'érosion	↑	↑	Sévères
	Modelé de sédimentation	*	*	Modérées
	Modelé stabilisé	↓	↓	Faibles
	Modelé glacial	↑	*	Sévères
	Milieu humide riverain	↑	*	Sévères
	Cône alluvial	*	↑	Sévères
Approche historique	Cicatrices glacielles ^(In.)	↑	*	Sévères

↑ : élevé. ↓ : faible. * : variable. ^(In.) : cote d'inondation fixée par l'élévation des cicatrices glacielles.

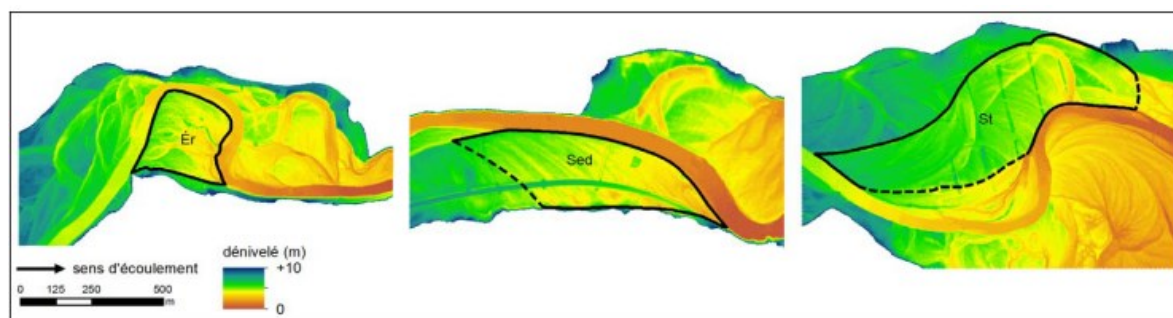


Figure 16 – Illustration des modèles principaux identifiés sur la plaine alluviale de la rivière Matane. Er : érosion, Sed : sédimentation, St : stable. Les lignes discontinues indiquent une limite en transition. Source : Demers et al., 2014.

Tableau 6 – Clef hydrogéomorphologique des quatre modelés de la plaine alluviale fonctionnelle et des milieux humides alluviaux. Source : Demers et al., 2014.

Typologie	Morphologie	Granulométrie	Pédogenèse (indice BUNTLEY-WESTIN)	Végétation
Modelé d'érosion résultant d'écoulements compétents (mode de transport de charge de fond et en suspension)	Topographie irrégulière, chenaux de débordements, formes profilées, talus d'érosion	Hétérométrie	B-W < 10	Arbustive ou arborescente
Modelé de sédimentation résultant d'écoulements lents (mode de transport en suspension)	Topographie arrondie	Limons	B-W < 10	
Modelé stable	Topographie arrondie, plaine inclinée dans la direction de la migration	Limons	B-W > 10	
Modelé glaciaire formes construites par les glaces	<i>Bechevnik</i> (encoche d'érosion et/ou plan incliné)	Hétérométrie		Cicatrices glacielles
Milieux humides alluviaux	Paléochenaux	Limons		Espèces hygrophiles

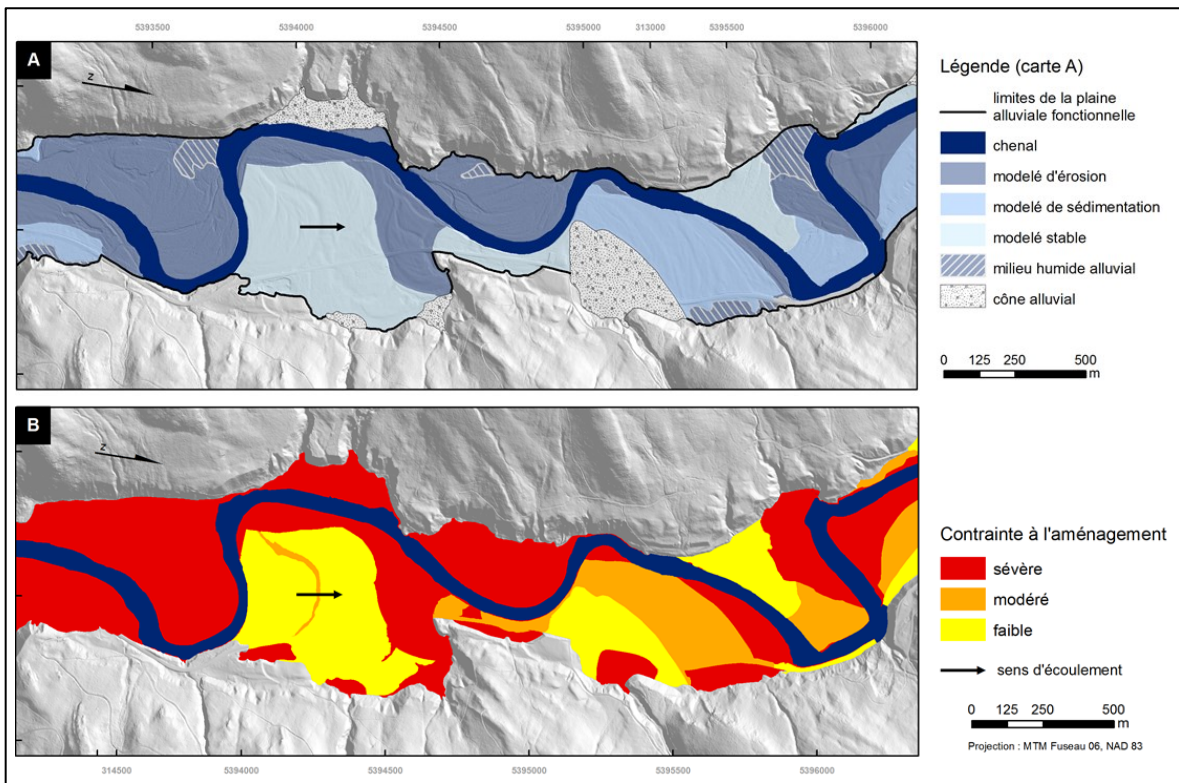


Figure 17 – Cartographies des modelés (A) de la plaine alluviale de la rivière Matane et des zones de contrainte à l'aménagement (B) qui leur sont associées. Source : Demers et al., 2014.

En 2013, une première application de l'approche HGM centrée sur les modelés a été expérimentée sur les rivières de la Roche et Yamaska-Sud-Est dans le cadre du projet de

cartographie par espace de liberté (Biron et al., 2013). La cartographie par espace de liberté est un moyen de gestion intégré des aléas fluviaux (inondabilité et mobilité) qui permet de maintenir ou de restaurer les fonctions physiques et biologiques essentielles du système fluvial en limitant les interventions humaines sur la plaine alluviale. Un des grands atouts de la cartographie par espace de liberté est qu'elle tient compte des fluctuations hydrologiques futures, ce qui la rend particulièrement robuste aux changements climatiques contrairement à la cartographie hydraulique (Buffin-Bélanger et al., 2015). Dans le mandat initial soumis par le MSP, l'application de l'approche HGM à l'environnement fluvial de la rivière Matane devait permettre d'aboutir sur le développement d'une méthodologie cartographique standardisée sur des critères qui englobent l'ensemble des aléas et des caractéristiques spécifiques aux cours d'eau du Québec tout en répondant aux besoins en matière de gestion des risques (Demers et al., 2012). Cependant, lors de la mise en pratique de la méthodologie sur les rivières de la Roche et Yamaska Sud-Est, celle-ci s'est révélée inappropriée en raison de la spécificité des caractéristiques de la rivière Matane et de sa plaine alluviale.

Malgré ce constat, l'approche HGM développée sur la Matane a permis d'identifier des formes¹⁰ (Figure 18) à partir desquelles une hiérarchisation de l'inondabilité de la plaine alluviale en fonction de la fréquence d'inondation a pu être construite (Figure 19) : N1 = très fréquente et/ou avec fort courant ($\approx 0-20$ ans), N2 = fréquente de faible courant ($\approx 20-100$ ans) et N3 = peu fréquente ($\approx >100$ ans) (Biron et al., 2013). Cette classification fréquentielle est bien évidemment qualitative, car les modelés sont avant tout le résultat de puissances spécifiques particulières ou le reflet de la force hydraulique des écoulements lors des inondations (Leopold and Emmett, 1976). En effet, plus la puissance spécifique est élevée, plus la capacité de l'écoulement à transporter les sédiments est élevée (Hickin, 1995). La fréquence et la puissance spécifique ne sont pas des paramètres corrélés, mais une analyse fréquentielle a tout de même permis, encore une fois, de caler la cartographie HGM sur les normes de la PPRLPI.

¹⁰ Les formes sont en fait ce qu'appelleront Demers et al. (2014) « modelés » un an plus tard.

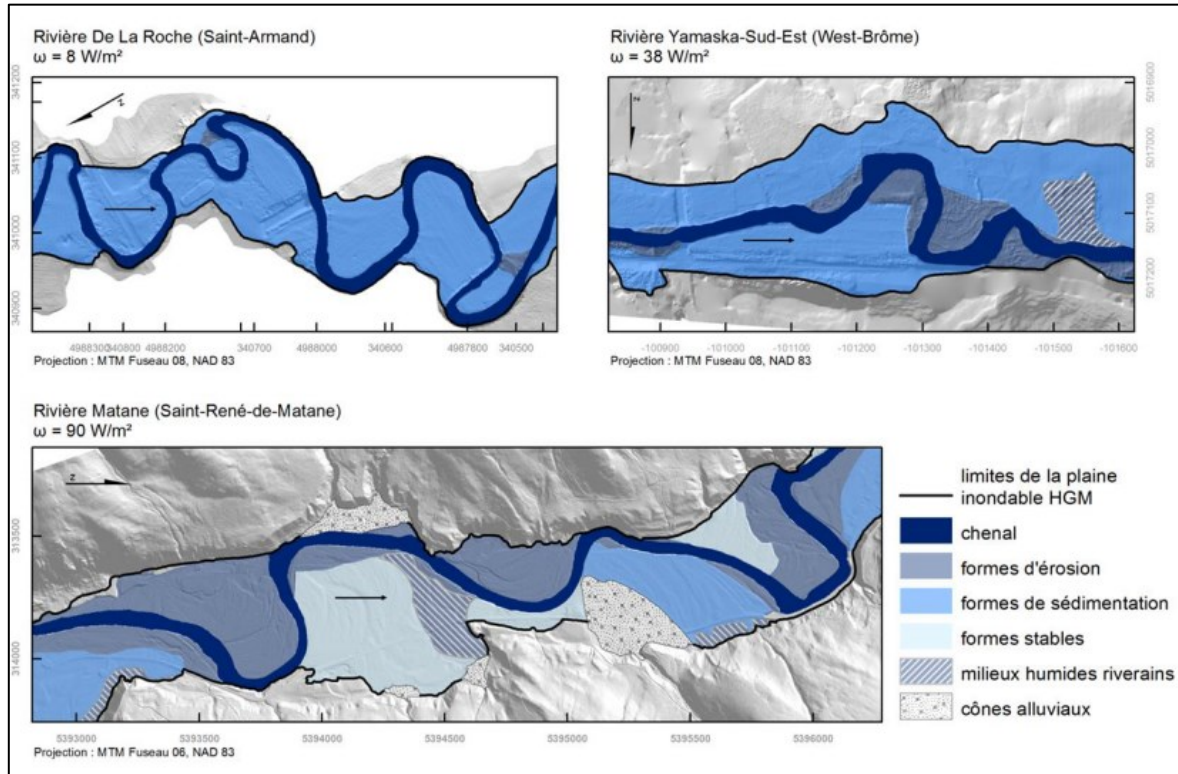


Figure 18 - Exemples de cartographies hydrogéomorphologiques appliquées aux rivières de la Roche, Yamaska Sud-Est et Matane. Source : Biron et al., 2013.

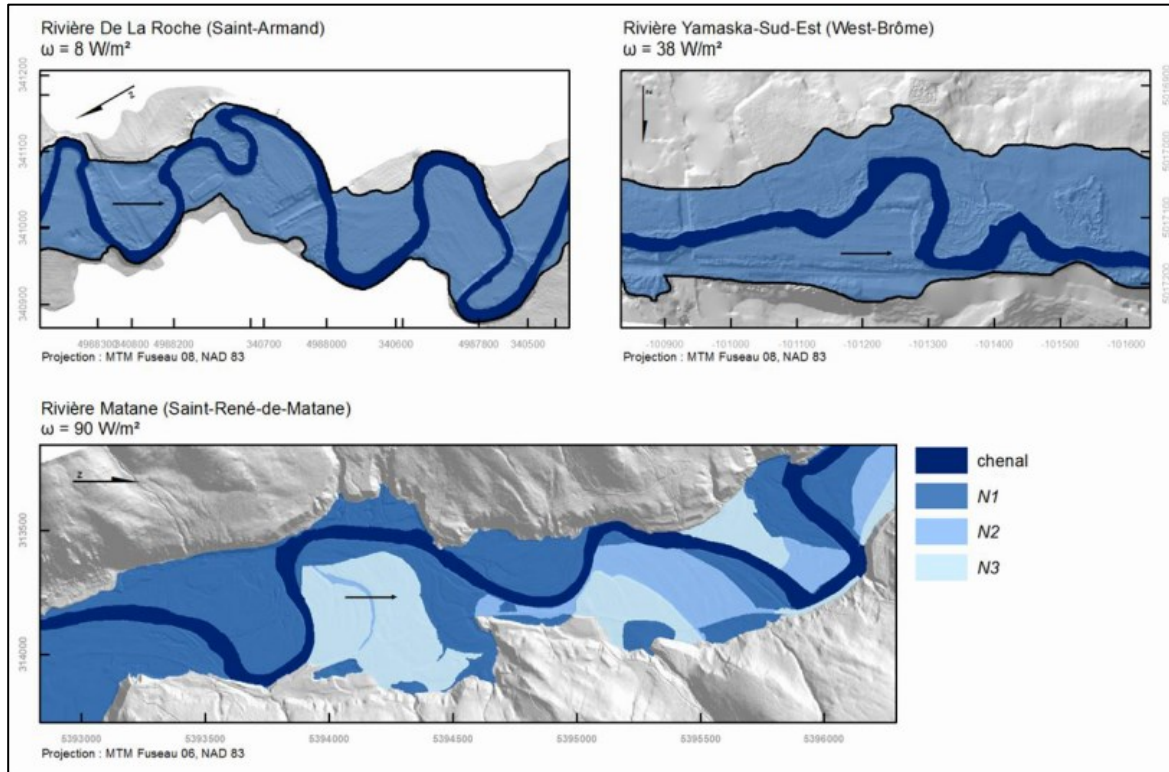


Figure 19 - Exemples cartographiques de l'espace d'inondabilité appliqué aux rivières de la Roche, Yamaska Sud-Est et Matane. N1 = très fréquente et/ou avec fort courant ($\approx 0-20$ ans), N2 = fréquente de faible courant ($\approx 20-100$ ans) et N3 = peu fréquente ($\approx >100$ ans). Source : Biron et al., 2013.

Dans le cas des plaines alluviales des rivières de la Roche et Yamaska Sud-Est, c'est l'accumulation de sédiments fins apportés lors des épisodes de débordement qui prédominent la morphogénèse de la plaine alluviale. C'est pourquoi se sont essentiellement des modèles sédimentaires simples et peu contrastés qui couvrent la plus grande superficie de celles-ci. En appliquant la clef décisionnelle de la rivière Matane, ce type de modèle se serait directement retrouvé sous un niveau de contrainte à l'aménagement faible. Or, la fréquence d'inondation pour ce type de plaine alluviale était plutôt interprétée comme étant élevée. Aussi, les résultats d'une modélisation hydraulique sur chacun des sites a révélé que la presque totalité de la plaine était inondée par les crues de récurrence inférieures à 20 ans. D'un point de vue de l'aménagement du territoire et de la gestion de l'aléa d'inondation, il était donc indispensable d'adapter la clef décisionnelle aux spécificités de ces rivières. De manière à conserver une démarche nomothétique itérative et de sorte à poursuivre le

développement logique de l'approche HGM, les auteurs ont proposé d'ajuster la démarche en fonction d'un critère supplémentaire relevant du type de plaine alluviale à l'étude. Cette distinction permettait de faire la distinction entre les modelés de sédimentation inondables par les crues de récurrence inférieure à 20 ans (de la Roche et Yamaska Sud-Est) et les modelés de sédimentation inondables par les crues de récurrence supérieure à 20 ans (Matane) (Tableau 7).

Nanson et Croke (1992) proposent une classification des types de plaine alluviale selon le recoupement de trois paramètres, soit la puissance spécifique, la composition sédimentaire du plancher alluvial et l'agencement des facteurs géomorphologiques. Toutefois, de manière à rendre l'application de la clef de décision objective, seul le critère basé sur la puissance spécifique fut retenu pour mettre en application la classification. Ce choix repose sur le principe que la superficie inondable d'une plaine alluviale varie en fonction de la puissance spécifique et donc indirectement en fonction de la pente et de la largeur du chenal en condition plein bord. La puissance spécifique « seuil » permettant de faire la distinction entre le type de plaine alluviale des rivières de la Roche et Yamaska Sud-Est et celui de la rivière Matane fut identifiée à 75 W/m^2 . En dessous de 75 W/m^2 , l'agencement des formes de la plaine alluviale est simple, ce qui prédispose une proportion significative de la plaine alluviale à être inondée par les crues de récurrence 0-20 ans. À l'inverse, au-dessus de 75 W/m^2 , l'agencement des formes de la plaine alluviale est complexe, ce qui prédispose une proportion marginale de la plaine alluviale à être inondée par les crues de récurrence 0-20 ans (Biron et al., 2013). C'est donc sur cette hypothèse que les auteurs ont décidé de ne pas subdiviser l'aléa d'inondation des plaines alluviales des rivières de la Roche et Yamaska Sud-Est, dont la puissance spécifique était inférieure à 75 W/m^2 , et qu'ils ont opté pour un espace d'inondabilité avec une gestion de l'aménagement fortement contrainte pour l'intégralité de celles-ci.

Dans le cadre d'une application cartographique par espace de liberté, un troisième critère décisionnel intervient dans la classification de l'espace d'inondabilité. Celui-ci représente les apports à l'intégrité du système fluvial (Tableau 7). Même si ce critère

n'intervient pas de manière primaire dans le choix de l'espace d'inondabilité¹¹, il donne un poids supplémentaire à la justification de l'implantation d'un espace de liberté.

Tableau 7 – Hiérarchisation des critères basés sur des notions d'aléa et d'intégrité pour la composition de l'espace d'inondabilité (EI). Source : Biron et al., 2013.

Approches méthodologiques	Aléa		Apports à l'intégrité du système fluvial	EI	
	fréquence	puissance			
Cartographie HGM	style fluvial/plaine inondable ($\omega < 75 \text{ W/m}^2$)				
	formes d'érosion	< 2 ans	↑	transit eau et sédiments grossiers	N1
	formes de sédimentation	< 20 ans	*	stockage en sédiments fins et en nutriments	N1
	style fluvial/plaine inondable ($\omega > 75 \text{ W/m}^2$)				
	formes d'érosion	*	↑	transit eau et sédiments grossiers	N1
	formes de sédimentation	> 20 ans	*		N2
	formes stabilisées	> 100 ans	↓		N3
	formes glacielles	n/d	↑	transit glace	N1
	cônes alluviaux	n/d	↑		N1
	milieux humides riverains	< 2 ans	*	stockage des débits de crues et soutien du débit d'étiage	N1
Modélisation hydraulique	0-20 ans	0-20 ans	n/d	apports en sédiments fins et en nutriments	N1
	20-100 ans	20-100 ans	n/d		N2

(↑ : élevé; ↓ : faible; * : variable; n/d : non-disponible)

L'ajustement de l'approche HGM pour départager les plaines simples des plaines complexes est en soit intéressant dans la perspective d'une automatisation et d'une généralisation de l'approche HGM, permettant ainsi une reconnaissance accrue de l'approche par les autorités supérieures. Cependant, l'état des connaissances HGM et le développement de l'approche HGM pour les cours d'eau du Québec ne disposent pas d'un nombre d'études de cas suffisant pour valider ces hypothèses et encore moins pour spécifier un seuil de puissance spécifique qui permettrait d'automatiser l'identification des types de plaine alluviale. Depuis 2008, l'application répétée de l'approche HGM sur des cours d'eau du Québec méridional a permis d'élargir les connaissances sur la diversité

¹¹ Les gestionnaires privilégient avant tout le caractère dommageable d'un aléa qui se définit par les processus qui le caractérisent. Pourtant, les services écosystémiques rendus par le milieu fluvial sont indirectement bénéfiques à la gestion du risque d'inondation (ex. : le rôle temporisateur des milieux humides sur la magnitude de l'aléa d'inondation).

morphogénétique des plaines alluviales et par le fait même de mettre au jour une multitude de paramètres dont la variabilité et leur combinaison est variables d'un milieu à l'autre, rendant d'autant plus compliqué l'automatisation de l'application de l'approche HGM.

Enfin, une autre question reste en suspens. À quelle échelle la prise de décision concernant l'identification morphogénétique des types de plaine alluviale devrait-elle être faite ? Dans certains contextes alluviaux comme celui de la Yamaska Sud-Est, la puissance spécifique a une grande variabilité longitudinale (Figure 20). Il n'est donc pas difficile d'imaginer qu'en plus de complexifier la cartographie, une segmentation à grande échelle ($< 1 : 5000$) comme celle-ci serait non efficace d'un point de vue de la gestion du territoire. De ce fait, la distinction morphogénétique des types de plaine alluviale aurait probablement avantage à être effectuée à plus petite échelle ($> 1 : 10\ 000$).

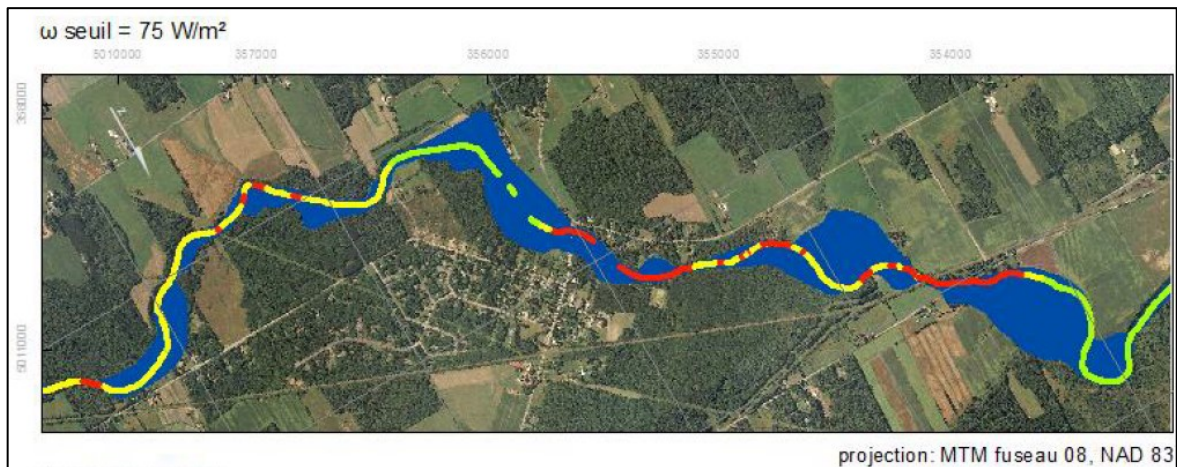


Figure 20 – Variabilité longitudinale de la puissance spécifique sur la rivière Yamaska-Sud-Est (municipalité de Brigham). Adapté de : Biron et al., 2013.

2.4 INTEGRATION LEGISLATIVE ET INSTITUTIONNALISATION DE L'APPROCHE HGM

En 2014, la municipalité de Bonaventure est la première à recourir à l'application de l'approche HGM sur le territoire du Québec. Celle-ci souhaite actualiser sa cartographie des zones inondables qui était jusque-là basée sur l'approche dite du « pinceau large ». Le

MSP, le MDDEFP¹², le CEHQ, et le MAMROT¹³ ont collaboré dans le but d'évaluer la possibilité d'intégrer au schéma d'aménagement de la MRC de Bonaventure les cartes HGM produites pour la plaine alluviale de la rivière Bonaventure et les cartes de submersion côtière produites pour la zone littorale de son embouchure.

Pour cartographier les zones inondables de la rivière Bonaventure, Marchand et al. (2014) utilisent une approche HGM similaire à celle de Demers et al. (2012 et 2014). Bien que leur cartographie finale représente des aléas (Figure 21), la démarche est centrée sur les modelés fluviaux. La cartographie illustre les zones de grands et de faibles courants HGM qui sont dans un premier temps définies par la morphologie de la plaine alluviale. Dans le cas de la rivière Bonaventure, les modelés représentent des indicateurs particulièrement efficaces pour identifier les zones de grands courants. Par contre, il est toujours délicat de tracer les limites des zones de faibles courants à partir d'une simple interprétation des modelés. C'est pourquoi dans un deuxième temps, les auteurs ont préféré modéliser (par l'entremise d'un MNZI¹⁴) une surface d'inondation (cote de crue HGM) en interpolant l'altitude de marqueurs d'inondation en eau libre (laises de crue et repères historiques¹⁵) le long d'un profil longitudinal (PLZI) pour connaître l'extension maximale des crues utilisées comme références pour ce secteur. C'est donc en soustrayant les zones de grands courants à la surface d'inondation identifiée que les zones de faibles courants ont été obtenues. Conjointement à ces deux analyses, la pédologie (indicateur de stabilité) et l'écologie végétale (taxonomie et morphologie) auront permis de valider le caractère inondable ou non des surfaces de la plaine alluviale. Aussi, dans la perspective où la hauteur d'immunisation des bâtiments de la zone de faibles courants est déterminée à partir de la cote de crue de récurrence 100 ans, il était important que la cote de crue HGM puisse respecter cette norme imposée par la PPRLPI. Étant donné que la cote de crue HGM a été modélisée à partir d'évènements dont la récurrence est inférieure à 100 ans, 50 cm furent

¹² MDDEFP : ministère du Développement durable, de l'Environnement, de la Faune et des Parcs (aujourd'hui renommé sous l'acronyme MDDELCC).

¹³ MAMROT : ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire.

¹⁴ MNZI : modèle numérique de zone inondable. En France, le MNZI est obtenu à partir d'indicateurs morphologiques pour représenter la crue extrême ou de faible probabilité (Montané et al., 2014).

¹⁵ Témoignages et archives.

ajoutés à celle-ci comme marge de sécurité. En effet, la PPRLPI stipule qu'une cote sécuritaire d'au moins 30 cm doit être ajoutée aux niveaux d'eau dont la fréquence du débit est inférieure à 100 ans (PPRLPI, D. 468-2005, Ann. 1). Il est important de spécifier que la cote de crue HGM se distingue de la cote de crue hydraulique par le fait qu'elle n'ait pas été établie à partir d'une analyse fréquentielle. La cote de crue HGM a également permis de produire une cartographie des hauteurs d'eau (Figure 22), qui est très utile dans le cadre de l'élaboration d'un plan de mesures d'urgence pour l'évacuation par embarcation ou même pour définir des seuils de déplacement en position debout proportionnels à la capacité physique d'une personne dans une hauteur d'eau spécifique.

L'intégration de la cartographie HGM au schéma d'aménagement représente un premier pas pour la reconnaissance législative des contributions de l'approche HGM. En se calquant sur les normes de la PPRLPI, les cartes des zones de grands et de faibles courants HGM obtiennent une valeur législative légitime, alors que la valeur des cartes des hauteurs d'eau HGM demeure strictement informative.

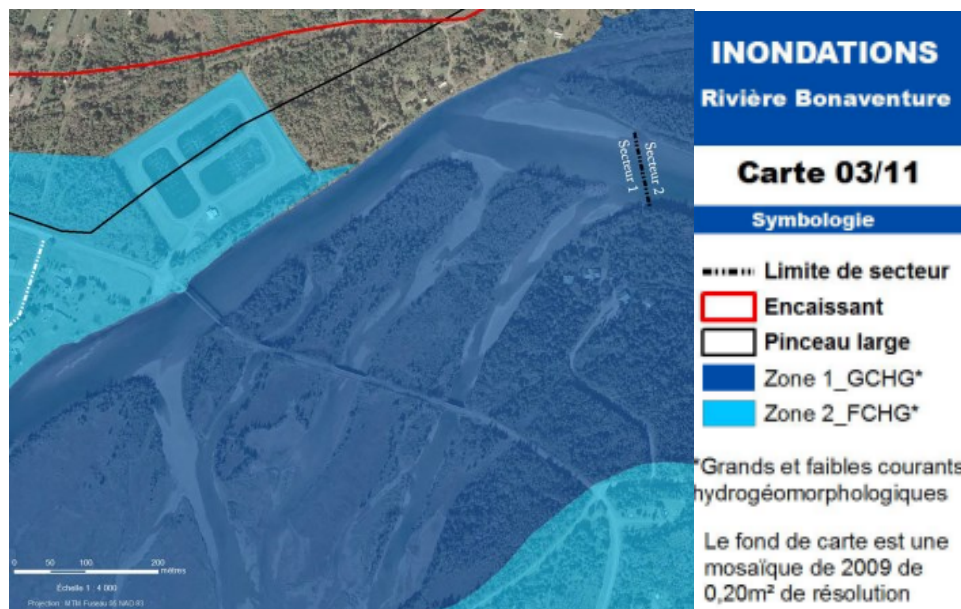


Figure 21 – Carte des zones de grands et de faibles courants HGM de la rivière Bonaventure. Source : Marchand et al., 2014.

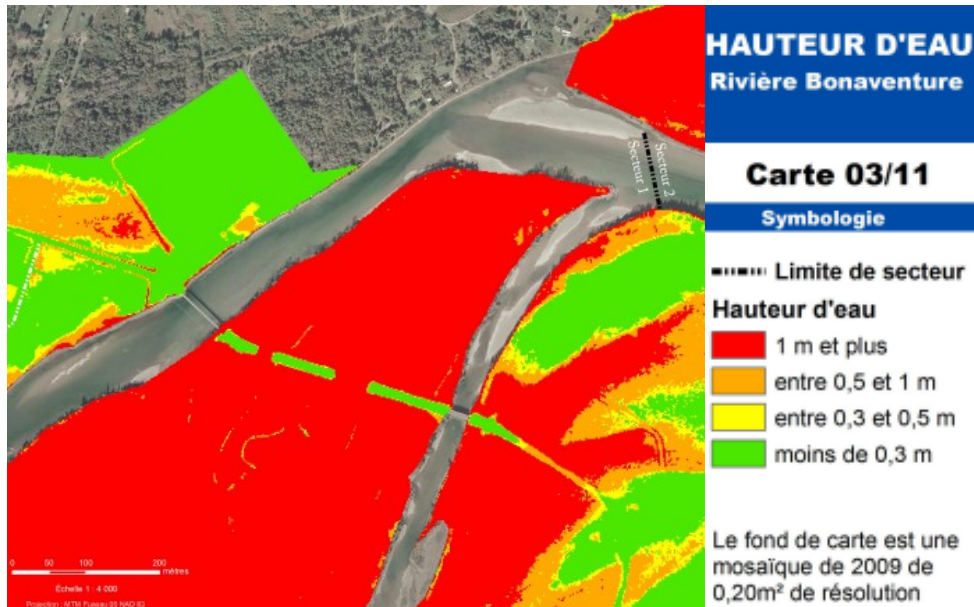


Figure 22 – Carte des hauteurs d’eau HGM de la rivière Bonaventure. Source : Marchand et al., 2014.

En 2015, le *ministère du Développement durable, de l’Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques* (MDDELCC) entreprend pour la première fois une cartographie multidisciplinaire des zones inondables de la rivière de La Fourche dans la MRC de Bellechasse qui intègre l’approche HGM. Avec la cartographie HGM du schéma d’aménagement et de développement de la MRC de Bonaventure, c’est donc dire que l’intérêt des institutions gouvernementales envers l’approche HGM est grandissant.

Le choix de combiner plusieurs approches pour cartographier les zones inondables de la rivière de la Fourche est né de la désuétude des relevés topographiques qui sont des données essentielles pour modéliser le plus fidèlement possible les conditions hydrauliques du milieu. La morphologie du chenal et de la plaine alluviale de la rivière de la Fourche a été modifiée par de fortes crues dont la plus récente a été provoquée par la tempête post-tropicale Irène entre le 28 et le 29 août 2011 (crue de récurrence 100 ans). Ce type d’évènement a un impact exacerbé sur les tronçons sensibles à l’érosion et où la capacité de transport sédimentaire est suffisamment faible pour la formation de bancs d’accumulation. Ces évènements ont tendance à générer des embâcles de bois morts et de glaces ainsi que

des avulsions du chenal principal qui ne sont pas pris en compte par l'approche HHS. Par conséquent, l'intégration de l'approche HGM se révélait tout à fait pertinente et complémentaire.

Contrairement aux rivières précédentes, dont la cartographie est avant tout bâtie sur l'approche HGM, celle de la rivière de la Fourche ne l'est pas. Dans le cas de la rivière de la Fourche, se sont plutôt les qualités des approches HGM, HHS et événementielle¹⁶ qui ont été combinées pour cartographier le plus justement possible les zones inondables. En effet, le MDDELCC perçoit l'approche HGM comme une approche spécifique plutôt qu'intégratrice. De plus, la démarche est inspirée du concept d'espace de liberté qui combine les aléas de mobilité et d'inondabilité en prenant soin d'exprimer une cartographie selon les normes émises par la PPRLPI.

L'approche HGM a servi à délimiter les limites de la PAF qui contient les processus fluviaux actuels. L'identification du premier talus (classification des pentes : Figure 23a), l'utilisation des approches événementielle et HHS où la morphologie a été dénaturée par l'anthropisation (notamment par les remblais), l'identification de la présence de modelés fluviaux (principalement les chenaux de débordement) et de milieux humides sont toutes des techniques qui ont servi à préciser l'extension de la PAF.

Les témoignages recueillis auprès des riverains et le recensement des laisses de crues du 28 et 29 août 2011 auront permis d'étayer la cartographie sur une approche événementielle. Les marqueurs d'inondations obtenus ont été exploités selon la démarche appliquée par Marchand et al. (2014) sur la rivière Bonaventure pour obtenir les aspects hydrauliques et hydrologiques des crues de la rivière de la Fourche (hauteur d'eau : Figure 23b). Cette approche aura permis de valider et de préciser les limites de la PAF et de la modélisation HHS.

L'approche HHS a quant à elle servi à valider les deux autres approches et à préciser la zone de grand courant. De plus, elle a permis d'estimer le débit instantané et la

¹⁶ Synonyme d'approche historique.

réurrence de la crue provoquée par la tempête Irène. Enfin, il a été possible de calculer des vitesses d'écoulement, des cotes de crue, des hauteurs d'eau et des zones inondables pour des débits de réurrence 20 ans et 100 ans.

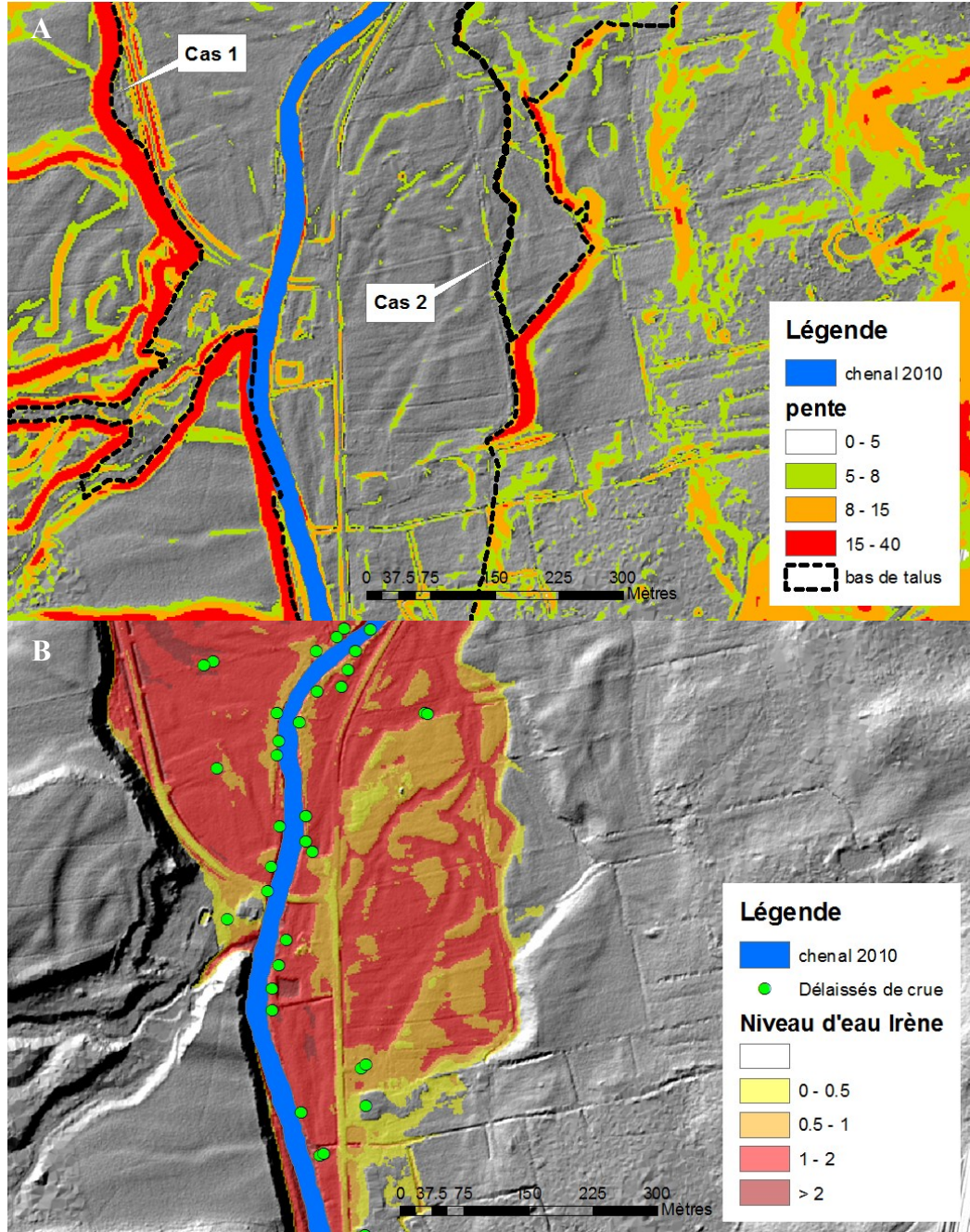


Figure 23 – A) Délimitation du bas du premier talus à partir d’une couche matricielle de pente. B) Reconstitution de l’inondation lors de la tempête post-tropicale Irène à partir des délaissés de crue. Source : MDDELCC, 2015.

Les zones de faible et de grand courant sont déterminées suite à une analyse combinée des résultats issus de ces trois approches. Autrement dit, les niveaux d’eau

simulés par les crues de récurrence 20 ans et 100 ans ainsi que ceux estimés à partir des marqueurs d'inondation de la crue Irène ont été comparés entre eux et aux limites identifiées par l'approche HGM.

Cette démarche cartographique est dite intégrée, car chacune des approches employées complète et valide les deux autres, ce qui permet d'obtenir une cartographie des aléas d'inondation très proche de la réalité. Le Tableau 8 résume parfaitement l'imbrication des approches et le choix opéré pour la délimitation des zones inondables en fonction des conditions de chaque tronçon. Ce qui est important à retenir dans le cas présent c'est que l'approche HGM a été privilégiée pour les tronçons actifs étant donné l'incertitude des zones inondables identifiées par la modélisation hydraulique.

Tableau 8 – Synthèse de l'imbrication des approches hydrogéomorphologique, événementielle et hydraulique menant à la définition des zones inondables. Source : adapté de MDDELCC, 2015.

	Tronçons actifs	Tronçons stables	Tronçons sans MNE
Zone de grand courant	<i>Espace de mobilité</i> + <i>PAF</i> <i>avec modèles indicatifs de courants dynamiques</i> + <i>Milieux humides</i> + <u>Zone inondée par la crue Irène</u> (niveau eau > 0,5 m [†])	Zones inondables simulées de récurrence 20 ans + <u>Zone inondée par la crue Irène</u> (niveau eau > 0,5 m [†])	<i>Espace de mobilité</i> + <i>PAF</i>
Zone de faible courant	<u>Zone inondée par la crue Irène*</u> (niveau eau < 0,5 m [†]) + <i>PAF</i> <i>sans modèles**</i>	<u>Zone inondée par la crue Irène *</u> (niveau eau < 0,5 m [†]) + <i>PAF</i> <i>sans modèles**</i>	
Espace de liberté	<i>Espace de mobilité</i>		

† Hauteur d'eau limite pour le déplacement d'un adulte et d'un véhicule lourd (peu importe la vitesse d'écoulement).

*L'approche hydraulique a révélé que la crue Irène avait une récurrence de 100 ans.

**Sans modelé ou plutôt avec absence de modelé d'érosion.

Hydrogéomorphologique, événementielle et *hydraulique*.

Deux cartographies résultent de cette analyse combinée. La première est centrée sur les processus d'inondabilité et de mobilité (cartographie des aléas fluviaux : Figure 24), alors que la deuxième est centrée sur la législation de la PPRLPI avec les zones de faible et de grand courant (cartographie des zones inondables : Figure 25). Aussi, cette seconde cartographie intègre une troisième zone appelée « espace de liberté » dont la dénomination peut laisser place à la confusion, car elle se définit différemment de celle de Biron et al. (2013). L'espace de liberté comme on l'entend ici est employée pour englober les tronçons dynamiques ou « actifs » qui se manifestent sous la forme de vastes champs sédimentaires (lit mineur large), c'est-à-dire, des zones d'aggradation construites par l'apport de sédiments grossiers et la faible capacité de transport. Bien que par l'entremise des observations terrains et photographiques celles-ci soient facilement identifiables, leur localisation a été faite de manière objective à l'aide d'une segmentation basée sur la puissance spécifique. En termes de restriction à l'aménagement, la zone d'espace de liberté est équivalente à la zone de grands courants qui est sévèrement réglementée. Toutefois, comme son premier but est de conserver les fonctions physiques essentielles du cours d'eau, il est en plus interdit de stabiliser les berges avec des ouvrages de protection tels que des enrochements.



Figure 24 – Cartographies des aléas fluviaux centrées sur les processus d’inondabilité et de mobilité. Source : MDDELCC, 2015.

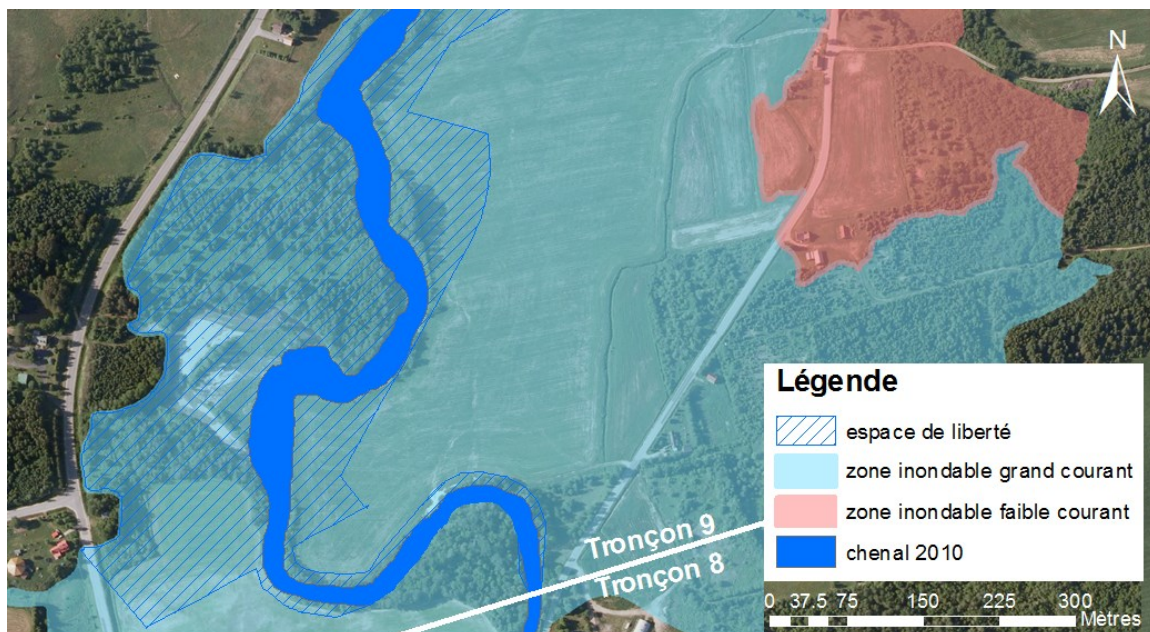


Figure 25 – Cartographie des zones inondables de grand courant, de faible courant et de l’espace de liberté. Source : MDDELCC, 2015.

2.5 DEFIS ET DEVELOPPEMENTS FUTURS

Le portrait historique de l'approche HGM au Québec permet d'effectuer des constats et d'entrevoir plusieurs défis à relever dans les développements futurs de l'approche. L'application de la version adaptée de l'approche HGM au contexte de la rivière Matane à d'autres environnements fluviaux a montré qu'un large travail d'échantillonnage pour connaître la diversité des types de plaine alluviale du Québec méridional restait à faire. Effectivement, l'interprétation des processus des modèles de sédimentations des plaines alluviales des rivières de la Roche et Yamaska-Sud-Est diffère de celle de la rivière Matane. C'est pourquoi, dans la perspective où l'on cherche à tendre vers un zonage logique et adapté à la réglementation québécoise, il était essentiel de peaufiner l'approche pour qu'elle s'accorde avec les réalités intrinsèques de chaque plaine alluviale. L'évocation des termes « simple » et « complexe » pour distinguer des types morphologiques de plaines alluviales s'avérait alors parfaitement justifié pour aboutir sur une cartographie juste des zones inondables. De plus, leur emploi permettrait une approbation législative plus encline dans le sens où une sorte de prémices à la standardisation de l'approche HGM verrait le jour. Une identification pré-cartographique du type de plaine alluviale basée sur la puissance spécifique permettrait de justifier et d'opérer judicieusement une subdivision de la plaine alluviale. Toutefois, tant et aussi longtemps que les limites de la diversité des plaines alluviales du Québec méridional n'auront pas été clairement définies, le seuil de 75 W/m^2 qui marque la distinction entre les plaines « simple » et « complexe » restera à coup sûr particulièrement audacieux. Le simple fait qu'il fut déterminé sur les seuls paramètres de trois faciès alluviaux le remet singulièrement en doute. De ce fait, les hypothèses qui le soutiennent devraient être assurément testées avant de faire de celui-ci une application officielle. Par ailleurs, il serait intéressant et pertinent de vérifier si, en plus de la puissance spécifique, il existe d'autres paramètres qui permettraient de classer les types de plaine alluviale avec une meilleure corrélation par rapport aux superficies touchées par les crues de récurrence 0-20 ans.

Actuellement, aucun portrait ne permet de présenter l'étendue de la variabilité des cours d'eau et des plaines alluviales du Québec. Un tel portrait permettrait d'évaluer la représentativité des études de cas menées jusqu'à maintenant et probablement mieux identifier les cours d'eau qui sont propices à l'application d'une cartographie hydrogéomorphologique. Aussi, il serait pertinent de définir les conditions anthropogéomorphologiques (Ashmore, 2015) propices à une approche plutôt qu'une autre et, le cas échéant, à une combinaison de plusieurs approches méthodologiques, car il est vrai que la présence humaine et la variabilité des modifications causées par les activités humaines sur le paysage influencent la démarche cartographique (voir section 3.3).

L'approche HGM est également l'occasion de prendre davantage en compte la dynamique hydrosédimentaire dans le processus de cartographie des zones inondables. Par exemple, en analysant la trajectoire géomorphologique du cours d'eau dans le temps ou en réalisant un bilan sédimentaire, nous sommes plus enclins à apprécier les changements qui s'opèrent dans le milieu et comprendre à quel stade de changement le système se situe (Parker et al., 2015). Est-il en ajustement positif/négatif ou en équilibre ? Ainsi, le zonage peut être adapté en conséquence. Les zones d'aggradation dans le lit mineur peuvent avoir des répercussions sur la géométrie du cours d'eau (Nicholas et al., 1995) et des impacts sur l'étendue des inondations (Lane et al., 2007). Bien qu'il soit difficile de prévoir à quel moment la capacité limite du chenal à accumuler des sédiments sera dépassée et de prédire la tournure que prendra la portée de l'inondation, l'adoption d'un zonage sévère pourrait faire en sorte de limiter la vulnérabilité à long terme en améliorant la prise de décision par rapport à l'aménagement de ces secteurs où l'incertitude est grande. Une segmentation du cours d'eau à l'aide de la puissance spécifique (Bizzi et Lerner, 2015 ; Parker et al., 2015 ; Lea et Legleiter, 2016) peut, tout comme l'interprétation d'un profil en long (Church et Jones, 1982), aider à pointer et à anticiper les endroits où la réponse géomorphologique est plus forte. Des investigations pourraient être faites du point de vue de l'aléa de torrencialité en incluant dans une analyse morphométrique des bassins versants les variables d'aire de drainage et de pente. La place de la torrencialité dans le bilan sédimentaire est légitimée par la forte charge sédimentaire et la grande capacité morphologique qui lui sont associées.

Il serait intéressant de pouvoir valider la cartographie HGM d'un cours d'eau où il n'y a pas eu de crue récente avec un événement de crue post-cartographie tout comme l'a fait Chave (2002) en comparant la cartographie HGM des affluents de l'Aude aux limites des inondations provoquées par les fortes pluies du mois de novembre 1999 dans les Pyrénées-Orientales.

Aussi, depuis que les MRC ont à leur charge la gestion des cours d'eau de leur territoire, celles-ci font de plus en plus affaire avec le secteur privé. C'est pourquoi, progressivement, des firmes de conseillers en environnement cherchent à développer leur champ de compétences en cartographie des risques associés aux inondations en se tournant tout naturellement vers des techniques rapides à mettre en place basées sur les principes fondamentaux des sciences HGM. Par exemple, en 2012, suite à une sollicitation de la MRC du Haut-Saint-François, Aménagements Natur'Eau-Lac Inc. a développé une analyse cartographique des risques potentiels pour la sécurité des biens et des personnes situés dans le bassin versant de la rivière Eaton basée sur le dynamisme des cours d'eau à l'intérieur des limites de la plaine alluviale (Natur'Eau-Lac, 2012). D'autres cartographies touchant à la thématique fluviale et réalisées par le secteur privé utilisent plus ou moins implicitement les prémisses de l'approche HGM. On peut citer, entre autres, les cartographies des rivières au Saumon (Natur'Eau-Lac, 2013) et du Gros-Morne (Olsen, 2015) ainsi que les cartographies des ruisseaux Martin (Olsen et Buffin-Bélanger, 2012), Métairie (Péloquin-Guay, 2013) et des Douze (Massé et Claveau, 2015) (Figure 26).

Cet engouement pour la géomorphologie et la dynamique fluviale naît de la multiplication des applications de la cartographie HGM au Québec depuis 2007, mais aussi de l'émergence de considérations des milieux académiques vers des problématiques plus appliquées. Les connaissances et l'expertise en cartographie HGM développées au sein du secteur académique sont en bonne voie d'intégration vers le secteur gouvernemental alors qu'elles font encore particulièrement défaut au secteur privé du Québec.

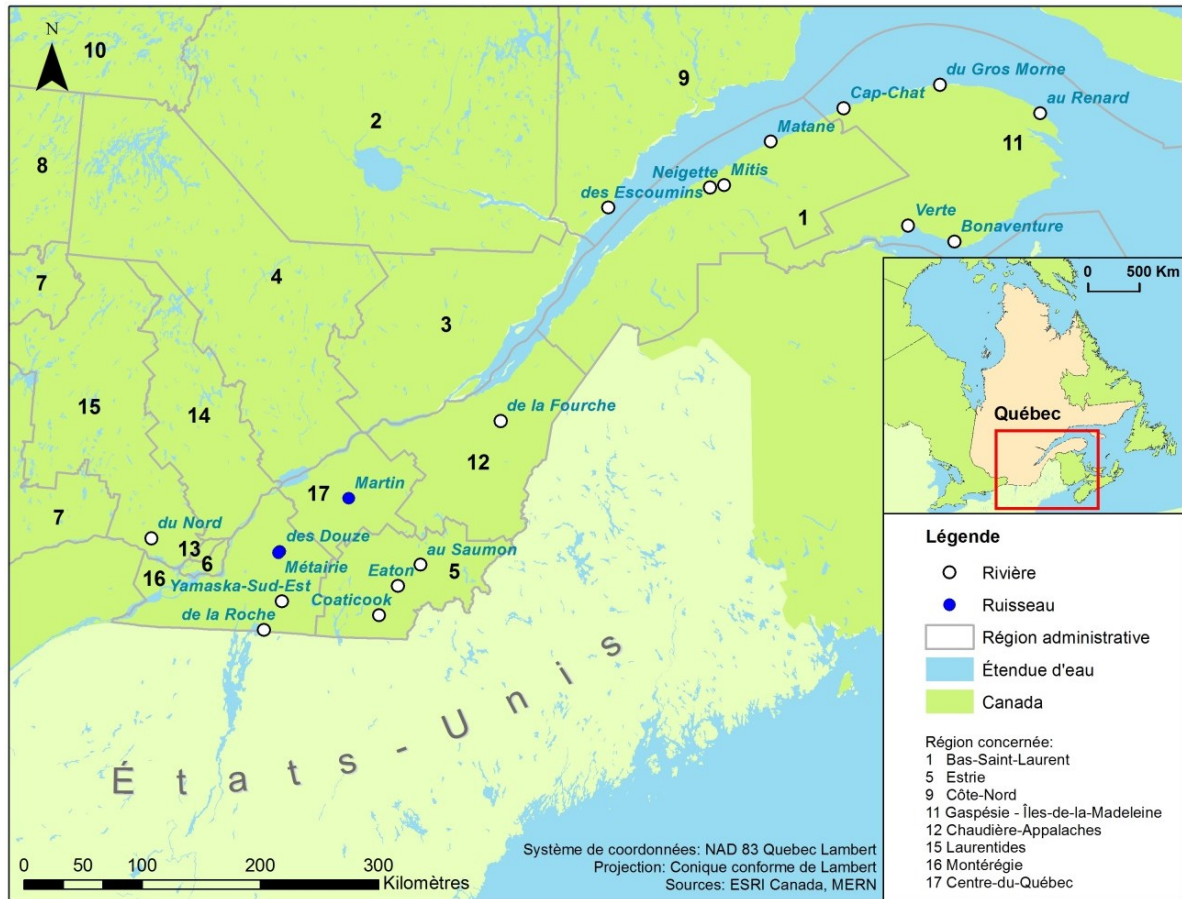


Figure 26 – Localisation des cartographies HGM ou utilisant les prémisses de l’approche HGM des cours d’eau du Québec.

2.6 CONCLUSION

Sur les huit rivières québécoises¹⁷ qui ont contribué à son développement, trois rivières furent cartographiées avec la Méthode HGM française (Ballais et al., 2011b) avant de prendre conscience d’une inadéquation de celle-ci. En effet, cette méthode a été conçue pour des plaines alluviales structurées par un régime hydroclimatique de type

¹⁷ Au Renard, Cap-Chat, Verte, Matane, de la Roche, Yamaska-Sud-Est, Bonaventure et de la Fourche (Figure 26).

méditerranéen. C'est pourquoi l'approche HGM n'eut d'autre choix que d'être adaptée aux caractéristiques intrinsèques du territoire du Québec par son application répétée sur plusieurs rivières.

À travers cette revue de littérature exhaustive sur l'évolution de l'approche HGM au Québec, un constat apparaît. Excepté la Méthode HGM française qui promeut la cartographie des zones inondables uniquement par l'analyse de la géomorphologie fluviale, l'approche HGM québécoise à son stade d'évolution le plus récent a tendance à s'appliquer de concert avec les autres approches et à s'intégrer difficilement dans un cadre rigide et automatisé. Hormis la cartographie HGM des rivières au Renard, Cap-Chat et Verte, aucune autre cartographie HGM ne s'est faite sans la complémentarité des approches HHS et historique. L'application conjointe des trois approches reste nécessaire pour l'obtention d'une cartographie robuste des zones inondables et surtout lorsque l'approche HGM est plus ou moins exploitable. Par exemple, les cartographies HGM des rivières au Renard, Bonaventure, et de la Fourche ont été possibles grâce aux informations apportées par l'approche historique, que ce soit par le recensement des altitudes maximales des laisses de crue et des cicatrices glacielles enregistrées dans le paysage ou par l'intermédiaire des limites documentées d'inondations d'importance exceptionnelle telle que l'onde de crue de Rivière-au-Renard et la tempête post-tropicale Irène. Aussi, à plusieurs reprises, la modélisation hydraulique aura été utilisée pour valider et arrimer la cartographie HGM avec le cadre normatif de la PPRLPI.

Au fil du temps, l'approche HGM a fini par faire ses preuves et progressivement s'étendre au-delà du secteur académique. La multiplication de son application lui fit une véritable notoriété auprès des institutions gouvernementales qui finirent par l'employer à leur tour. Spontanément et de manière à répondre aux exigences de la Loi sur l'aménagement et l'urbanisme (Chap. A-19.1, c1, art 5(4)) pour ce qui a trait à la cartographie des zones inondables, certaines MRC (ex. : MRC de La Mitis, de Bonaventure et du Haut-Saint-François) se sont tournées vers des démarches cartographiques alternatives à moindre coût tel que le propose l'approche HGM.

Pour résumer, c'est bel et bien la poursuite du développement de l'approche HGM par son application à un plus large éventail de plaines alluviales qui permettra éventuellement d'atteindre son approbation législative et son intégration normative aux côtés des approches conventionnelles. C'est pourquoi dans le but de répondre à cette perspective, le laboratoire de géomorphologie et dynamique fluviale (LGDF) poursuit le développement de l'approche HGM à travers différents projets qui incluent les rivières Neigette, Mitis, du Nord, Coaticook et des Escoumins (Figure 26). Enfin, plus précisément et en réflexion à cet article, le LGDF, appuyé financièrement par le MSP, mène un projet qui a notamment pour objectif de connaître la diversité des plaines alluviales du Québec de manière à vérifier la représentativité des rivières jusqu'à présent échantillonnées et définir un ou plusieurs paramètres ainsi que des seuils de référence qui serviront à cibler la démarche cartographique et le mode de gestion le plus adéquat pour chaque environnement fluvial cartographié à l'avenir.

CHAPITRE 3

CARTOGRAPHIE HGM DE LA PLAINE ALLUVIALE DE LA RIVIERE MITIS

3.1 INTRODUCTION

Ce chapitre traite du développement et de l'application de l'approche HGM pour la cartographie des zones inondables de la plaine alluviale de la rivière Mitis. Tel que vu précédemment, la cartographie HGM n'est pas une méthodologie clef en main s'appliquant à tous les types de milieu, ce qui explique les développements méthodologiques au fur et à mesure de l'acquisition des connaissances à travers les différentes études de cas répertoriées au Québec (Besnard et al., à soumettre). C'est pourquoi, la méthodologie proposée pour la cartographie de la plaine alluviale de la rivière Mitis est teintée et ponctuée de réflexions et de résultats cherchant à évaluer la pertinence d'une méthode plutôt qu'une autre et à orienter vers la démarche cartographique à privilégier. De plus, il a été montré que la segmentation morphogénétique du tronçon à l'étude révèle une hétérogénéité longitudinale (cf. section 1.3.5), ce qui a suggéré l'application d'une démarche cartographique différente entre l'amont et l'aval par une adaptation de l'approche HGM aux conditions du milieu.

Bien que l'approche HGM soit souvent définie comme une approche reposant sur les fondements de la géomorphologie fluviale, elle est aussi souvent employée de manière intégrée (cf. section 2.6). Autrement dit, elle peut être composée de méthodes complémentaires imbriquées les unes aux autres pour répondre le plus adéquatement et le plus exhaustivement à la cartographie des zones inondables. Par conséquent, dans la présente étude, l'approche HGM combine les méthodes historique et géomorphologique, voire même la méthode pédologique dans le cas du secteur amont. Certes avec des moyens plus conséquents (temps/argent), l'intégration de la méthode hydraulique aurait également

pu faire partie de l'approche HGM. Les méthodes historique et pédologique servent à valider, voir à valoriser les résultats cartographiques de la méthode géomorphologique. Au même titre que la méthode HHS, les méthodes historique et pédologique complètent la méthode géomorphologique lorsque les indicateurs de crue (nombre insuffisant) et l'interprétation des formes ne suffisent pas à délimiter une zone inondable. Dans son analyse critique de l'incorporation de l'expertise hydrogéomorphologique dans la doctrine française de prévention des risques d'inondation, Goutx (2014) souligne également que les méthodes ne sont plus hermétiques entre elles et qu'il n'est désormais plus improbable de retrouver l'hydrogéomorphologie à travers des approches centrées sur la modélisation hydraulique.

Dans cette perspective, pour souligner la volonté de se conformer à l'unicité du milieu et de manière à positionner la méthodologie en fonction de celle-ci, il convient, au début de ce chapitre, de faire une revue des principaux indicateurs qu'il est possible d'exploiter dans le but d'évaluer les méthodes qui peuvent être combinées et intégrées dans l'approche HGM. Une définition de la plaine alluviale et de ses principaux attributs est également donnée, car elle est la base et l'objet central de toutes cartographies des zones inondables. La plaine alluviale se décline sous différentes formes génétiques qui peuvent se retrouver le long d'un même cours d'eau. C'est pourquoi il est possible d'aborder la démarche cartographique de multiples façons et à partir de divers indices de crue. Ici, l'accent est mis sur les indices d'inondabilité et de non-inondabilité qui permettent de cartographier les limites des zones inondables HGM.

Après avoir défini ces concepts, la méthodologie qui a guidé la cartographie HGM de la plaine alluviale de la rivière Mitis est détaillée. La méthodologie a été pensée de manière à anticiper l'insertion de la cartographie HGM au schéma d'aménagement de la MRC de La Mitis. C'est donc pour ces raisons que le paramètre qualifiant la fréquence de crue des zones inondables se retrouve au centre du processus cartographique. Les résultats exposés sont en partie le reflet des décisions qui ont orienté la démarche cartographique. Aussi, les cartographies HGM produites sont comparées avec les cartographies exécutées à l'aide des

méthodes HHS et dite du « Pinceau large » qui sont actuellement en vigueur sur certaines portions du territoire de la MRC. Il est important de retenir que la cartographie des zones inondables appliquée ici est unique à l'environnement exprimé par la plaine alluviale de la rivière Mitis. Enfin, ce chapitre se termine par une discussion qui apporte des éléments réponses aux incertitudes observées ainsi que quelques recommandations pour la suite du développement cartographique d'un point de vue de la gestion de l'aménagement.

3.2 CONCEPTS - OBJET D'ETUDE ET INDICATEURS

3.2.1 La plaine alluviale

L'approche HGM a pour objet d'étude la plaine alluviale. La plaine alluviale est constituée de formes positives ou d'accumulation (composées d'alluvions) et de formes négatives ou d'érosion (ex. : paléo-chenaux) dont la formation repose sur la dynamique des cours d'eau contrôlée par les fluctuations des apports en eau et en sédiments de l'amont, mais aussi par les ajustements des niveaux de base en aval. En France, le concept de *plaine alluviale fonctionnelle* (PAF) désigne la partie de la plaine alluviale qui est actuellement sous l'emprise des aléas du cours d'eau pour faire la distinction avec celle qui ne l'est plus (Ballais et al., 2011b). L'extérieur de la PAF est donc désigné sous le nom de plaine alluviale non fonctionnelle (PANF). La combinaison de la PAF et de la PANF compose la plaine alluviale proprement dite (Figure 27). Au Québec, la terminologie employée par le cadre législatif de la PPRLPI utilise le terme « plaine inondable » pour désigner la PAF (MDDEFP, 2014). En revanche, il faut nuancer l'emploi de ce terme, car il dérive des sciences hydrauliques qui l'associent uniquement aux crues de récurrence inférieure à 100 ans. D'autre part, la PANF est souvent associée à tort aux paléo-formes d'origines alluviales, car leur formation n'est plus conditionnée par les processus fluviaux actuels. Pourtant, bien qu'elles soient qualifiées d'inactives d'un point de vue géomorphologique, certaines d'entre elles continuent d'être inondées par les crues actuelles. Celles-ci font alors

partie intégrante de la PAF. Par exemple, les paléo-chenaux qui correspondent à d'anciens tracés déconnectés de l'écoulement principal (ex. : méandres abandonnés, lits à tresses...) peuvent continuer à se remplir par exfiltration des eaux de la nappe ou par débordement du lit mineur. C'est pourquoi on ne devrait pas les associer à une position spécifique dans la plaine alluviale. La plaine alluviale est généralement délimitée par des versants plus ou moins abrupts communément appelés « encaissant » (Figure 27). L'encaissant peut être fait de matériaux lithiques (roche en place) ou meubles tels que des dépôts glaciaires, des dépôts marins et des colluvions (Garry et al., 2002). L'encaissant désigne donc tout ce qui n'est pas constitué d'alluvions et qui encaisse la plaine alluviale.

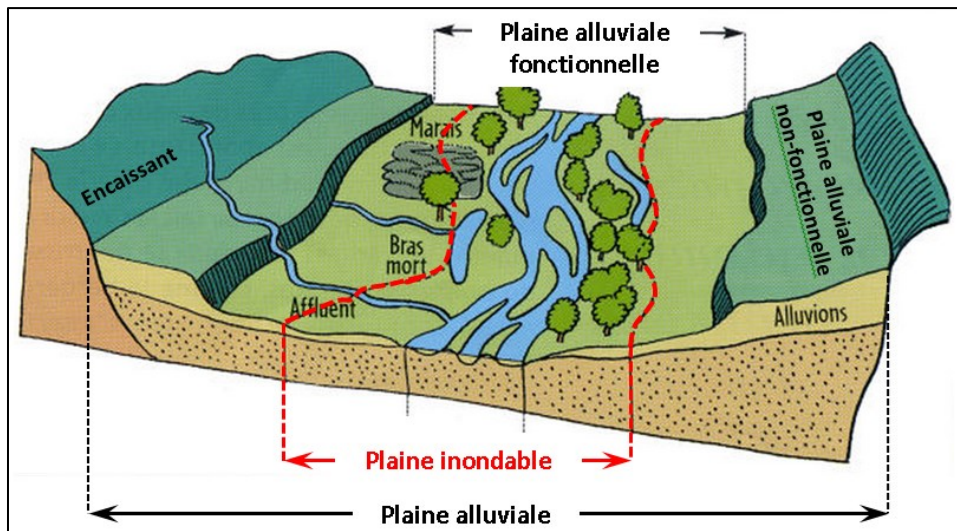


Figure 27 - Schéma conceptuel intégrant les limites de la plaine alluviale et de la plaine inondable. Adapté de : Freinet, 2013.

3.2.2 Les indices de crue

Les plaines alluviales sont des corridors fluviaux qui peuvent s'étendre sur plusieurs dizaines voire plusieurs milliers de kilomètres et donc traverser divers environnements qui induisent au continuum fluvial une certaine hétérogénéité longitudinale. Cette hétérogénéité

se retrouve également dans la manifestation et la diversité des indices de crue. Les indices de crue sont générés par le dynamisme d'écoulements actuels ou passés et se succèdent de manière plus ou moins continue dans l'espace là où l'environnement fluvial leur permet de s'exprimer. La composition et l'agencement des indices de crue caractérisent donc l'unicité d'un cours d'eau ou d'un tronçon de cours d'eau. De ce fait, pour cartographier les zones inondables d'une plaine alluviale il convient mieux d'employer une démarche cartographique flexible telle qu'une approche combinant plusieurs méthodes. La démarche permet ainsi de s'adapter à toute la variabilité physique de l'espace à cartographier sans omettre le moindre indicateur et sans compromettre la fiabilité du tracé des zones inondables. C'est pourquoi dans le cadre de ce projet la démarche cartographique est segmentée selon la combinaison des indices de crue retrouvés localement. En somme, les indices de crue sont les unités fondamentales indispensables de la cartographie des zones inondables. De nombreux types d'indices de crue sont recensés à travers la littérature scientifique. Le Tableau 9 propose une classification en sept catégories des principaux types d'indices de crue employés en cartographie des zones inondables.

Tableau 9 – Principaux indices de crue utilisés en hydrogéomorphologie.

DÉLIMITATION DE LA PLAINE ALLUVIALE ET IDENTIFICATION PARTIELLE DES SURFACES FONCTIONNELLES			
Catégories d'indice et principaux outils	Types d'indice	Types d'inondation [†]	Méthodes et précisions
Morphologique (dépression et relief) Imagerie LiDAR, photos aériennes ou ortho-photos (récentes et anciennes), bases de données (récentes) du SIEF ¹⁸ , cartes des milieux humides ¹⁹ et guide des écosystèmes riverains du MDDEP ²⁰ .	<i>Formes d'accumulation</i> : dépôts de débordement, levées alluviales, lobes de débordement, jets de rive et reliefs en crêtes et sillons.	Débordement à l'eau claire	Analyse cartographique (2D et 3D), photo-interprétation, LiDAR-interprétation et collecte de données sur le terrain. Sont dites stables, les formes qui ont des longues périodes d'inactivité hydrogéomorphologique. Celles-ci se situent à la jonction de l'encaissant et du dernier niveau fonctionnel (Ballais et al., 2011a).
	<i>Formes d'érosion</i> : chenaux de débordement, chenaux secondaires, talus d'érosion, zones érodées par les courants de recirculation et reliefs d'érosion surfacique (<i>stripping</i>).	Débordement à l'eau claire	
	<i>Formes stables</i> : basses terrasses.	Débordement à l'eau claire	
	<i>Formes d'exfiltration</i> : altitude $\leq Q_{pb}$, paléo-chenaux (méandres abandonnés) et milieux humides riverains (marais, marécages et tourbières).	Par exfiltration	
	<i>Formes d'avulsion</i> : recoupements de méandre (par tangence et par déversement) et cônes alluviaux.	Par embâcles de glace et de bois et par torrentialité	
<i>Formes encaissantes</i> : hautes terrasses et versants.	Non inondable		

¹⁸ Les données numériques du Système d'Information Écoforestière (MRNF) peuvent apporter des informations utiles à l'identification des zones humides riveraines.

¹⁹ Cartographie produite par Canard Illimité (pour certaines régions).

²⁰ Guide d'analyse des projets d'intervention dans les écosystèmes aquatiques, humides et riverains assujettis à l'article 22 de la Loi sur la qualité de l'environnement (MDDEP, 2006).

IDENTIFICATION DES SURFACES FONCTIONNELLES ET DÉLIMITATION PARTIELLE DE LA PAF			
Catégories d'indice et principaux outils	Types d'indice	Types d'inondation [†]	Méthodes et précisions
Sédimentologique Bases de données du SIEF ²¹ , cartes des dépôts de surface et cartes géologiques ²² .	Dépôts de surface (texture et origine), granulométrie (hétérométrique ou triée) et agencement particulaire (pavage, imbrication...).	Débordement à l'eau claire et par embâcles de glace	Analyse cartographique et collecte de données sur le terrain.
Pédologique Charte Munsell et cartes pédologiques de l'IRDA ²³ .	Texture, origine et couleur des sols.	Débordement à l'eau claire et par exfiltration	Analyse cartographique et collecte de données sur le terrain (pédons). L'indice de coloration des sols Buntley-Westin (B-W) permet de mesurer le degré d'inondabilité d'un sol. Lorsque l'indice B-W est inférieur à dix, la surface est fonctionnelle ou presque (Demers et al., 2014).
Botanique Bases de données (récentes) du SIEF ²⁴ , photos aériennes (récentes), images satellites (récentes) et méthode botanique experte du MDDEP ²⁵ .	Strates ou stades de développement (herbacée, arbustive et arborescente) et espèces (hygrophiles et hygrophobes).	Débordement à l'eau claire et par exfiltration	Analyse spectrale, analyse cartographique, photo-interprétation et collecte de données sur le terrain. La composition du couvert végétal renseigne sur le caractère inondable d'une surface et aide à identifier les zones humides.

²¹ Les bases de données du SIEF contiennent des informations sur les dépôts de surface.

²² Compilation de la géologie du Quaternaire.

²³ Institut de Recherche et de Développement en Agroenvironnement.

²⁴ Les bases de données du SIEF contiennent des informations sur le couvert végétal.

²⁵ La méthode botanique experte est tirée d'une *Note explicative sur la ligne naturelle des hautes eaux* de la PPRLPI (MDDEP, 2008). Elle contient les listes des plantes obligées (OBL) et des plantes réputées facultatives (FACH) des milieux humides pour le Québec méridional.

PRÉCISION DES LIMITES DE LA PAF			
Catégories d'indice et principaux outils	Types d'indice	Types d'inondation [†]	Méthodes et précisions
Cryogénique D-GPS ou GPS avec règle graduée.	Cicatrices glacielles*, bechevniks d'érosion, bechevniks d'accumulation et berges étagées.	Par embâcles de glace	Collecte de données sur le terrain. Le sommet de la cicatrice glacielle indique la hauteur d'eau atteinte pour un évènement donné.
Détritique D-GPS ou GPS avec règle graduée.	Laissez de crue*.	Débordement à l'eau claire et par embâcles de glace (sans bloc de glace)	Collecte de données sur le terrain. Seules les laisses de crue perchées sur les arbres dont le DHP est supérieur ou égal à 10 cm sont relevées. Elles indiquent une hauteur d'eau précise.
Historique D-GPS ou GPS avec règle graduée, photos aériennes et obliques (anciennes), vidéos, documents archivés (médias, municipalité...) et enquêtes de terrain.	Hauteurs d'eau géolocalisées ou géolocalisables* issues ou non de la mémoire collective (témoignages verbaux).	Tous types	Photo-interprétation, recherche documentaire et collecte de données sur le terrain. Les cicatrices glacielles et les laisses de crue deviennent des indices historiques lorsqu'elles peuvent être reliées à leur année de formation. Ces informations ont l'avantage de pouvoir être reliées à des dates et des conditions hydroclimatiques particulières.

[†] La colonne « Type d'inondation » indique le ou les type(s) d'inondation qui peuvent générer ces indices de crue.

*Cet indice de crue est un marqueur d'inondation, car il indique le niveau atteint par une crue donnée.

Idéalement, les indices de crue morphologiques sont répertoriés lors de l'analyse des images LiDAR en laboratoire. Les autres catégories d'indice de crue sont principalement obtenues sur le terrain, de même que les indices morphologiques lorsqu'aucun LiDAR n'est disponible. En effectuant une segmentation morphogénétique, il est possible d'anticiper la diversité des indices de crue morphologiques qui sera retrouvée à l'intérieur de chaque segment. En effet, les facteurs géomorphologiques qui caractérisent chacun des types de plaine alluviale (voir tableau 1 dans Nanson et Croke, 1992) correspondent aux indices de crue morphologiques proposés dans la classification du précédent tableau (Tableau 9).

L'existence d'un indice de crue dépend du contexte local. C'est pourquoi la démarche cartographique des zones inondables ne contient pas systématiquement l'ensemble des méthodes d'échantillonnage des différents indices de crue. Habituellement, c'est la disponibilité (quantité) et l'accessibilité (qualité) d'un indice de crue qui permet de dire si oui ou non il est pertinent de l'intégrer à la démarche cartographique.

Pour obtenir une cartographie précise des zones inondables, les indices de crue morphologiques doivent être utilisés en combinaison avec d'autres indices de crue. En effet, bien qu'ils permettent dans la majorité des cas de délimiter la plaine alluviale, les indices morphologiques ne permettent pas toujours de discriminer avec certitude la PAF de la PANF. Les indices sédimentologiques, pédologiques et botaniques peuvent, en complémentarité, valider le caractère fonctionnel d'une forme alluviale. D'autre part, l'usage indépendant des indices cryogéniques, détritiques et historiques apporte quant à eux une information irrévocable et suffisante qui permet de pointer sans ambiguïté les zones définitivement inondables ou inondées. En plus de pouvoir indiquer les hauteurs d'eau réellement atteintes par les inondations dans le paysage, ceux-ci fournissent également des renseignements sur la nature même des événements qui les ont engendrés (ex. : type d'inondation, conditions météorologiques...).

Contrairement aux indices de crue morphologiques qui aident le plus souvent à délimiter spatialement la plaine alluviale, les indices de crue sédimentologiques, pédologiques, botaniques, cryogéniques, détritiques et historiques sont des observations

ponctuelles qui permettent de caractériser le degré d'inondabilité de la plaine alluviale et de discerner la PAF de la PANF. Certains indices de crue véhiculent de l'information évidente sur le degré d'inondabilité (haut niveau de confiance), alors que d'autres ne le font pas explicitement (faible niveau de confiance). Par exemple, lorsque pris indépendamment, les indicateurs de crue suivants ont un faible niveau de confiance:

- la proximité altitudinale d'un niveau du plancher alluvial par rapport au chenal qui est basée sur l'interprétation subjective de l'observateur;
- les témoignages oraux recueillis auprès des riverains dont le niveau de fiabilité varie d'un interlocuteur à l'autre;
- et la présence de végétation hygrophile qui même si elle est abordée via *la méthode botanique experte* du MDDEP (2008) ne renseigne pas directement sur le caractère fluvial à proprement parlé d'une surface.

Toutefois, lorsque ces indices de crue sont combinés ensemble et/ou avec d'autres indices de crue, le niveau de confiance quant au degré d'inondabilité augmente considérablement. À l'opposé, des indices de crue historique telle qu'une inondation immortalisée sur des images satellites informent avec un haut niveau de confiance sur le degré d'inondabilité d'une surface. D'autres indices de crue comme les laisses de crue et les cicatrices glacielles ont un haut niveau de confiance, car elles apportent des informations sur la hauteur atteinte par les inondations. Enfin, la pédogénèse a un niveau de confiance variable, car il dépend du stade de développement du sol (voir section 3.3.4 pour de plus amples précisions à ce sujet).

Les travaux de Saint-Laurent et al. (2014) et Saint-Laurent et Lavoie (2009) révèlent également qu'il est possible d'aborder l'inondabilité des surfaces en analysant les propriétés physico-chimiques des sols. Les taux de carbone organique et de nitrogène total seraient significativement moins élevés dans la zone inondable (0-100 ans) que dans la zone non inondable. Aussi, l'acidité des sols est plus élevée dans la zone non inondable que dans la zone inondable (Saint-Laurent et al., 2014). Dans la zone inondable, l'horizonation du sol est homogène, la variabilité texturale faible et l'altération du sol plus faible (Saint-

Laurent et Lavoie, 2009). Pour évaluer le développement des sols alluviaux, la concentration des oxydes de fer peut être mesurée et la présence et l'épaisseur des horizons alluviaux vérifiées (Saint-Laurent et Lavoie, 2009). Enfin, la présence de sols cumuliques combinée à la radiodatation peut indiquer la fréquence d'inondabilité d'une surface ou la vitesse de construction verticale d'une plaine alluviale (French et al., 2009; Levish, 2002).

D'autres études recensées par Ballesteros-Cánovas et al. (2015) utilisent la dendrogéomorphologie et la dendrochronologie pour innover dans la recherche sur les inondations. La recherche en paléohydrologie utilise de plus en plus ces méthodes pour documenter l'occurrence des inondations passées et mieux comprendre les mécanismes des crues dans le but de servir à la gestion des risques. Ce sont les anomalies retrouvées dans les cercles de croissance des arbres qui sont interprétées pour caractériser le régime hydrologique des cours d'eau. Toutefois, ce type de mesure reste relativement complexe, car ces « paleoflood evidence » ne se retrouvent pas dans tous les bassins versants et parce que leur analyse doit notamment se faire par inférence à partir d'observation sur le terrain de façon à pouvoir tirer des renseignements sur la dynamique des inondations (Ballesteros-Cánovas et al., 2015).

3.2.3 Les indices de non-inondabilité

La pédogénèse offre au cartographe des indices de non-inondabilité qui permettent de compléter la cartographie HGM. La pédogénèse conduit à deux grands types de sol dit « matures » ou « évolués »: les sols de type zonal²⁶ (brunisol, podzol et cryosol) et les sols de type intrazonal²⁷ (luvisol, gleysol et sol organique). Un troisième type de sol dit

²⁶ Sols qui reflètent à petite échelle les conditions climatiques et biotiques régionales (Schaetzl and Anderson, 2005; Lafond et al., 1992).

²⁷ Sols qui sont influencés localement par les reliefs et les dépôts (Lafond et al., 1992).

azonal²⁸ (régosols) regroupe tous les sols « immatures » qui n'ont pas évolué vers les deux premiers types (Bockheim, 2005; Lafond et al., 1992).

Les sols alluviaux récents et plus précisément ceux qui sont soumis à une aggradation constante et rapide font partie des sols immatures (Lafond et al., 1992; Schaetzl and Anderson, 2005). En effet, leur développement pédogénétique est ralenti voir stoppé par l'apport sédimentaire des crues successives (Saint-Laurent et Lavoie, 2009; Saint-Laurent et al., 2012; Schaetzl and Anderson, 2005). La prémisse qui lie les inondations à un transport sédimentaire veut que l'on associe implicitement la présence d'un dépôt de débordement au caractère inondable de la surface sur laquelle il se trouve. Par contre, cette prémisse n'est pas systématiquement vérifiée, car certains dépôts de débordement peuvent être suffisamment anciens pour qu'une surface soit considérée comme non inondable. La datation au carbone 14 est un outil impartial qui permet justement de trancher sur la question de l'âge d'un dépôt (Levish, 2002). Également et logiquement, une surface sera considérée non inondable si aucun dépôt de débordement n'est retrouvé localement. Pourtant, il est possible d'imaginer que certains environnements fluviaux aient des intrants sédimentaires trop faibles et/ou des inondations qui ne soient pas suffisamment compétentes pour générer des dépôts de débordement. Dans de telles circonstances, une surface peut être qualifiée à tort de non inondable. Bien heureusement, la présence de pédogénèse aide à contourner ce type d'incongruité. En effet, pour évoluer, un sol a besoin d'une longue phase de stabilité (Courchesne et Hendershot, 1997; Levish, 2002), ce qui permet a priori de distinguer les surfaces inondables de celles qui ne le sont pas. Or, il a été prouvé que le processus de pédogénèse peut être enclenché à l'intérieur de surfaces inondables lorsque l'aggradation est lente (Schaetzl and Anderson, 2005) ou lorsque le sol n'a pas été exposé à un écoulement suffisamment puissant pour l'éroder (Levish, 2002). En somme, il faut donc être attentif à l'environnement fluvial dans lequel l'analyse d'un sol est faite, car se baser uniquement sur la présence de pédogénèse ne permet pas de trancher explicitement sur le degré d'inondabilité d'une surface. Sans d'autres indices permettant de

²⁸ Sol sans horizon génétique distinct (Schaetzl and Anderson, 2005).

statuer sur le caractère inondable d'une surface, il convient alors de dire qu'en présence de pédogénèse l'aléa d'inondation (récurrence et/ou magnitude) est probablement faible.

Hormis la région du sud-ouest du Québec, le climat froid et le taux de précipitation élevé (> évapotranspiration) favorisent le processus de podzolisation (Lafond et al., 1992). Les podzols se développent grâce à la présence d'une litière continuellement alimentée par la végétation en surplomb. La matière organique de la litière dégradée par la pédofaune libère des acides fulviques capables de dissoudre le fer et l'aluminium. C'est ce mécanisme chimique qui est responsable de la formation de l'horizon Ae. L'acidification du sol est donc un des critères essentiels à l'établissement d'un podzol (Courchesne et Hendershot, 1997; Lafond et al., 1992).

D'après les études recensées par Courchesne et Hendershot (1997), l'ensemble des propriétés qui caractérisent les podzols peut seulement apparaître après une période de stabilité de l'ordre d'une centaine à plusieurs milliers d'années dépendamment du contexte. D'un point de vue physique, les sols matures se distinguent des sols immatures notamment par leur différence de coloration et de stratification (Lafond et al., 1992). C'est pourquoi la couleur et la présence ou non de certains horizons constituent des indices pédogénétiques valables pour distinguer les sols inondés des sols non inondés. Par conséquent, les horizons oxydés et cendrés qui caractérisent les podzols sont indicateurs d'une longue période de stabilité et, par le fait même, représentent des indices clés de non inondabilité ou du moins des indices d'aléa d'inondation probablement faible (Levish, 2002). Généralement, un podzol dont le stade de développement est à terme comprend un horizon éluvial²⁹ brun organo-minéral riche en matière organique (Ah), un horizon éluvial gris cendré appauvri en argiles et en hydroxydes (Ae) et un horizon illuvial³⁰ pouvant aller du brun noir/rougeâtre à jaunâtre riche en hydroxydes de fer et d'aluminium (B). L'ensemble de ces unités étant

²⁹ Horizon du sol qui perd de la matière soluble ou solide par lixiviation verticale ou oblique (Schaetzl and Anderson, 2005).

³⁰ Horizon du sol qui accumule entre autres la matière de l'horizon éluvial par apport vertical, oblique ou latéral (Schaetzl and Anderson, 2005).

bien sûr surplombé d'une litière de 1 à 5 cm (O) (Figure 28) (Courchesne et Hendershot, 1997; Lafond et al., 1992; Saint-Laurent et al., 2014).

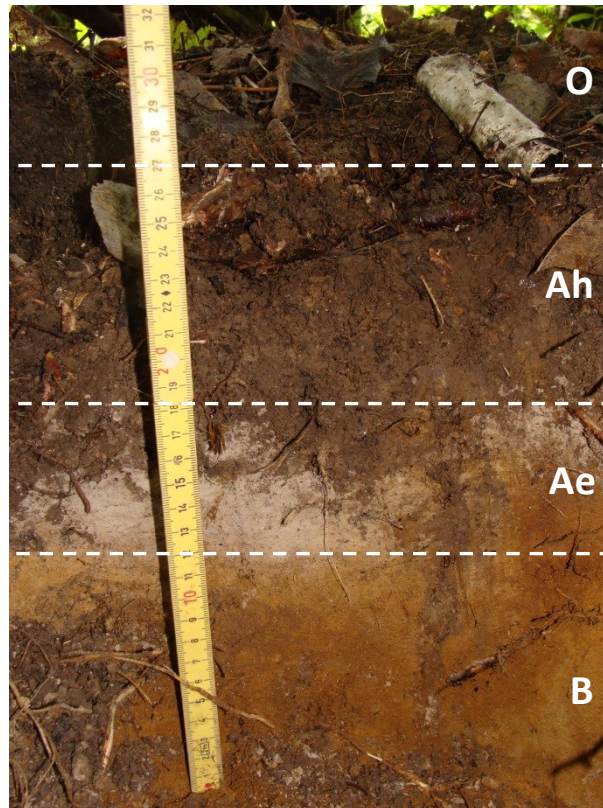


Figure 28 – Profil stratigraphique d'un sol mature typique de la plaine alluviale de la rivière Mitis. O (ou LFH) = horizon organique ou litière forestière.

Dans leur étude de 2009, Saint-Laurent et Lavoie évoquent l'homogénéité ou la faible horization des faciès de sols situés en zone inondable (0-100 ans) des rivières du centre-sud du Québec. Cette homogénéité se traduit par une oxydation limitée ou l'absence des horizons A et B (Saint-Laurent et Lavoie, 2009). L'absence de l'horizon Ah s'explique par le faible apport en biomasse de la litière qui peine à se développer surtout dans la zone de récurrence 0-20 ans. Dans les zones inondées (0-100 ans), les sols ont tendance à être lavés de leur litière (Gervais, 2013; Saint-Laurent et al., 2014). Les litières moins épaisses produisent moins de carbones organiques essentiels à la pédogénèse. C'est pourquoi plus

l'apport en carbone organique est réduit plus les processus pédogénétiques sont altérés (Saint-Laurent et al., 2014). L'horizon Ah y est donc partiellement développé (Saint-Laurent et Lavoie, 2009; Saint-Laurent et al., 2014). Au-delà de la zone de récurrence 0-100 ans, ce sont des sols matures stratifiés de type podzol ou brunisol qui peuvent être retrouvés (Saint-Laurent et al., 2014).

Si par l'intermédiaire d'un simple coup d'œil il est facile de reconnaître un podzol mature d'un podzol immature, il n'est pas toujours évident de quantifier le niveau de développement d'un sol. Bien heureusement, plusieurs variables permettent de déterminer celui-ci. La couleur qui permet de quantifier le degré d'oxydation du sol en est une. Plusieurs indices de coloration tels les indices McCracken, Buntley-Westin, Hurst, Harden et de podzolisation permettent d'évaluer la couleur du sol (Tremblay et al., 2002).

3.3 METHODOLOGIE

3.3.1 Rationnel méthodologique

Dans ce travail, deux considérations motivent l'imbrication des méthodes géomorphologique et historique. D'une part, le contexte anthropogéomorphologique de la rivière Mitis est inadéquat pour l'application optimale et intégrale de la méthode géomorphologique basée sur les modelés (Demers et al., 2014). Quatre raisons expliquent cela. La première raison est que le travail des terres agricoles rend extrêmement éphémères les traces laissées par les crues. Les laisses de crue et les formes d'érosion sont effacées d'une année à l'autre ce qui rend difficilement interprétable les caractéristiques hydrauliques de ces surfaces. La deuxième raison provient du fait que le régime hydrosédimentaire de la section aval est influencé par le barrage de la centrale Mitis-1, ce qui rend l'interprétation des formes fluviales pas toujours en adéquation avec la dynamique des inondations actuelles. La troisième raison est l'homogénéisation du régime

hydrologique de la rivière Mitis provoquée par la construction du barrage du lac Mitis en 1943 (Matteau et al., 2009) et l'augmentation de l'aire de drainage du bassin versant de la rivière Mitis engendrée par la dérivation d'une partie des eaux de la rivière Patapédia suite à la construction d'une digue en 1950 (Robitaille, 1999). Il n'est pas possible de savoir si ces ouvrages ont déjà eu ou si ceux-ci auront un quelconque impact sur la morphologie de certains secteurs de la plaine alluviale. Finalement, le plancher alluvial de la Mitis dans sa section couverte par le LiDAR est particulièrement argileux. L'argile augmente la cohésion sédimentaire du plancher alluvial, ce qui se traduit par une construction moins rapide de la plaine alluviale et un relief moins contrasté. Ainsi, la configuration de la plaine alluviale de la rivière Mitis est topographiquement plane, ce qui la rend également plus propice à une occupation agricole inhibitrice des microformes fluviales. En revanche, étant donné la complexité du contexte de la Mitis dans sa portion amont (granulométrie grossière, puissance spécifique élevée, plaine étroite...), il est possible que l'application de l'approche HGM par modelé ait été propice si les données LiDAR avaient été disponibles. L'approche HGM par modelé³¹ ne peut donc pas être optimisée et encore moins sur la portion boisée et non couverte par le LiDAR située en amont du village de Sainte-Angèle-de-Mérici. C'est pourquoi la cartographie de la Mitis a volontairement été recentrée sur les connaissances historiques du territoire. La **Erreur ! Référence non valide pour un signet.** reprend l'ensemble des facteurs précités qui ont orienté l'application de l'approche HGM à la plaine alluviale de la rivière Mitis ainsi que d'autres qui seront abordés ultérieurement.

³¹ Afin de mettre en évidence le fait que l'approche HGM par modelé n'est pas pu être appliquée dans le contexte de la Mitis et afin de la distinguer de l'approche HGM de la présente étude, le terme « modelé » sera substitué par le terme « unité HGM » pour évoquer les formes fluviales.

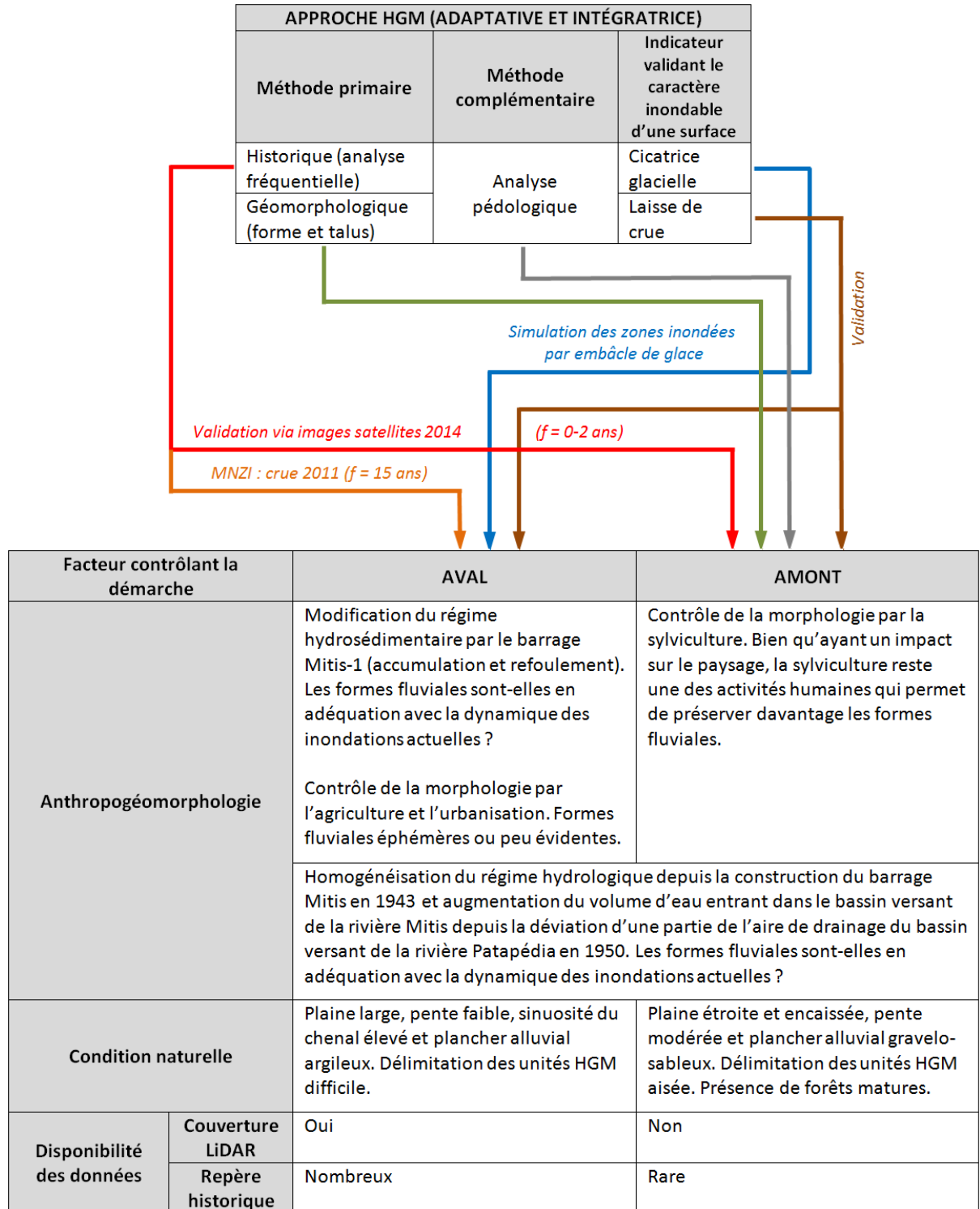


Figure 29 – Composantes de l'approche HGM et facteurs qui ont participé à la configuration amont/aval du rationnel méthodologique.

D'autre part, comme la législation des zones inondables du Québec est basée sur la fréquence des crues 0-20 ans et 20-100 ans, il était incontournable d'intégrer au moins une des deux méthodes d'analyse fréquentielle (hydraulique et/ou historique) pour que la cartographie des zones inondables de la Mitis puisse être utilisée par les gestionnaires du territoire. C'est donc en déterminant les niveaux d'eau de ces intervalles de récurrence qu'il devenait possible d'interpoler et d'extrapoler topographiquement des zones inondables en adéquation avec les normes en vigueur.

Ainsi, la variabilité longitudinale des données disponibles et le portrait anthropogéomorphologique du tronçon à l'étude ont incité à mettre en place deux stratégies cartographiques pour optimiser au maximum l'intégralité des données recueillies et adapter la cartographie au contexte local. Ces stratégies ou démarches cartographiques aboutissent sur deux cartographies distinctes, soit une cartographie aval et une cartographie amont. La cartographie aval se matérialise par une couche matricielle des hauteurs d'eau (MNZI) construite, entre autre, à partir des repères historiques de la crue de 2011. Celle-ci s'étend du barrage de la centrale Mitis-1 jusqu'au camping de Sainte-Angèle-de-Mérici (Figure 30) et couvre la quasi-totalité de la superficie du tronçon couvert par le LiDAR. Quant à la cartographie amont, celle-ci se matérialise par des surfaces délimitées à partir des unités HGM auxquelles des récurrences ont été attribuées. Elle s'étend du camping de Sainte-Angèle-de-Mérici jusqu'à la confluence des rivières Mitis et Mistigouèche. De plus, chacune de ces cartographies contient des unités HGM potentiellement utiles pour la gestion du territoire.

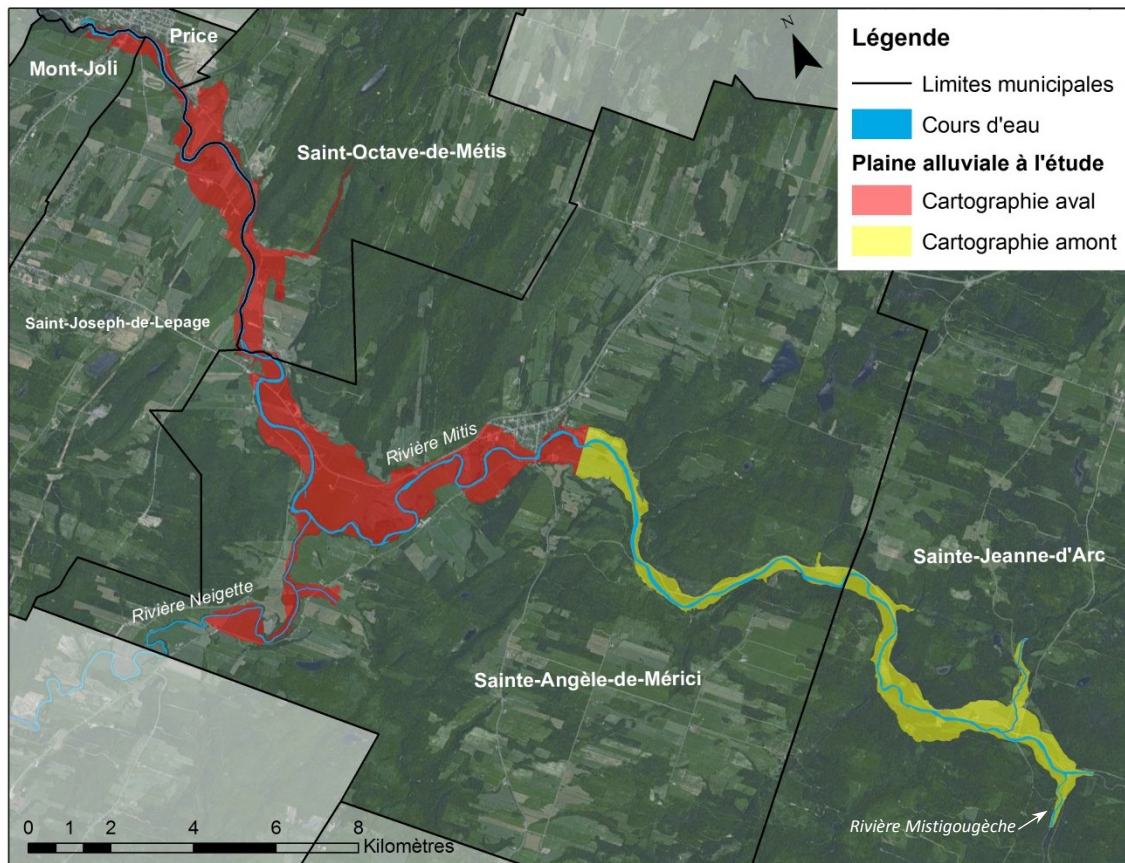


Figure 30 – Localisation des cartographies amont et aval.

3.3.2 Méthode géomorphologique

La méthode géomorphologique permet d’identifier des ensembles morphologiques homogènes ou unités HGM³² qui ont été façonnés par des processus hydrauliques distincts. Bien que la délimitation des modelés selon l’approche de la Matane n’ait pas été retenue comme méthode centrale dans l’approche HGM appliquée à la rivière Mitis (étant donné son inadéquation avec le contexte local), la prise en compte des unités HGM n’en est pas

³² Formes d’érosion, d’accumulation, d’exfiltration, d’avulsion, stables, encaissantes (voir colonne « Types d’indice » dans le Tableau 9 – Principaux indices de crue utilisés en hydrogéomorphologie., p. 81).

moins essentielle pour bien comprendre les caractéristiques de la plaine alluviale au premier abord. De plus, la méthode géomorphologique apporte une extension et une limite spatiale aux observations qualitatives ponctuelles dégagée par la méthode historique (documents d'archives et témoignages). Dans cette perspective, la complémentarité de ces méthodes devient clairement évidente.

Les photographies aériennes utilisées dans le cadre de l'interprétation des unités HGM est particulièrement intéressante, car elle permet une rétrospective sur l'empiètement anthropique progressif de la plaine alluviale (Figure 31) et donc de mieux comprendre certaines problématiques liées aux inondations. En visualisant les anciennes photographies aériennes, il est également possible de contourner l'obstruction des formes alluviales créée par les infrastructures urbaines et ainsi mieux interpréter le paysage (Figure 31). Aussi, la méthode géomorphologique à l'avantage de faire fi des remblais qui fragmentent et isolent des lambeaux de plaine des inondations, localisant ainsi les limites fonctionnelles originelle et naturelle de la plaine alluviale.

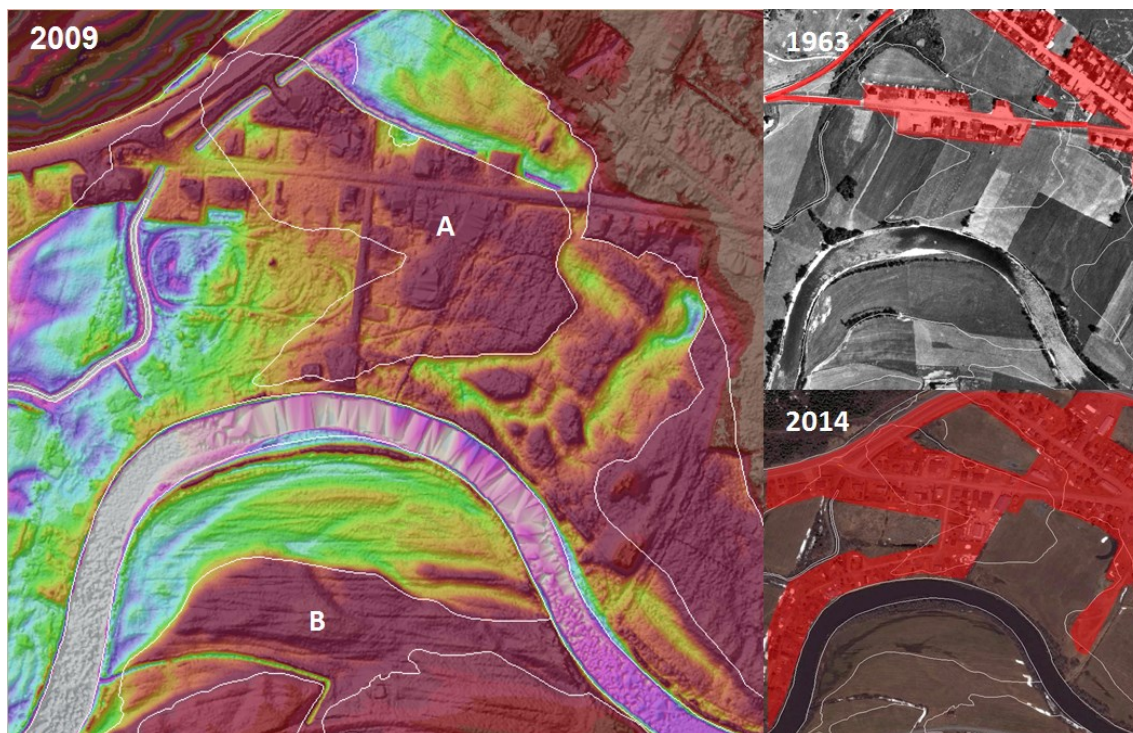


Figure 31 – Étalement urbain (polygones rouges) et alternatives pour contourner l’obstruction anthropique des unités HGM. 1) Extrapolation temporelle : la forme A, qui est beaucoup moins apparente sur les imageries satellite de 2014 et LiDAR de 2009, a pu être délimité à partir de la série photographique de 1963 antérieure aux installations anthropiques. 2) Extrapolation spatiale : à défaut de pouvoir recourir à cette première alternative, il reste la possibilité d’effectuer un tracé approximatif de la forme A en affichant l’altitude d’un MNT (exprimée ici par un dégradé de couleurs) avec une résolution spatiale suffisamment fine pour extrapoler les limites morphologiques d’une forme distincte (forme B) en rive opposée à l’aide de la topographie.

3.3.2.1 Acquisition des données

L’interprétation des unités HGM a été réalisée à partir des photographies aériennes des années 1963, 1973, et 1980 (Gouvernement du Québec), des orthophotographies de 2001 (Gouvernement du Québec), de la mosaïque d’images hautes résolutions de 2004 (MRC de La Mitis), des images satellites de 2014 (Google Earth) et des relevés LiDAR de la Mitis/Neigette de 2009 (MERN). Pour la section aval du tronçon à l’étude, la majorité de l’interprétation morphologique a pu se faire par LiDAR-interprétation en laboratoire. En revanche, pour ce qui est de la section amont non couverte par l’imagerie LiDAR, c’est le recoupement des informations extraites des autres imageries qui permet à l’aide de la stéréoscopie et d’une campagne de terrain de délimiter les unités HGM. D’ailleurs, la

campagne de terrain dans le cadre de la méthode géomorphologique fut une étape cruciale pour valider la photo-interprétation réalisée pour la section amont étant donné la difficulté d'apprécier les formes du relief engendrée par l'opacité de la couverture végétale.

3.3.2.2 Délimitation de la plaine alluviale

La délimitation de la plaine alluviale est la première étape de la cartographie géomorphologique. Elle permet de délimiter l'aire d'étude à investiguer. Appuyée des cartes de dépôts de surface (Chauvette, 1992) et de l'étude de Desmarais (1988) sur la géologie et la géomorphologie du quaternaire du secteur du lac Matapédia et de la rivière Mitis, une discrimination des dépôts alluviaux des autres dépôts a pu être faite. En combinant une matrice de pentes (Figure 32) à ces informations, les ruptures de pente des formes encaissantes (terrasses marines, dépôts fluvio-glaciaires incisés, versants lithologiques et de dépôts colluviaux...) ont pu être localisées et ainsi délimiter spatialement la plaine alluviale (PANF + PAF). Parfois, il n'est pas évident de tracer la plaine alluviale lorsque la pente de raccordement entre la dernière surface alluviale et le bas du versant est progressive. En effet, les glacis et les cônes alluviaux et colluviaux peuvent engendrer ce type de problème (Chave, 2002). L'interpolation topographique à l'aide des isolignes du LiDAR peut aider à contourner ce problème. Cependant, la réalité peut-être tout autre lorsque la modélisation ou un événement récent révèle que la crue chevauche le bas de l'encaissant (Chave, 2002). La submersion de surfaces anciennes ou à priori situées à l'extérieur de la plaine alluviale est aussi possible (Chave, 2002). Ce type de dépassement est surtout causé par des ouvrages qui créent un effet de barrage lors de l'inondation (Chave, 2002). Dans ces cas, il devient évident que pour tendre vers une cartographie juste des limites de la plaine alluviale, il faut aller au-delà de la simple interprétation géomorphologique en effectuant une analyse historique et/ou hydraulique. Enfin, il est important de mentionner que seules les limites des principales plaines affluentes de la rivière Mitis (rivières Neigette, Mistigouèche, Rouge et ruisseau Bernier) furent tracées.

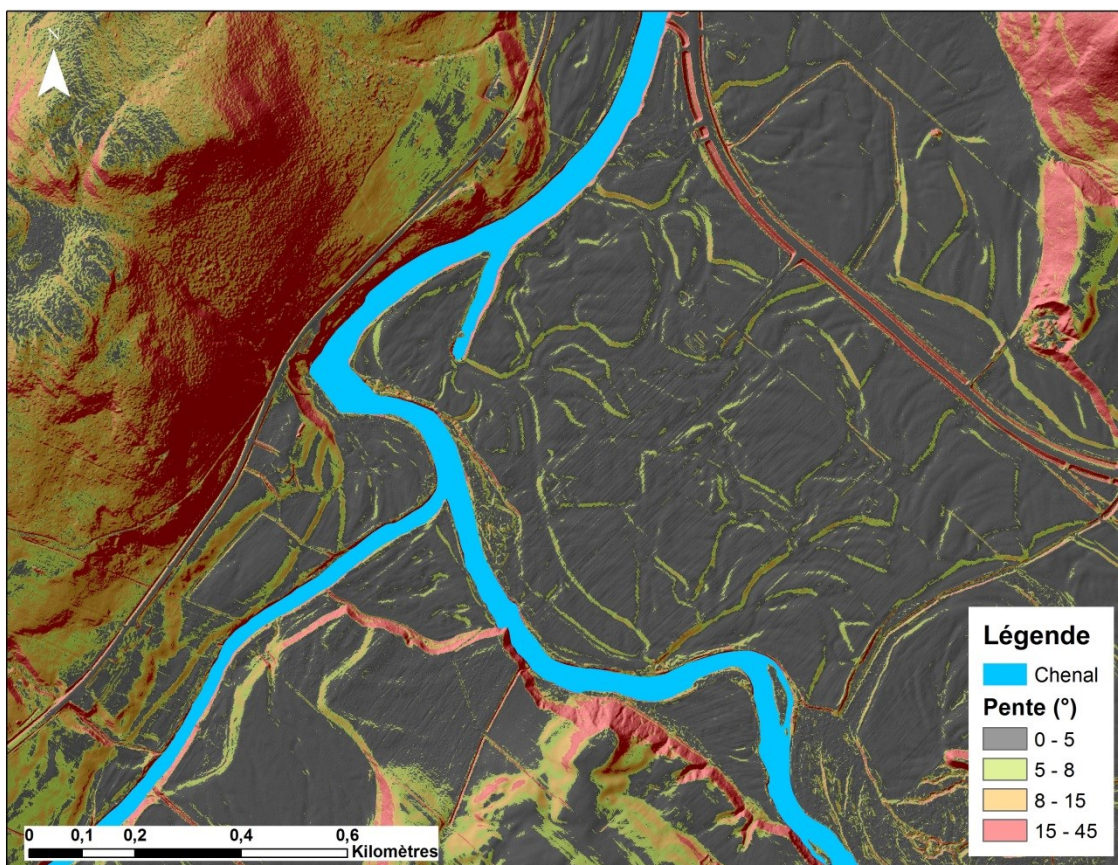


Figure 32 – Matrice des pentes.

3.3.2.3 Délimitation des unités HGM

La configuration plus étroite et encaissée de la plaine alluviale de la section amont (Figure 30) présente des unités HGM aux contours mieux définis et par le fait même plus facile à délimiter. La délimitation par photo-interprétation des ruptures de pente qui semblait appropriée pour cette section ne fut finalement pas des plus aisées en raison du couvert végétal, souvent dense et arborescent, qui avait tendance à dissimuler les reliefs de la plaine alluviale. Fort heureusement, la campagne de terrain permit de compléter la délimitation des unités HGM en localisant les ruptures de pente manquantes à l'aide d'un GPS. Dans la section aval, les talus furent tracés à l'aide du LiDAR. La plupart des unités HGM ont pu être définies sous des termes spécifiques dans la classification cartographique, car elles pouvaient être associées à des processus singuliers ou parce que des formes

alluviales spécifiques étaient reconnues à l'intérieur de leurs limites. Pour ce qui est des unités HGM orphelines de ces caractéristiques, celles-ci furent regroupées sous l'appellation « autre forme alluviale ».

Voici les unités HGM qui sont associées à une nomenclature cartographique spécifique :

Dépression humide ou surface d'exfiltration

Les unités HGM qualifiées de « dépression humide et surface d'exfiltration » furent en grande majorité délimitées par photo-interprétation des images satellites Google Earth prises au printemps 2014 au début de l'onde de crue (Figure 33). Ces images montrent des surfaces inondées plus ou moins connectées avec les débordements de la rivière. Celles-ci peuvent être déconnectées de la dynamique fluviale, soit alimentées par de petits tributaires, le réseau d'eau souterrain des versants ou par l'eau de fonte des neiges. Aussi, il n'est pas impossible d'émettre l'hypothèse que certaines de ces formes soient directement connectées au régime hydrologique de la rivière par la propagation d'une onde phréatique (Cloutier et al., 2014). Une étude plus approfondie serait nécessaire pour vérifier l'origine du battement du niveau d'eau à l'intérieur de ces unités HGM. En dehors de la période printanière, ces unités sont libres d'eau et pour la plupart localisées contre le versant. Leur forme longiligne fait penser à d'anciens chenaux comblés par la sédimentation. L'analyse pédologique a pu révéler qu'une nappe d'eau affleurait en surface dans les quarante premiers centimètres. L'entourbement du sol fut également un des indices qui permit de confirmer la présence d'eau dans le sol pendant une grande partie de l'année (cf. section 3.3.4). Les milieux humides périphériques ou déconnectés des échanges fluviaux en surface sont inclus dans cette unité HGM. Tout comme les milieux humides riverains, qui sont connectés au chenal, ceux-ci sont identifiés à l'aide de la liste des plantes obligées (OBL) des milieux humides pour le Québec méridional de la méthode botanique experte du MDDEP (2008).

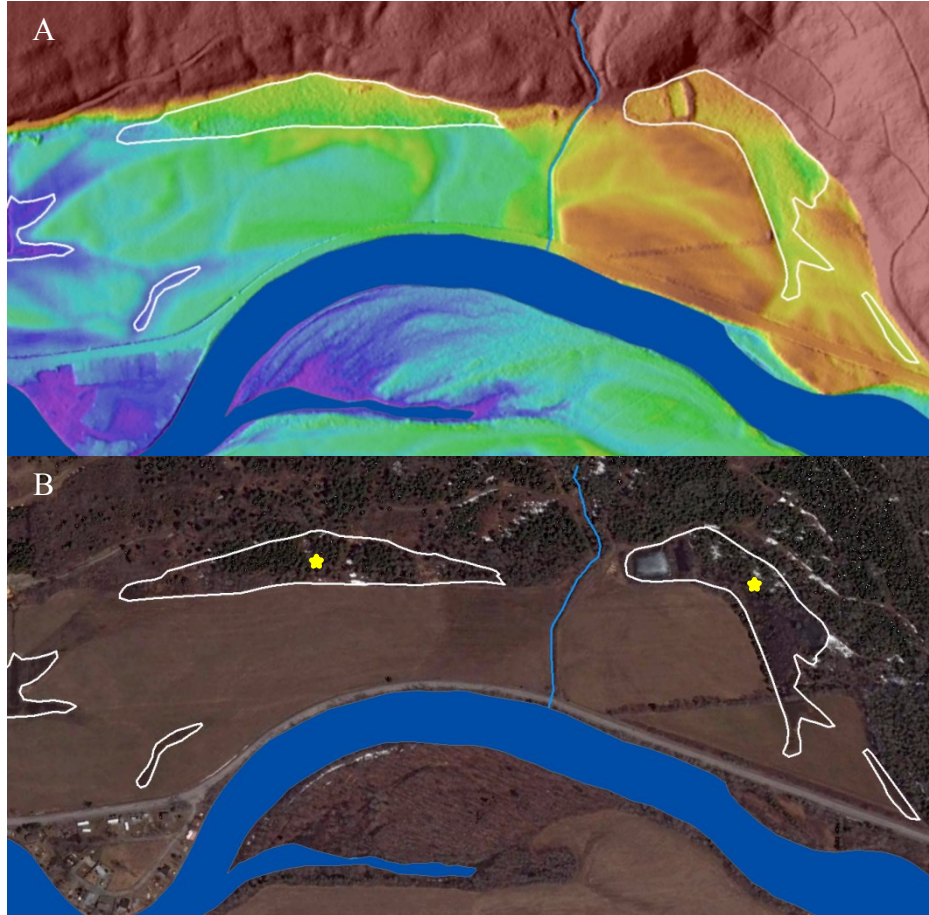


Figure 33 – Dépressions humides ou surfaces d'exfiltration situées en périphérie de la plaine alluviale de la rivière Mitis. Unités HGM délimitées à l'aide de la topographie du LiDAR (A) et des surfaces inondées sur les images satellites Google Earth du 05/05/2014 (B). Les étoiles correspondent à des points de validation pédologique où un entourbement a pu être constaté avec présence de la nappe en surface.

Formes fluviales périphériques

Les formes fluviales périphériques regroupent, hormis les dépressions humides ou surfaces d'exfiltration, l'ensemble des formes fluviales mises en place par des régimes hydrologiques tributaires de la plaine alluviale de la rivière Mitis. Deux formes fluviales périphériques ont été retrouvées sur le territoire à l'étude : les cônes alluviaux et les petites vallées affluentes.

Les principaux critères d'identification d'un cône alluvial sont d'une part, une forme conique ou en éventail lobé avec l'apex en position amont et la base arquée en position aval et d'une autre part, une pente de type légèrement exponentiel avec une pente forte en amont et une pente faible en aval (Figure 34) qui caractérise une perte de compétence de l'écoulement de l'amont vers l'aval et par le fait même un granoclassement amont-aval (Blair et McPherson, 1994; Salomon, 2007). Un cône alluvial est une unité HGM périphérique à une plaine alluviale dont le cours d'eau est d'ordre supérieur à celui qui l'alimente en sédiments. Il se situe habituellement à l'exutoire d'une zone d'érosion d'un bassin versant plus large ou à l'exutoire d'un bassin versant d'ordre faible et abrupt. C'est pourquoi une ravine incisée dans le versant se retrouve souvent à son apex (Salomon, 2007). Le cours d'eau qui débouche à l'apex du cône peut se ramifier en plusieurs chenaux et disséquer celui-ci (Salomon, 2007; Santangelo et al., 2012).

Les petites vallées affluentes sont des modèles réduits de plaines alluviales, mais dont le degré de la pente est beaucoup plus important en raison de leur localisation à même le versant (Figure 34). Celles-ci ne sont généralement pas difficiles à délimiter, car la puissance des cours d'eau qui les alimentent est comparable à celle de petits torrents de montagne compétents et capables d'inciser la roche en place.

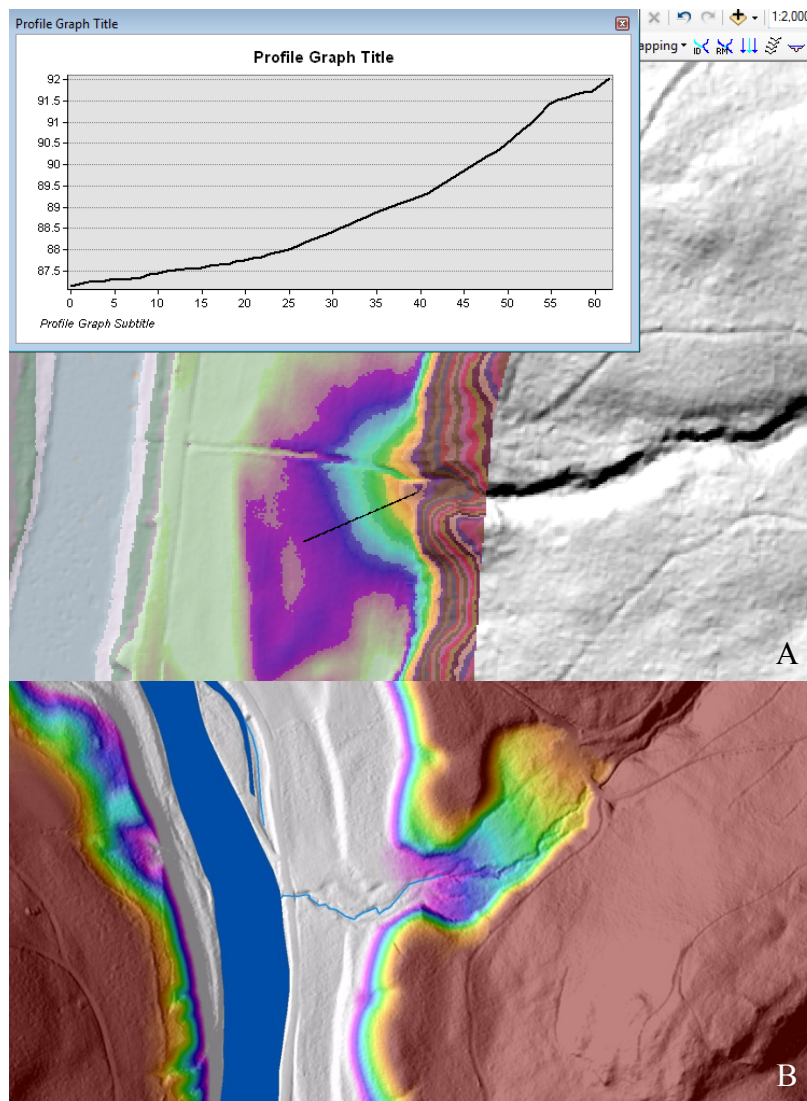


Figure 34 – Formes fluviales périphériques. (A) profil longitudinal en forme convexe et légèrement exponentielle d’un cône alluvial. (B) petite vallée affluente.

Sur le territoire à l’étude les cônes alluviaux et les petites vallées affluentes se retrouvent quelques fois connectés. Autrement dit, une petite vallée affluente peut déboucher sur la plaine alluviale de la rivière Mitis via un cône alluvial. Étant donné que ces unités HGM sont fusionnées et qu’il est difficile de distinguer une limite franche entre celles-ci, il a été décidé de les regrouper dans une même classe d’entités, soit dans les formes fluviales périphériques. La délimitation de ces formes fluviales périphériques est

relativement facile dans la section couverte par le LiDAR en affichant la grille d'élévation en couleurs discrètes. Par contre, ce ne fut pas le cas dans la section amont à cause de la forte densité végétale qui était un facteur limitant pour la photo-interprétation. De plus, leur recensement et leur délimitation ne constituaient pas une priorité lors de la campagne de terrain.

Autres unités HGM

- Le chenal plein bord fut tracé à partir du jeu de photographies aériennes le plus récent et de la couverture LiDAR lorsqu'elle était disponible;
- Les milieux humides riverains, les chenaux de débordement et les autres formes d'érosion (voir Tableau 9 pour l'identification de ces entités) composent une seule et même unité HGM en raison de leur inondabilité récurrente (plus de détails dans la section 3.4);
- Les surfaces stables sont déterminées à l'aide de la méthode pédologique (plus de détails dans la section 3.3.4);

Parfois, il est totalement impossible d'interpréter l'hydrogéomorphologie de la plaine alluviale en raison de la faible résolution spatiale des photographies aériennes ou de la non-disponibilité des photographies aériennes de l'époque où la plaine alluviale n'était pas encore modifiée par les activités humaines. C'est pourquoi dans les cas où le tracé n'avait pas d'autres choix que de passer à travers une surface obstruée ou remblayée, il a été décidé de tracer une ligne droite à travers celle-ci de manière à joindre de part et d'autre les extrémités des limites géomorphologiques périphériques connues (Figure 35).

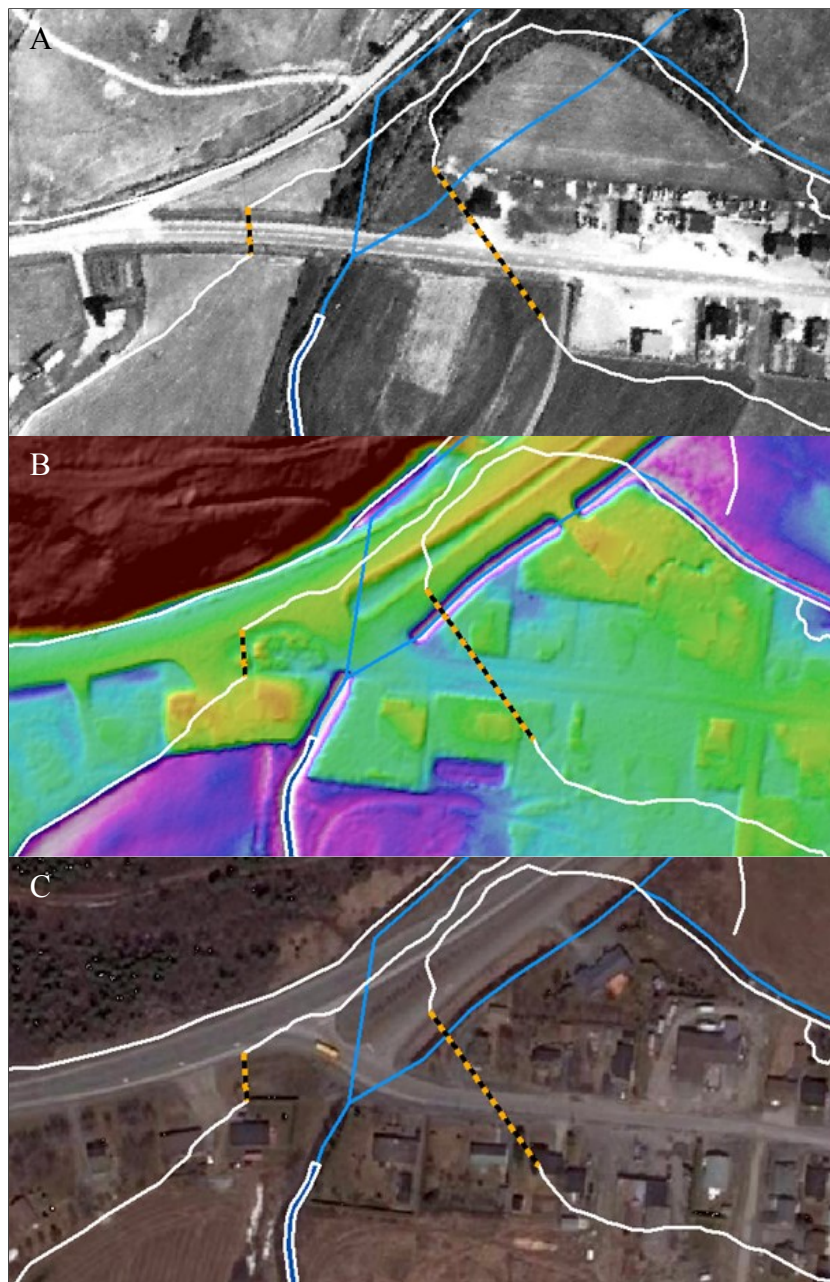


Figure 35 – Situation où l'interprétation géomorphologique n'est pas possible. (A) photographie aérienne de 1963 de faible résolution topographique avec infrastructures et activités humaines obstruant la plaine alluviale. (B) LiDAR de 2009 avec impossibilité d'interpréter la géomorphologie en raison de l'étalement urbain. Les lignes pointillées indiquent les lignes droites raccordant les limites géomorphologiques périphériques connues. (C) image satellite Google Earth de 2014.

3.3.3 Méthode historique

Dans certains cas, la cartographie HGM est difficilement exploitable d'un point de vue de l'aménagement du territoire si elle ne renvoie pas à des valeurs de fréquence de crue spécifique qui réfèrent aux normes de la PPRLPI. Employée seule, la géomorphologie permet de faire ressortir comment le paysage est modelé par les inondations, mais ne permet pas d'exprimer la composante fréquentielle de l'aléa de manière aussi spécifique que la méthode historique. En effet, grâce à l'analyse fréquentielle des modelés alluviaux de la rivière Matane, Demers et al. (2012) ont montré que les modelés d'érosion et d'exfiltration se superposaient jusqu'à 78 % avec la zone de récurrence 0-20 ans, alors que les modelés de sédimentation ne pouvaient être rattachés de façon significative à une classe de récurrence particulière. La méthode historique se révèle ainsi complémentaire à la méthode géomorphologique. En menant vers une cartographie des hauteurs d'eau ou des fréquences de crue, la méthode historique permet au gestionnaire de prendre des décisions normatives par rapport à l'aménagement du territoire. Aussi, elle apporte une dimension « législative » ou une valeur juridique, car elle permet d'adapter la cartographie au cadre normatif de la PPRLPI (subdivision de la plaine alluviale en zones de récurrence). Étant donné que les résultats cartographiques fréquentsiels et de niveaux d'eau sont obtenus à partir de données historiques, il a été décidé de regrouper leurs processus d'acquisition à l'intérieur d'une méthode dite « historique ».

Avant toute chose, la méthode historique permet d'obtenir des données ponctuelles localisables dans le temps. Ces repères historiques sont le plus souvent associés à un niveau d'eau ou cote de crue et sont utilisés pour confirmer l'inondabilité d'un site. Ces données ponctuelles peuvent être transformées en données surfaciques par extrapolation ou interpolation pour connaître l'étendue transversale et longitudinale d'une inondation (Montané et al., 2014). Ainsi, des limites qui n'avaient pu être établies avec la méthode géomorphologique peuvent être identifiées. Bien sûr, il faut être conscient que

l'information qui se dégage d'une telle limite est représentative d'un évènement donné à un temps donné. C'est pourquoi lorsqu'une série de débit incluant la date de l'évènement est disponible, il vaut mieux identifier la superficie inondée à la récurrence et à la magnitude qui l'a générée, et ce, dans le but de l'exploiter à des fins législatives. Malgré qu'il y ait beaucoup d'incertitude entre les étapes de délimitation et d'analyse fréquentielle, il est quand même possible de s'intégrer significativement dans l'hydrostatistique, ce qui renforce la cartographie.

Certaines plaines alluviales ne valent pas la peine d'être subdivisées en raison du faible contraste observé au niveau de l'intensité de l'aléa d'inondation dans les limites de celles-ci (Besnard et al., à soumettre). Toutefois, comme la réflexion à ce sujet en est encore qu'au balbutiement, l'analyse se basant sur un seuil de puissance spécifique telle que proposée par Biron et al. (2013) n'a pas été appliquée dans le cadre de la cartographie de la rivière Mitis. C'est pourquoi la cartographie de la Mitis est construite selon la prémisse qui maintient l'existence d'un gradient morphologique hétérogène suffisamment contrasté pour valider la pertinence d'une subdivision de l'intensité de l'aléa d'inondation dans les limites de la plaine alluviale. Autrement dit, plus on s'éloigne du chenal, moins on s'attend à ce que les formes et les processus fluviaux soient marqués, ce qui se traduit par une intensité d'inondation décroissante du chenal vers le versant. La méthode historique a donc été utilisée pour illustrer ce gradient en recourant à une subdivision de la hauteur d'eau et de la fréquence d'inondation.

3.3.3.1 Acquisition des données

Un repère historique réfère à un évènement d'inondation passé plus ou moins bien identifié dans le temps. Autrement dit, il peut être référé à une journée (date) voire à une heure précise, à une année ou à une récurrence atemporelle³³. Deux types de données historiques ou repères historiques ont été recensés sur le territoire à l'étude : les données historiques altimétriques et les données historiques qualitatives.

³³ Exemple : un riverain témoigne sur l'inondabilité récurrente d'une surface.

Les données historiques dites altimétriques (ou marqueur d'inondation) qualifient les données qui renseignent sur une hauteur d'eau précise que l'on peut transposer en altitude dans le LiDAR. Celles-ci ont été mesurées et localisées sur le terrain à l'aide d'un DGPS qui retranscrit une hauteur absolue et d'un GPS et d'une règle graduée qui permet de mesurer une hauteur relative qui est ensuite additionnée à l'altitude absolue du LiDAR. Ce type de données provient de photographies obliques prises lors d'évènements de crue, des témoignages recueillis auprès des riverains et des acteurs locaux, de laisses de crues ou encore de cicatrices glacielles. Exceptionnellement, des photographies en plan prises lors d'évènements d'inondation, comme c'est le cas ici avec les images satellites Google Earth de 2014, peuvent générer des données historiques altimétriques. Pour ce qui est des données historiques de hauteurs d'eau, celles-ci n'ont de valeur que si elles sont situées à l'intérieur d'une zone couverte par un LiDAR. Si ce n'est pas le cas, elles sont tout simplement reléguées au rang de données historiques qualitatives.

Les données historiques dites qualitatives sont des données qui ne peuvent pas renseigner directement sur la hauteur d'eau. Par contre, elles informent sur le caractère inondable ou non d'une surface ou d'un secteur. Elles ont été obtenues dans les archives locales, auprès des riverains, dans les bases de données de réclamation du MSP et dans les registres tenus par le service de sécurité incendie et civile qui recensent les résidences évacuées lors des évènements d'inondation.

Exemples de données historiques qualitatives :

- Journal L'Avantage (2011) : « *Transport Québec a annoncé en début de soirée, le 4 mai, la fermeture de la route 234 entre Sainte-Angèle-de-Mérici et Price, en raison de l'accumulation de l'eau.* »
- Registre de la MRC de La Mitis : adresses de résidences évacuées lors de l'inondation de 2011.

Une enquête de terrain fut réalisée pour mettre à contribution la mémoire collective des riverains qui conservent après chaque évènement d'inondation marquant des repères historiques utiles à la cartographie des zones inondables. Près d'une centaine de résidences

riveraines furent ciblées et abordées lors de cette campagne de terrain. Aussi, d'autres intervenants du milieu comme la direction régionale d'Hydro-Québec (conseiller en communication et collectivités), la direction régionale du MSP (conseiller en sécurité civile), le CEHQ, la MRC de la Mitis (maire, aménagiste, coordonnateur en géomatique et directeur de la sécurité incendie et civile), les municipalités (inspecteur des cours d'eau et directeur général), la ZEC rivière Mitis et les agriculteurs furent contactés afin d'élargir au maximum l'effort d'échantillonnage.

Les archives locales comme les articles de presse régionale (Radio-Canada Est du Québec, l'Avantage, TV Mitis...), les vidéos et les photographies obliques prises par les riverains, la MRC et les municipalités qui renferment également de précieuses informations utiles à la cartographie des zones inondables furent épluchées. Les archives locales ont été fouillées par l'intermédiaire du service des archives régionales de la bibliothèque de l'UQAR et la voie du web. En somme, c'est l'ensemble de ces acteurs et de ces documents qui permit de bâtir un portrait détaillé des surfaces affectées par les inondations à l'eau claire et par embâcle de glace.

Dans le but de voir la cartographie HGM être éventuellement utilisée par les communautés locales pour aménager le territoire, il convient au préalable de penser à la façon dont vont être traitées les données historiques. C'est pourquoi la cartographie finale a été élaborée de façon à ce qu'elle puisse facilement s'accorder avec les normes de la PPRLPI qui se base sur la récurrence des crues 0-20 et 20-100 ans pour légiférer l'aménagement du territoire.

Dans le cadre législatif québécois actuel, les données historiques quantitatives ne sont utiles que si une analyse fréquentielle en est faite dans le but de subdiviser la plaine alluviale selon la fréquence des crues. En effet, si l'on parvient à identifier des ensembles de repères historiques qui se rattachent à des récurrences de crue de 0-20 ans et 20-100 ans, il est alors possible de modéliser des étendues d'eau (MNZI) ou de relier des unités HGM à des processus qui cadrent adéquatement avec les attentes de la PPRLPI. Une simple analyse

fréquentielle des séries de débit permet d'associer les repères historiques à ces deux classes de récurrence.

3.3.3.2 Analyse fréquentielle des débits de crue annuels de la rivière Mitis

L'analyse fréquentielle est effectuée à partir des débits totaux³⁴ moyens journaliers des maximums annuels pour la période 1924-2015 au point d'enregistrement de la station hydrométrique de l'ancienne centrale de Price (station 02QA003). Les données de la station 02QA003 couvrent 58 années sur les 74 années de la période 1921-1994, ce qui représente la plus longue période de mesure des débits sur la rivière Mitis. Pour compléter la série de débits des années manquantes pour la période 1924-2015, les débits moyens journaliers des stations hydrométriques 022003 et 022001 du CEHQ situées sur la rivière Rimouski ont été transposés au point d'enregistrement de la centrale de Price tout comme les débits de la centrale Mitis-1 située 2,7 km en amont qui couvrent la période 1995-2015 (Hydro-Québec). Cette partie décrit les étapes menant à l'analyse fréquentielle des données de la station Price incluant l'analyse de transposition des données de débits des stations des rivières Rimouski et Mitis.

Transposition des données de débit.

Dans un premier temps, pour assurer la pertinence de la transposition, il importe de valider la représentativité des données de débits des stations d'emprunt (voir stations hydrométriques du CEHQ, Annexe 1). Les séries de débits mis à disposition par le CEHQ pour la rivière Rimouski recoupent la série de débits de la centrale de Price de 1962 à 1984. Pour comparer les débits des deux stations, ceux-ci sont regroupés dans un diagramme de dispersion pour en faire une analyse de corrélation (Figure 36).

La Figure 36 illustre une forte relation linéaire entre le débit enregistré au barrage de la centrale de Price et celui enregistré à la station hydrométrique 022003 sur la rivière Rimouski. Le coefficient de corrélation et la pente de la relation se rapprochant de la pente de la représentativité parfaite (1:1) supportent l'existence d'une forte relation entre les

³⁴ Débits totaux = débits turbinés + débits déversés.

débits des deux bassins et, par conséquent, la transposition des débits de la rivière Rimouski vers la rivière Mitis.

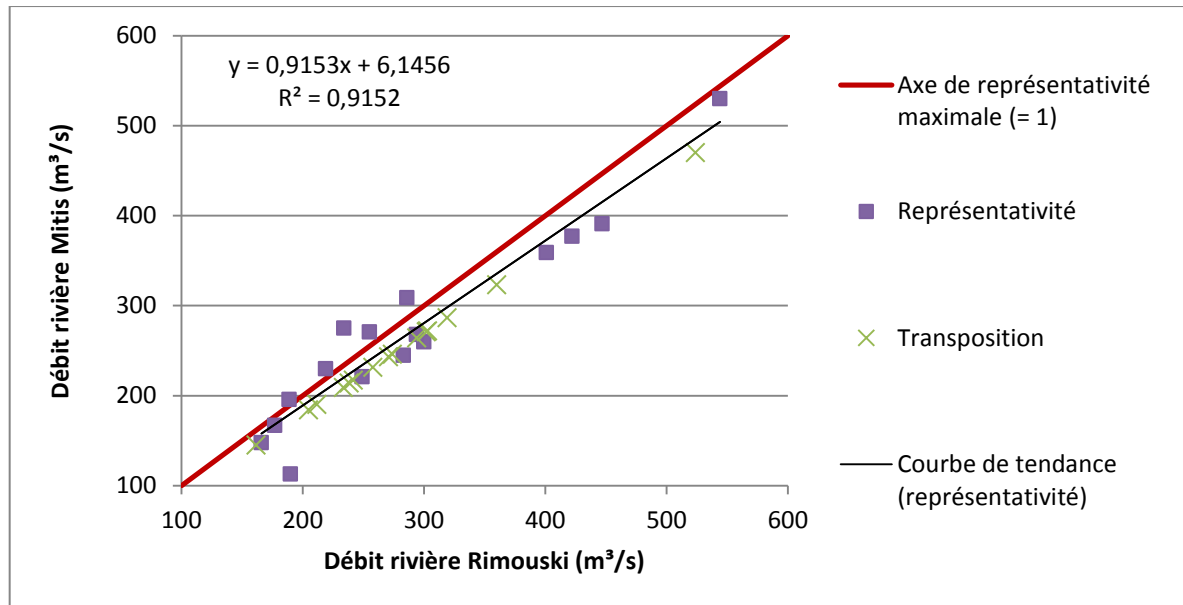


Figure 36 - Compilation des débits testant la représentativité des débits de la rivière Rimouski pour la rivière Mitis et des débits transposés de la rivière Rimouski vers la rivière Mitis. Représentativité : comparaison des débits journaliers (Q) des rivières Mitis et Rimouski entre 1968 et 1984 aux mêmes dates (n = 16). Transposition : transfert de 15 années de débits de la station hydrométrique de la rivière Rimouski vers la station hydrométrique de la centrale de Price.

Les débits de la Rimouski ont été transposés à la Mitis par l'intermédiaire de la méthode par « transfert de bassin versant » recommandée par le CEHQ (2015). L'Équation 2 permet ce transfert:

$$Q_{T2} = Q_{T1} \left[\frac{A_2}{A_1} \right]$$

Équation 2 – Équation de la méthode du transfert de bassin versant (CEHQ, 2015). Où Q_{T2} représente un débit de crue de récurrence T au site de la centrale de Price, Q_{T1} un débit de crue de récurrence T au site de la station 022003 situé sur la Rimouski, A_1 la superficie du bassin versant du site donneur (Rimouski - secteur A20 : 1615 km²) et A_2 la superficie du bassin versant du site receveur (Mitis - centrale de Price : 1800 km²).

La même méthode fut utilisée pour transposer les débits de la centrale Mitis-1 vers la centrale de Price.

Estimation de la récurrence des crues de référence

Les crues maximales annuelles survenues durant la période d'enregistrement (92 ans) ont laissé des indices de leur passage. Comme vue précédemment, ces indices ou repères historiques sont utiles à la cartographie des zones inondables et notamment à la valorisation législative de la cartographie HGM par l'application d'un zonage cadrant avec les normes de la PPRLPI. Toutefois, avant d'arriver à cela, il faut estimer la distribution de fréquences des débits de chacune des crues printanières dans un intervalle de récurrences compris entre 2 et 100 ans pour pouvoir s'en servir comme référence cartographique. Selon Anctil (1998), lorsque l'enregistrement est supérieur à 25 ans, l'ajustement d'une fonction de distribution par l'application d'une approche classique débouche sur de très bons résultats. Toutefois, il conseille de les valider en employant la distribution régionale convenant à la localisation de la série d'enregistrement en utilisant la crue moyenne (λ_1) de la série disponible. C'est pourquoi dans un premier temps la distribution des débits fut estimée par l'entremise de la distribution du Log-Pearson de Type 3 (LPT3) avant d'être validée avec la méthode d'Anctil qui se base sur une analyse régionale des crues journalières de la province de Québec (Anctil et al., 1998) (Tableau 10 et Tableau 11).

Tableau 10 – Méthodes employées pour calculer la distribution de fréquences.

Distribution LPT3							
<i>Étape 1</i> : calcul des logarithmes de débit (logQ)							
$\log Q = \overline{\log Q} + K\sigma_{\log Q}$							
où							
Q	Débit de crue associé à une probabilité donnée;						
$\overline{\log Q}$	Moyenne des logarithmes de Q;						
K	Facteur de fréquence déterminé à partir du coefficient d'asymétrie (sk) des logarithmes de Q;						
$\sigma_{\log Q}$	Écart-type des logarithmes de Q.						
<i>Étape 2</i> : calcul des débits de récurrence (Q_T)							
$Q_T = 10^{\log(Q)}$							
Distribution régionale							
<i>Étape 1</i> : calcul des quantiles normalisés régionaux (Q_T^R)							
$Q_T^R = \xi + \frac{\alpha \left\{ 1 - \left[-\ln\left(\frac{T-1}{T}\right) \right]^\kappa \right\}}{\kappa}$							
où							
ξ, α, κ	Correspondent respectivement aux paramètres d'ajustements d'échelle, de localisation et de forme des distributions régionales des moments L^* normalisés. Dans le cas présent, ce sont les fonctions de la région homogène I (R = 1) de la province de Québec qui ont été utilisées :						
	<table style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td style="text-align: center;">ξ</td> <td style="text-align: center;">α</td> <td style="text-align: center;">κ</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">0,8397</td> <td style="text-align: center;">0,2819</td> <td style="text-align: center;">0,0086</td> </tr> </table>	ξ	α	κ	0,8397	0,2819	0,0086
ξ	α	κ					
0,8397	0,2819	0,0086					
T	Période de retour.						
<i>Étape 2</i> : calcul des débits en fonction de la période de retour (Q_T)							
$Q_T = Q_T^R \lambda_1$							
où							
λ_1	Moyenne des débits annuels maximaux de la période 1924 - 2015.						

* Coefficient de variation et d'asymétrie.

Tableau 11 – Résultats de la distribution LPT3 et de la distribution régionale selon la méthode d’Ancil et al. (1998) pour la série de débits de la période 1924 – 2015.

Récurrence (T)	Distribution LPT3			Distribution régionale	
	K (-0,1)	log(Q)	Q _T	Q _T ^R	Q _T
2	0.01662	2.413656303	259	0,94285733	258
2,3	0.19339	2.441244654	276	0,99751088	273
2,5	0.26882	2.453016952	284	1,02851394	282
3,3	0.53624	2.494752974	312	1,12565649	308
5	0.84611	2.543114133	349	1,25981761	345
10	1.27037	2.609328047	407	1,46797934	402
20	1.61594	2.663260876	461	1,66639468	457
25	1.7158	2.678845945	477	1,72907849	474
40	1.91219	2.709496373	512	1,85982316	510
50	1.99973	2.723158669	529	1,92140578	526
100	2.25258	2.762620763	579	2,11116583	578
Paramètres de la série de débits de la période 1924 - 2015	$\overline{\log Q} : 2.411062433$ $\sigma_{\log Q} : 0.156069187$ $Sk : -0.116129788$			$\lambda_1 : 274 \text{ m}^3/\text{s}$	

La Figure 37 présente une relation linéaire entre les débits de récurrence estimés par la distribution de LPT3 et les débits de la distribution régionale. La forte corrélation obtenue ($R^2 = 0,9999$) indique une similitude significative entre les valeurs de débit des deux méthodes pour une même récurrence. Par le fait même, les récurrences des débits obtenues par la distribution de LPT3 peuvent être transposées aux crues de références.

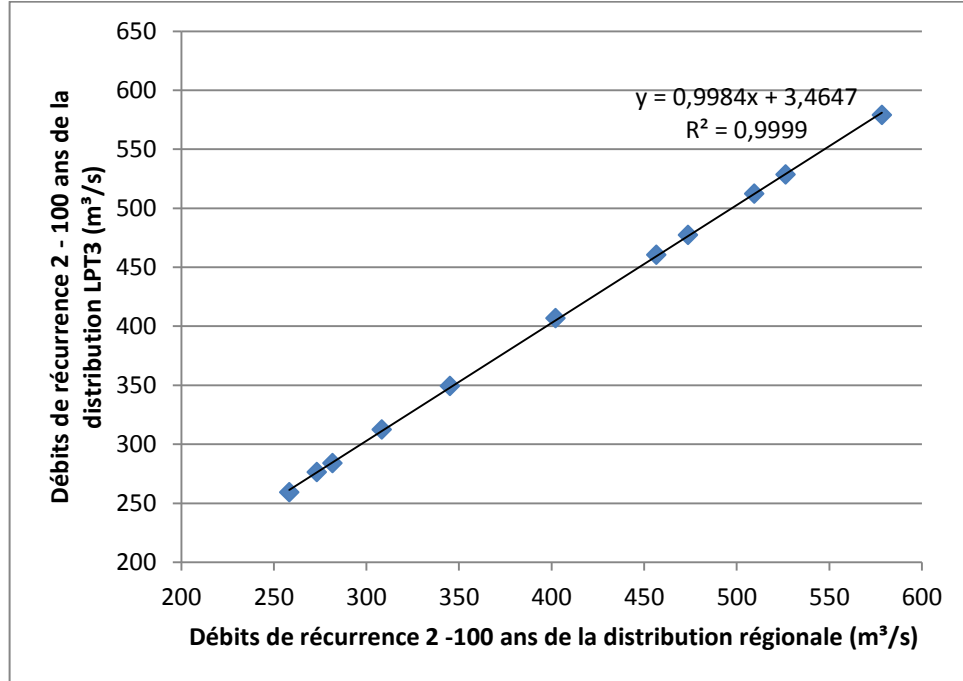


Figure 37 - Comparaison des débits de récurrence 2 - 100 ans des distributions de LPT3 et d'Anctil et al. (1998) pour les mêmes récurrences (n = 11).

La Figure 38 présente la série chronologique des débits maximums annuels journaliers moyens pour la période de 1924 à 2015. La série de débits permet de comprendre pourquoi autant de repères historiques furent recensés pour la crue printanière de 2011 lors de l'enquête de terrain. En effet, celle-ci est encore fraîchement présente dans la mémoire collective de la communauté riveraine, car elle est la crue la plus importante de ces 30 dernières années. Ainsi, la crue de 2011 représente une crue clé pour la cartographie des zones inondables de la rivière Mitis. Aussi, étant donné qu'elle se trouve à 28 m³/s sous la limite des crues de récurrence 20 ans, celle-ci sera d'autant plus utile à la délimitation des zones inondables selon les normes fixées par la PPRLPI. La crue de 2014, dont la récurrence est inférieure à 20 ans, sera également d'une aide précieuse, car elle fut la seule crue constatée et échantillonnée pendant la campagne de terrain. Les images satellites du 5 avril 2014 appuieront les observations effectuées lors de cette campagne de terrain étant donné qu'elles furent prises au début de l'onde de crue printanière.

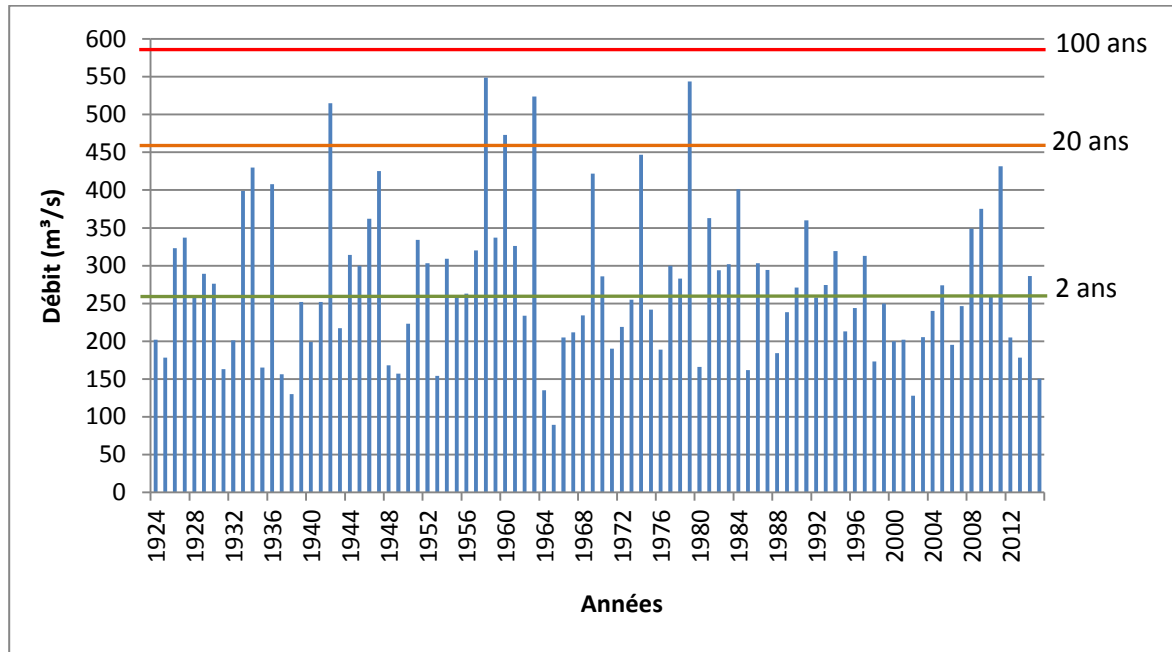


Figure 38 – Hydrogramme des débits maximums annuels journaliers moyens de 1924 à 2015. Les lignes verte, orange et rouge représentent les seuils de récurrence obtenus à l'aide de la distribution de LPT3.

3.3.4 Méthode complémentaire : l'analyse pédologique

L'analyse pédologique a été mise en place pour discerner les unités HGM fonctionnelles des unités HGM non fonctionnelles (surfaces stables). Celle-ci s'est traduite par une campagne d'échantillonnage des sols sur 44 sites. La caractérisation de 44 pédons fut donc effectuée entre la halte routière de Sainte-Angèle-de-Mérici et la confluence des rivières Mitis et Mistigouèche à Sainte-Jeanne-d'Arc. C'est la position des forêts matures qui prédétermina l'étendue de la zone échantillonnée et la position spécifique de chaque pédon. La présence d'une végétation mature non perturbée assurait davantage la présence d'une litière développée et par le fait même des conditions chimiques et biologiques optimales à la pédogénèse, car les podzols sont particulièrement vulnérables aux perturbations anthropiques. En effet, au même titre qu'une accumulation sédimentaire excessive, l'érosion anthropogénique (agriculture, sylviculture...) peut déstabiliser la

chimie et la faune du sol essentielle au fonctionnement du système pédogénétique (Schaetzl and Anderson, 2005). Un couvert végétal arborescent continu sur l'ensemble de la période couverte par les photographies aériennes disponibles, soit depuis 1963, fut le critère de décision principal pour cibler l'emplacement des sites d'échantillonnage. Également, de manière à constater le comportement pédogénétique des sols en fonction de leur position topographique par rapport au chenal et ainsi leur conformité par rapport à ce qui se dit dans la littérature, quelques pédons témoins furent creusés dans différents environnements à l'intérieur et à l'extérieur de la plaine alluviale.

La couleur du sol est le principal indice pédologique qui fut utilisé pour statuer sur l'inondabilité et la stabilité des unités HGM. L'indice de Buntley-Westin (B.-W.) a été choisi pour quantifier ce paramètre. Il se base sur l'intensité de la couleur rouge du sol pour mesurer l'état de développement de la podzolisation (Buntley et Westin, 1965). Étant donné que Demers et al. (2014) l'ont employé pour caractériser la couleur des sols de la plaine alluviale de la rivière Matane située à une cinquantaine de kilomètres à l'est de la rivière Mitis (dans un contexte lithologique similaire), on peut s'attendre à retrouver une réponse pédogénétique similaire dans les sols échantillonnés. Normalement, plus l'indice est élevé, plus la podzolisation est avancée.

L'indice B.-W. est calculé à partir des codes de la charte MUNSELL[®] obtenus lors de l'évaluation de la couleur des sols sur le terrain. Trois variables permettent de codifier la couleur du sol : la teinte (*hue*), la luminosité (*value*) et la saturation (*chroma*). Sur les neuf teintes que recense la charte, sept sont en général utilisées pour codifier les sols du Québec : 10R, 2.5YR, 5YR, 7.5YR, 10YR, 2.5Y, 5Y (Lafond et al., 1992). Ces teintes sont respectivement ordonnées de la plus rouge à la plus jaune. Une fois la couleur caractérisée, la valeur de la teinte (10R = 7,25; 2.5YR = 6; 5YR = 5; 7.5YR = 4; 10YR = 3; 2.5Y = 2; 5Y = 1) est multipliée par la saturation (comprise entre 1 et 8). La saturation correspond à la proportion de gris qui entre dans la composition de la teinte du sol (Lafond et al., 1992). Des études faites au Québec sur cinq rivières distinctes ont permis d'estimer et de déduire jusqu'à preuve du contraire que les sols influencés par les inondations de récurrence 0-100

ans possèdent la plupart du temps un indice B-W inférieur à 10 contrairement aux sols non inondables ou situés dans la zone de récurrence supérieure à 100 ans ($B-W > 10$) (Demers et al., 2014; Saint-Laurent et Lavoie, 2009).

Tableau 12 – Attributs pédologiques qui accompagnent et illustrent la variabilité de l'indice B.-W.

	Attribut pédologique	Information
Sol non inondable (B-W > 10)	Présence d'un horizon Ah dont la coloration varie du brun foncé au noir	C'est un indice d'accumulation de matière organique plus ou moins humifiée (Lafond et al., 1992). Plus l'épaisseur de la litière est importante plus l'horizon Ah a des probabilités d'être bien développé. En combinant cet attribut aux autres attributs pédologiques de non inondabilité, le caractère géomorphologique stable, soit le caractère non fonctionnel de la surface par rapport aux inondations peut être confirmé.
	Présence d'un horizon Ae cendreux	Dans certains cas*, il permet de statuer sur le caractère non inondable des surfaces. Pour que la présence d'un horizon Ae soit considérée comme un indice de non inondabilité, il faut s'assurer que la dynamique hydrosédimentaire ne permette pas le développement de cet horizon dans la zone inondable.
	Présence de l'horizon B avec une coloration variant du jaune brun au rouge	C'est un indice d'accumulation des oxydes de fer et par le fait même un indice de podzolisation (Lafond et al., 1992). Plus l'indice B.-W. est élevé, plus la prévisibilité que la surface soit non inondable est grande (Figure 39).
Sol inondable (B-W < 10) ou influencé par la nappe phréatique	Absence et développement partiel des horizons Ah, Ae et B	Ceux-ci sont des indices d'inondabilité à condition qu'il ait été possible de vérifier hors de tout doute que cette inhibition n'a pas été causée par une perturbation anthropique ou une autre situation qui maintient le sol à un stade immature.
	Présence de sols organiques (Figure 40)	C'est un indice de saturation du sol en eau pendant la totalité ou la quasi-totalité de l'année. L'anoxie provoquée par l'eau limite l'activité des micro-organismes décomposeurs nécessaire à l'humification et c'est pourquoi la litière peut se développer sur plusieurs dizaines de centimètres d'épaisseur (Lafond et al., 1992).
	Présence de mouchetures bleuâtres, rougeâtres et grises à verdâtres	C'est un indice de gleyification qui caractérise un mauvais drainage ou la présence fréquente ou permanente de la nappe en surface. Le déficit d'oxygène occasionné rend le milieu réducteur ce qui a pour effet de dissoudre le fer et le manganèse et de les concentrer en surface. Ces sols sont souvent désignés comme hydromorphes (Figure 40) (Lafond et al., 1992).

*Vérifié pour les cas des rivières Matane (Demers, 2015) et Saint-François (Saint-Laurent et al., 2014).



Figure 39 – Différence de coloration entre des sols prélevés à différentes hauteurs dans la plaine alluviale. (1) sol prélevé à un niveau alluvial annuellement inondé (indice B.-W. = 6); (2) sol prélevé à environ 1,5 m au-dessus du sol 1 (indice B.-W. = 9); (3) sol prélevé à un environ 1 m au-dessus du sol 2 (B.-W. = 18 à 32).



Figure 40 – Profils de sol saturé en eau ou influencé par le battement de la nappe phréatique. (A) sol organique, (B) sol hydromorphe (Ruellan, 1985).

3.3.5 Indices de crue validant le caractère inondable d'une surface

3.3.5.1 Laisses de crue

Les laisses de crue trouvées pendant la campagne de terrain ont plus souvent servi à valider le caractère inondable des surfaces plutôt qu'à modéliser une hauteur d'eau matérialisant un évènement particulier. En effet, pour extraire une cote de crue à partir d'une laisse de crue deux conditions doivent se chevaucher. La première est que la laisse de crue soit située dans les limites d'un MNE avec une bonne résolution spatiale et la seconde est que celle-ci soit en plus située sur une structure rigide ou une plante qui ne verse pas en présence d'un fort courant. Par conséquent, toutes les laisses de crue situées à l'extérieur de la couverture LiDAR et/ou situées dans les champs ne furent pas utilisées comme données historiques altimétriques. Pour être comptabilisée, une laisse de crue doit être perchée sur une tige dont le DHP est supérieur à 10 cm (Marchand et al., 2014).

Aussi, l'occupation des sols a un impact direct sur la pérennité des laisses de crue dans le temps. Contrairement aux laisses de crue en milieu forestier, les laisses de crue en milieu agricole peuvent être associées à un évènement particulier, car le terrain est réinitialisé annuellement après chaque nouvelle récolte/période de dormance. En raison de la faible récurrence des opérations sylvicoles dans les zones boisées, les traces laissées par les inondations sont beaucoup moins éphémères et peuvent s'accumuler d'une année à l'autre. C'est pourquoi même si une laisse de crue est retrouvée sur une tige dont le DHP est supérieur à 10 cm, il est difficile de la rattacher à un évènement particulier.

3.3.5.2 Cicatrices glacielles

Bien qu'elles sous-estiment la hauteur réelle du niveau d'eau atteint pendant un évènement d'inondation (Marchand et al., 2014), une cicatrice glacielle permet de valider l'inondabilité de la plaine alluviale en modélisant une hauteur d'eau à partir de l'altitude de son sommet. Sur les six repères historiques d'inondation par embâcle de glace utilisés dans la cartographie aval, deux proviennent de cicatrices glacielles.

3.3.6 Rendu cartographique

Trois types d'information ont été intégrés dans la cartographie aval : les classes de profondeurs d'eau associée à la crue en eau libre du printemps 2011 (MNZI), les surfaces inondées par les embâcles de glace et les unités HGM identifiées à l'extérieur des limites du MNZI. La classification des hauteurs d'eau est basée sur les documents de gestion des risques alluviaux de la DECCW (2005) et de la EMA (1999) ainsi que sur les conclusions d'une étude (Cox et al., 2010) qui recense les résultats de recherches australiennes et internationales au sujet de la stabilité des individus dans un écoulement (Tableau 13).

Tableau 13 - Limites de stabilité en position debout d'un individu en fonction du produit du rapport taille/poids (H.M. = mkg) sur le produit du rapport hauteur/vitesse d'écoulement (D.V. = m²/s⁻¹). Source : Cox et al., 2010.

DV (m ² s ⁻¹)	Infants, small children (H.M ≤ 25) and frail/older persons	Children (H.M = 25 to 50)	Adults (H.M > 50)
0	Safe	Safe	Safe
0 – 0.4		Low Hazard ¹	Low Hazard ¹
0.4 – 0.6		Significant Hazard; Dangerous to most	
0.6 – 0.8	Extreme Hazard; Dangerous to all		Moderate Hazard; Dangerous to some ²
0.8 – 1.2	Extreme Hazard; Dangerous to all		Significant Hazard; Dangerous to most ³
> 1.2			Extreme Hazard; Dangerous to all

¹ Stability uncompromised for persons within laboratory testing program at these flows (to maximum flow depth of 0.5 m for children and 1.2 m for adults and a maximum velocity of 3.0 ms⁻¹ at shallow depths).
² Working limit for trained safety workers or experienced and well equipped persons (D.V < 0.8 m²s⁻¹)
³ Upper limit of stability observed during most investigations (D.V > 1.2 m²s⁻¹)

Voici quelques seuils critiques de hauteur d'eau qui peuvent être utilisés pour caractériser la magnitude de l'aléa d'inondation (afin d'alléger le rendu cartographique, seuls les seuils critiques de hauteur d'eau pour la stabilité des individus ont été illustrés) :

- 0,3 m : la stabilité d'une voiture légère est compromise (EMA, 1999);
- 0,5 m : la stabilité d'un enfant est comprise (Cox et al., 2010);
- 0,6 m : la stabilité d'une camionnette et d'une ambulance (0,65 m) est compromise (Mens et al., 2008);
- 0,8 m : la stabilité d'un adulte est compromise et l'aléa est de catégorie modérée (DECCW, 2005);
- 1 m : la stabilité d'un camion de pompier (1,05 m; Mens et al., 2008) est compromise et l'aléa est de catégorie élevée (DECCW, 2005);
- 1,2 m : la stabilité d'un secouriste équipé est compromise (Cox et al., 2010).

La cartographie amont a été exécutée en deux étapes. Lors de la première étape, la plaine alluviale a été subdivisée en six unités HGM (milieu humide riverain, chenal de débordement et autres formes d'érosion; dépression humide et surface d'exfiltration; chenal plein bord; autre surface alluviale; surface stable; forme fluviale périphérique). Les repères historiques et géomorphologiques conjugués aux repères pédologiques (indice B.-W. et présence d'un podzol) ont permis cette subdivision. La classe « autre surface alluviale » correspond à des unités HGM non définies. Les classes « milieu humide riverain,... » et « dépression humide... » correspondent à des unités HGM qui ont été inondées le 5 mai 2014.

C'est lors de la deuxième étape cartographique que les unités HGM ont été substituées par des classes de fréquence d'inondation qui sont surtout basées sur les surfaces d'inondation historiques de 2014 et les repères pédologiques.

3.4 RESULTATS

3.4.1 Analyse des indicateurs pédologiques

Afin de pouvoir comparer les résultats pédologiques avec la littérature et vérifier la réponse pédologique des sols propre à la plaine alluviale de la rivière Mitis, les pédons dont l'environnement proximal (facteurs perturbateurs d'origine naturelle ou anthropique) est jugé avoir une influence sur le développement pédogénétique ont été écartés (voir lignes bleues du Tableau 14). Les pédons de la plaine alluviale du ruisseau Bernier ont également été écartés en raison du caractère diachronique de la plaine alluviale (voir lignes vertes du Tableau 14). Hormis le pédon 0.32 auquel la valeur moyenne (25,5) des indices des pédons avec podzol mature a été attribuée, les pédons avec des indices B.-W. imprécis (> 10 ou < 10) furent retirés (pédon 009, voir ligne rose du Tableau 14).

Tableau 14 – Informations obtenues lors de l'échantillonnage des sols des plaines alluviales de la rivière Mitis et du ruisseau Bernier. Les lignes colorées correspondent aux données qui furent retirées de l'analyse comparative (littérature/Mitis). Les lignes bleues (ou # pédon souligné) correspondent aux pédons dont l'environnement proximal possède un ou plusieurs facteurs perturbateurs d'origine naturelle ou anthropique qui ont une influence sur le développement pédogénétique du sol. La ligne rose (ou # pédon précédé d'un !) correspond à un indice B.-W. imprécis (> 10 ou < 10). Les lignes vertes (ou # pédon en italique) correspondent aux pédons de la plaine alluviale du ruisseau Bernier dont le caractère est diachronique.

Plaine alluviale de la rivière Mitis (1/3)								
# pédon	Latitude	Longitude	Code Munsell	Indice B.-W.	Distance altitudinale/Chenal*	Éléments expliquant l'indice B.-W.	Type de couvert végétal	Espèces végétales dominantes
0.18	48.47649551	-68.02579209	2,5Y 4/3	6	proche	Sol à proximité d'un paléochenal.	en transition**	n.d.
0.32	48.44583493	-68.00521553	n.d.	>10 ou 25,5 (moy.)	éloigné	Présence d'un horizon cendré.	résineux	n.d.
<u>0.33</u>	48.45206511	-68.00700422	10YR 2/1	3	intermédiaire	Entourbement provoqué par l'affleurement de la nappe en périphérie de la plaine alluviale.	résineux	thuya occidental
<u>001</u>	48.52672222	-68.10881962	10YR 5/2 5/3 4/2 4/3	7,5	éloigné	Le sol est susceptible d'être influencé par les apports colluviaux d'un talus et la présence d'un tributaire endigué.	feuillus	n.d.
<u>005</u>	48.52686295	-68.11140309	10YR 2/1	3	intermédiaire	Entourbement provoqué par l'affleurement de la nappe en périphérie de la plaine alluviale.	résineux	thuya occidental
<u>006</u>	48.52078473	-68.06714522	10YR 2/1	3	éloigné	Entourbement provoqué par l'affleurement de la nappe en périphérie de la plaine alluviale.	résineux	thuya occidental
<u>008</u>	48.518026	-68.06363789	10YR 2/1	3	éloigné	Entourbement provoqué par l'affleurement de la nappe en périphérie de la plaine alluviale.	mixte	sapin baumier, érable
! 009	48.51795266	-68.06324411	n.d.	>10	éloigné	Situé à l'extérieur de la plaine.	résineux	thuya occidental
011	48.51585139	-68.06557688	10YR 5/6, 7,5YR 5/6	21,5	éloigné		feuillus	n.d.
<u>012</u>	48.50714947	-68.06516709	7,5 YR 4/3	12	éloigné	Sol situé dans une jeune forêt sur une terrasse alluviale et à proximité d'un cône alluvial.	mixte	n.d.
<u>013</u>	48.50769161	-68.06527446	7,5 YR 4/2 4/3	10	éloigné	Sol pouvant être influencé par la proximité d'une plantation et d'un paléochenal en contrebas d'une terrasse fluviale.	résineux	sapin baumier, épinette

Plaine alluviale de la rivière Mitis (2/3)								
# pédon	Latitude	Longitude	Code Munsell	Indice B.-W.	Distance altitudinale/chenal	Éléments expliquant l'indice B.-W.	Type de couvert végétal	Espèces végétales dominantes
014	48.50353385	-68.06965711	10YR 6/6	18	intermédiaire		mixte	sapin baumier, peuplier
018	48.50299297	-68.06979046	10YR 6/6	18	intermédiaire		mixte	sapin baumier, peuplier
<u>019</u>	48.50292533	-68.06947614	2,5Y 5/3	6	éloigné	Situé à l'extérieur de la plaine sur un versant abrupt. Sol mince recouvrant un till.	résineux	sapin baumier
020	48.49696554	-68.06784402	7,5YR 5/8	32	éloigné	Présence d'un horizon cendré.	mixte	n.d.
<u>021</u>	48.49726687	-68.06832137	7,5YR 4/2 3/2	8	proche	Sol situé dans une jeune forêt.	mixte (arbres et arbustes)	épinette, cornouiller...
022	48.493306	-68.06461288	7,5YR 5/8	32	intermédiaire	Présence d'un horizon cendré.	mixte	n.d.
023	48.49328505	-68.05635989	10YR 5/6	18	intermédiaire		mixte	n.d.
024	48.49361982	-68.05643826	7,5YR 4/6	24	éloigné	Présence d'un horizon cendré.	mixte	n.d.
<u>025</u>	48.48995978	-68.03269384	10YR 4/1	3	intermédiaire	Sol enclavé entre l'emprise de la route et le talus d'une terrasse fluviale. Accumulation d'eau possible. Ressemble à un luvisol. Probablement situé sur un cône alluvial.	feuillus	n.d.
026	48.47663985	-68.02559428	2,5Y 4/3	6	proche	Sol à proximité d'un paléochenal.	en transition	n.d.
029	48.46943979	-68.02591086	7,5YR 5/6	24	éloigné	Présence d'un horizon cendré.	résineux	sapin baumier
030	48.46759309	-68.02648184	2,5Y 3/2	4	proche	En surplomb d'une zone humide (fougères).	feuillus	peuplier
031	48.46750131	-68.02645929	10YR 5/6	18	intermédiaire	Présence d'un horizon cendré partiellement développé. Perché sur un lambeau de terre surélevé et à proximité de tas de pierres (agriculture).	feuillus	peuplier
052	48.45638858	-68.00417617	10YR 2/1	3	proche		feuillus	n.d.
053	48.44773804	-67.99822686	10YR 5/4	12	intermédiaire		résineux	sapin baumier
<u>057</u>	48.45245169	-68.00725308	10YR 2/1	3	intermédiaire	Entourbement provoqué par l'affleurement de la nappe en périphérie de la plaine alluviale.	résineux	thuya occidental
<u>058</u>	48.46927182	-68.0326992	10YR 2/1	3	intermédiaire	Entourbement provoqué par l'affleurement de la nappe en périphérie de la plaine alluviale.	résineux	thuya occidental
<u>059</u>	48.46923418	-68.03252016	10YR 4/3	9	intermédiaire	Sol situé entre un fourrage et une dépression humide. Présence d'un horizon cendré.	résineux	n.d.

Plaine alluviale de la rivière Mitis (3/3)								
# pédon	Latitude	Longitude	Code Munsell	Indice B.-W.	Distance altitudinale/chenal	Éléments expliquant l'indice B.-W.	Type de couvert végétal	Espèces végétales dominantes
<u>060</u>	48.4687275	-68.03228949	10YR 2/1	3	intermédiaire	Entourbement provoqué par l'affleurement de la nappe en périphérie de la plaine alluviale.	résineux	thuya occidental
061	48.46662766	-68.0307059	7,5YR 5/8	32	éloigné	Présence d'un horizon cendré.	résineux	sapin baumier
062	48.4683203	-68.0299159	10YR 4/3	9	intermédiaire	Sol situé en surplomb d'une surface annuellement inondé (Figure 39).	résineux	n.d.
063	48.46931389	-68.03053147	10YR 6/6	18	éloigné	Présence d'un horizon cendré.	mixte	épinette (âgé), peuplier
064	48.47223549	-68.0321434	10YR 5/4	12	intermédiaire	Sol situé en surplomb d'une surface annuellement inondé.	résineux	sapin baumier
<u>066</u>	48.47502834	-68.03093632	2,5Y 4/3	6	intermédiaire	Sol situé dans une jeune forêt et qui semble avoir été perturbé (retourné).	mixte	n.d.
<u>068</u>	48.47719406	-68.0268296	2,5Y 4/3	6	intermédiaire	Sol à proximité d'une plantation en bordure d'un chemin.	feuillus	n.d.
<u>069</u>	48.47777015	-68.02521969	10YR 4/3	9	intermédiaire	Sol à proximité d'une plantation en bordure d'un chemin juste en surplomb d'une surface assurément inondable.	feuillus	n.d.
075	48.49745857	-68.06962869	10YR 3/2	6	proche	Sol situé à proximité d'une digue faite de matériel de dragage.	mixte	érable (âgé) et thuya occidental (âgé)

Plaine alluviale du ruisseau Bernier								
# pédon	Latitude	Longitude	Code Munsell	Indice B.-W.	Distance altitudinale/chenal	Éléments expliquant l'indice B.-W.	Type de couvert végétal	Espèces végétales dominantes
0.26	48.46650663	-68.00229628	2,5Y 4/2	4	éloigné	Plaine alluviale du ruisseau Bernier. Manque d'arguments pour expliquer le faible indice de coloration.	mixte	sapin baumier âgé
033	48.4694843	-67.99952103	n.d.	<10	intermédiaire	Plaine alluviale du ruisseau Bernier.	résineux	n.d.
034	48.46738488	-68.00310932	2,5Y 2,5/1	2	intermédiaire	Plaine alluviale du ruisseau Bernier: non loin d'un tributaire.	mixte	thuya occidental âgé
035	48.46653144	-68.00213392	2,5Y 4/2	4	éloigné	Plaine alluviale du ruisseau Bernier. Manque d'arguments pour expliquer le faible indice de coloration.	mixte	sapin baumier âgé
036	48.46658491	-68.00189612	7,5YR 5/6	24	éloigné	Situé à l'extérieur de la plaine alluviale du ruisseau Bernier. Présence d'un horizon cendré.	résineux	n.d.
037	48.46501649	-68.00235126	10YR 3/1	3	éloigné	Plaine alluviale du ruisseau Bernier. Présence d'écoulements intermittents en provenance du versant.	feuillus	n.d.

*Estimée à partir des relevés LiDAR ou du recoupement des observations obtenues par photo-interprétation et sur le terrain.

**Forêt évoluant d'un type feuillu vers un type résineux.

La réponse pédogénétique des sols retrouvés dans les pédons de la plaine de la rivière Mitis reflète les résultats de la littérature. En effet, plus la distance altitudinale entre le pédon et le chenal est grande, plus la valeur de l'indice B.-W. est grande (Figure 41 et Figure 42). De plus, l'horizonation des sols retrouvée dans les pédons est conforme à la tendance régionale décrite dans l'ouvrage de Lafond et al. (1992). Autrement dit, l'horizonation se conforme aux critères génétiques des podzols.

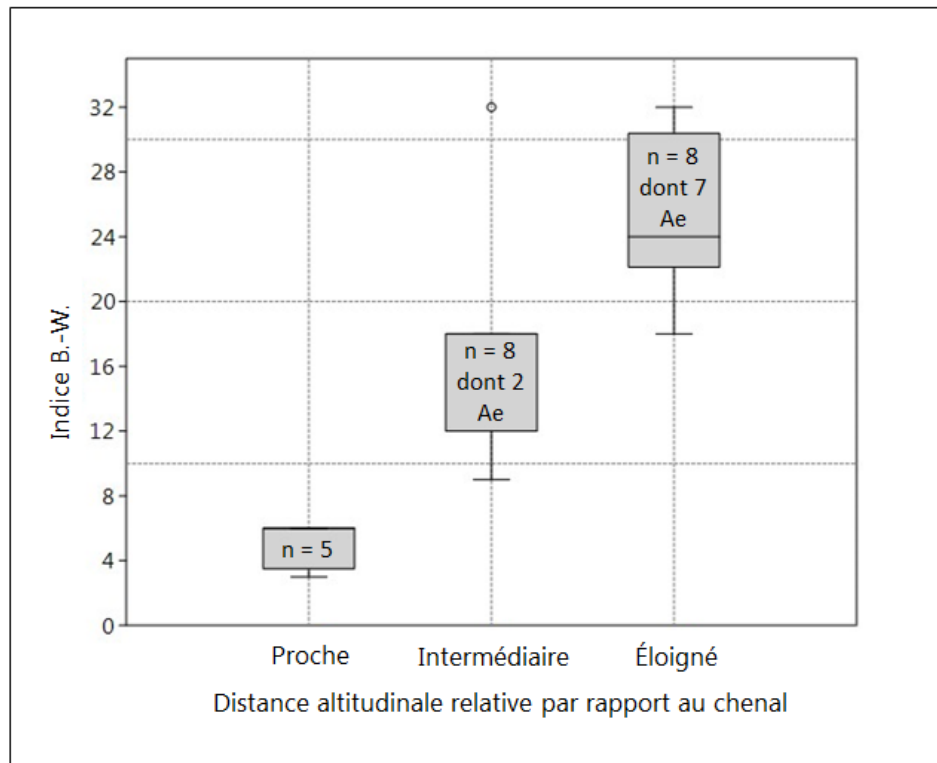
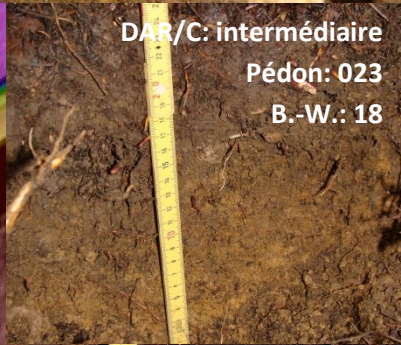
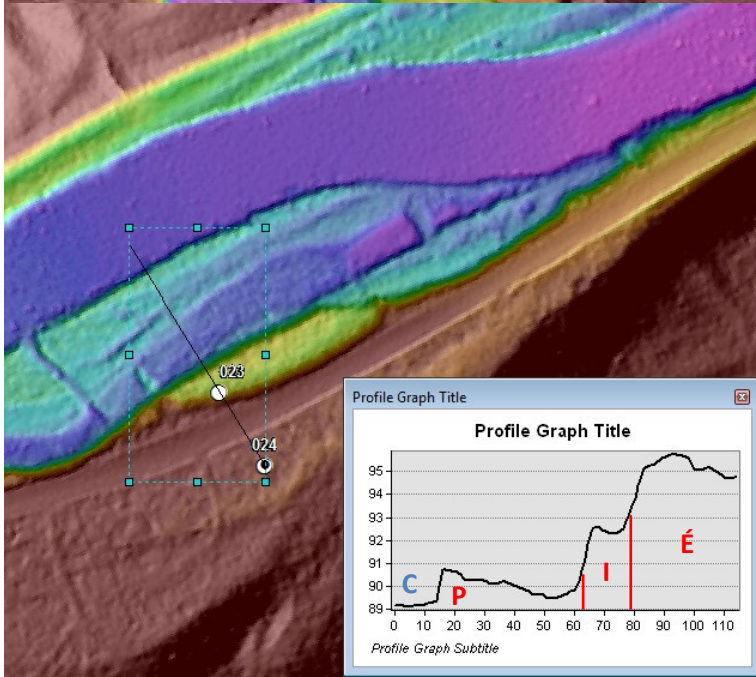
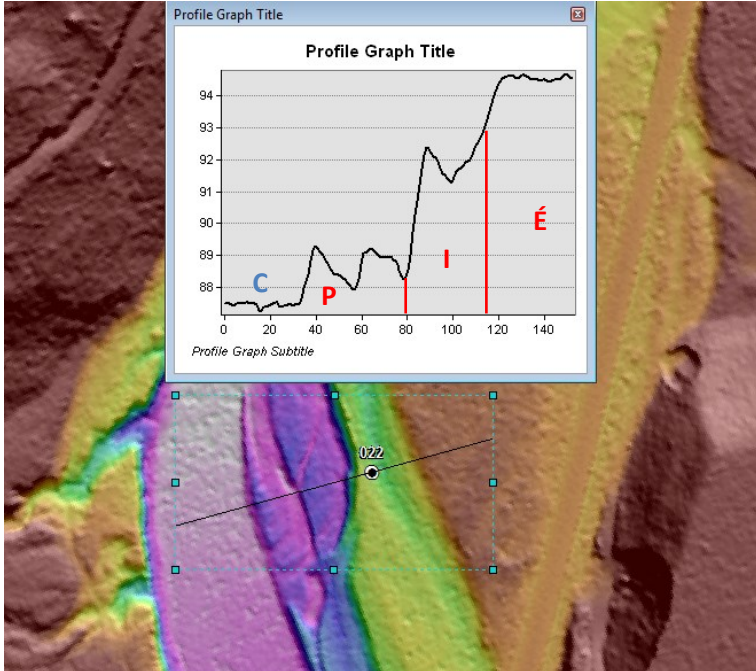


Figure 41 - Diagramme représentant la moyenne des valeurs de l'indice B.-W. en fonction de la distance altitudinale relative par rapport au chenal. Ae : horizon cendré, Proche : ~ 0-2 m, Intermédiaire : ~ 2-4 m, Éloigné : ~ > 4m.



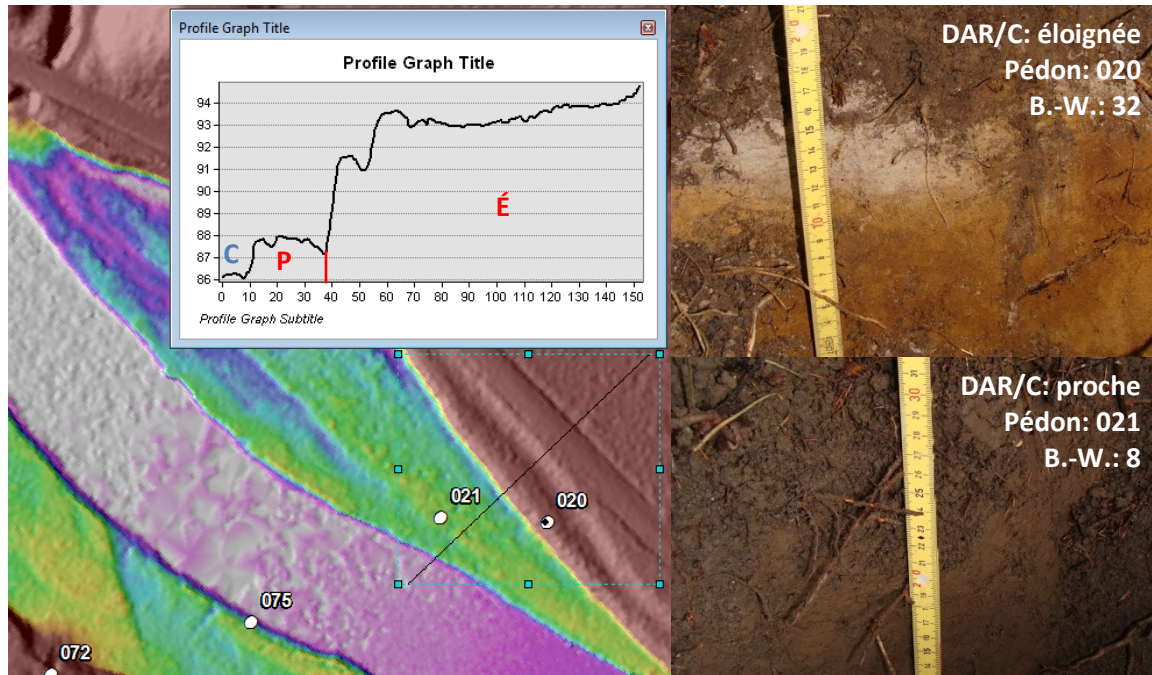


Figure 42 – Exemple illustré de l’insertion du stade de développement des sols (indice B.-W.) dans le profil topographique transversal de plaine alluviale de la rivière Mitis. C : chenal, DAR/C : distance altitudinale relative par rapport au chenal, P : proche, I : intermédiaire, É : éloignée. Un point noir à l’intérieur d’un cercle blanc indique la présence d’un horizon Ae.

Sur les 44 pédons échantillonnés, 26 ont un B.-W. inférieur à 10, et 17 ont un indice B.-W. supérieur à 10. De ces 17 pédons, 10 ont un horizon cendré. La majorité des podzols incluant un horizon cendré bien développé a été retrouvée dans des pédons situés en position altitudinale relative éloignée par rapport au chenal (Figure 41). De plus, aucun d’entre eux n’a été retrouvé à l’intérieur des unités HGM touchées par l’inondation du printemps 2014. Par le fait même, ces constats renforcent le lien hypothétique corrélant la présence de sols matures à l’intérieur de zones non inondables. La Figure 43 illustre la validation du caractère non inondable des surfaces à l’intérieur de la plaine alluviale à l’aide de l’analyse pédologique.

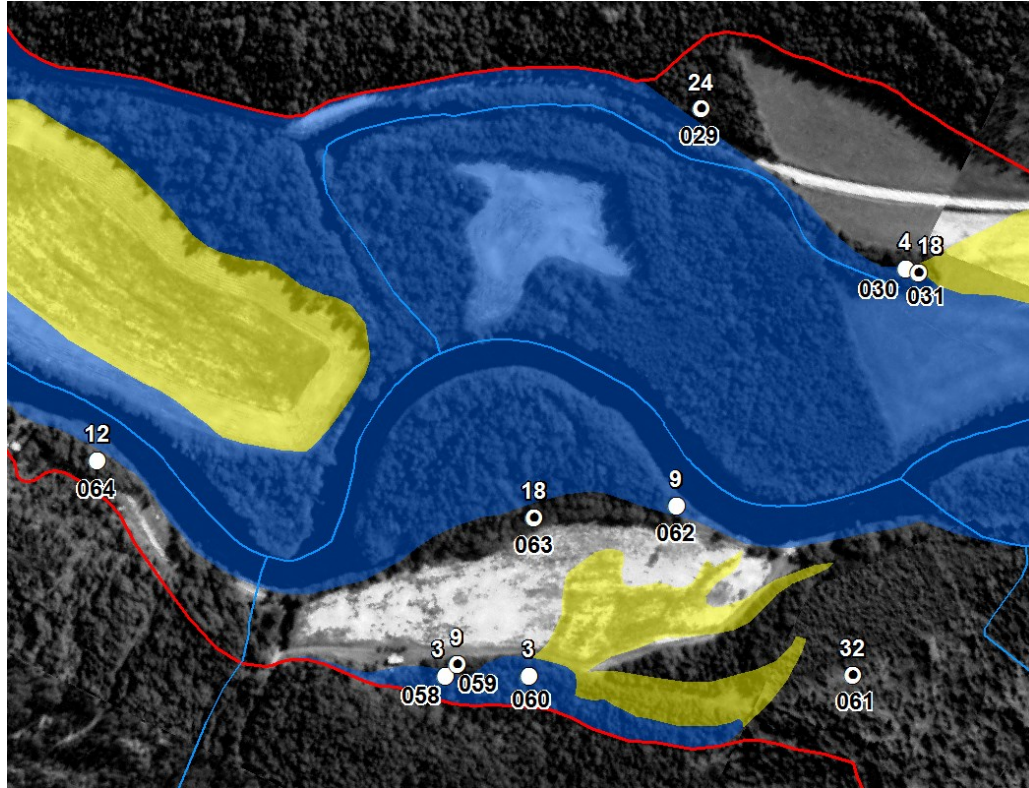


Figure 43 - Extrait cartographique représentant la validation des zones non inondables à l'aide de l'analyse pédologique. Zone bleue : zone inondable ; zone jaune : zone dont le caractère inondable est incertain ; ligne rouge : limite de la plaine alluviale ; cercle blanc : pèdon ; point noir : présence d'un horizon cendré ; nombre noir : numéro du pèdon ; nombre blanc : indice B.-W..

Le contexte local influence particulièrement sur le stade de développement du sol. La colonne « éléments expliquant l'indice B.-W. » du Tableau 14 recense entre autres les facteurs perturbateurs qui peuvent expliquer les indices dont la valeur ne s'explique pas par la position altitudinale d'un sol par rapport au chenal. Les facteurs perturbateurs sont soit d'origine naturelle, soit d'origine anthropique. Voici quelques exemples de facteurs perturbateurs rencontrés dans les environs de la rivière Mitis : paléo-chenal, cône alluvial, ruissellement, emprise routière, affleurement de la nappe, endiguement, contrebas d'une pente³⁵, exploitation forestière (coupe forestière, tassement du sol, plantation), agriculture

³⁵ Du matériel sédimentaire et de l'eau peuvent être diffusés au pied d'un talus ou d'un versant et s'y accumuler, provoquant ainsi un ralentissement du processus pédogénétique (Schaeztl and Anderson, 2005).

(rotation des cultures avec laboureur, tas de pierres), matériel issu du dragage de l'époque de la drave accumulé sur la berge...

Les sols entourbés sont des sols de type intrazonal dont le stade de développement pédogénétique a été influencé par l'environnement proximal (reliefs et dépôts). Ces sols furent tous retrouvés en périphérie de la plaine alluviale et pour la plupart à l'intérieur de ce qui semblait être des paléo-chenaux tapissés de sédiments imperméables et capables de canaliser et/ou de séquestrer proche de la surface une nappe alimentée par les eaux du versant. Aussi, la présence d'argile de la mer de Goldthwait héritée en périphérie de la plaine alluviale pourrait expliquer la rétention d'eau observée à ces endroits.

3.4.2 Cartographie HGM pour les tronçons amont et aval de la rivière Mitis

3.4.2.1 Optimisation de la méthode historique pour la cartographie HGM de la portion aval

La cartographie aval illustre l'aléa d'inondation par l'intermédiaire d'une terminologie centrée sur la magnitude. Cette magnitude est représentée par une couche matricielle des hauteurs d'eau analogue à un *modèle numérique de zones inondables* (voir MNZI, Figure 44) tel que défini par Montané (2014).

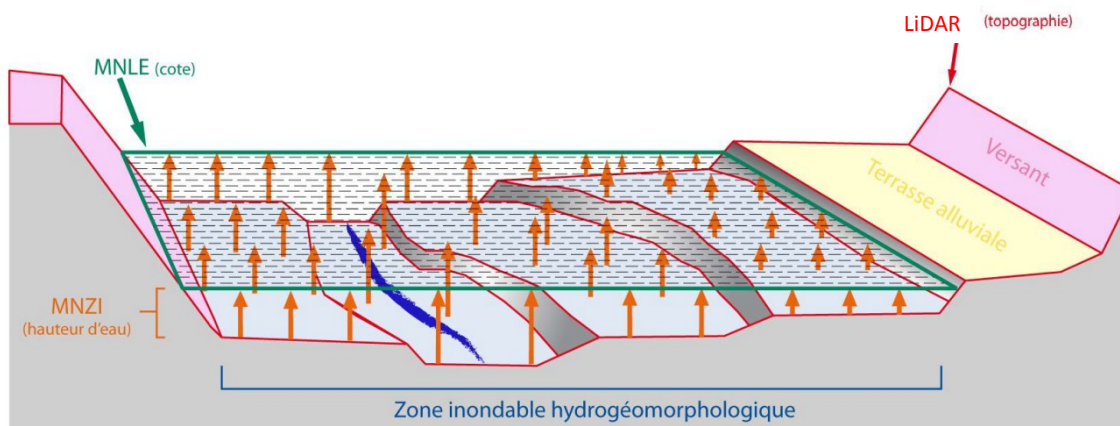


Figure 44 – Vue en plan d'un MNZI. Source : Montané, 2014.

La campagne de terrain a permis de recueillir 55 repères historiques associés à une cote de crue. Hormis un repère historique qui est situé sur la rivière Neigette, ceux-ci sont répartis sur 18,2 km des 23,6 km de linéaire de cours d'eau de la rivière Mitis couvert par le LiDAR, ce qui correspond à environ trois repères historiques par kilomètre linéaire de cours d'eau. Toutefois, seuls les repères historiques de la crue de 2011 dont la récurrence fut estimée proche de 20 ans ont été retenus pour obtenir, dans un premier temps, le *profil longitudinal de zone inondable* (voir PLZI, Figure 45), soit une ligne d'eau interpolée à 17 repères historiques répartis sur 16,7 km de linéaire de cours d'eau de la rivière Mitis. Un 18^e repère historique situé sur la rivière Neigette permet d'ajouter quatre kilomètres de linéaire de cours d'eau supplémentaire à la cartographie aval pour matérialiser l'expansion de l'inondation en eau libre du 5 mai 2011. Aussi, six repères historiques d'inondation par embâcle de glace furent intégrés à la cartographie (Figure 45).

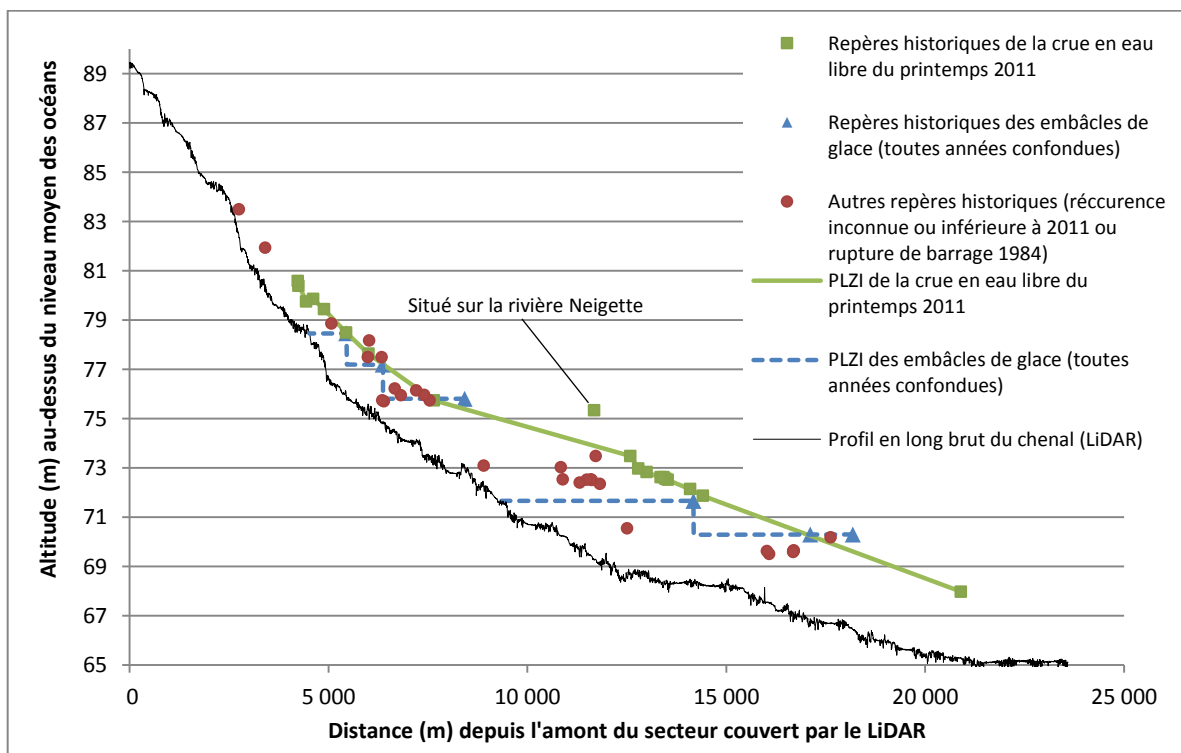


Figure 45 – Profils en Long de Zones Inondables (PLZI) construits à partir de l'altitude maximale des repères historiques projetée vers l'amont de la rivière Mitis.

La représentation longitudinale (x) et altitudinale (y) des repères historiques par rapport au profil en long de la rivière Mitis permet de repérer uniquement les repères historiques dont l'altitude est la plus élevée et d'ignorer ceux dont l'altitude serait inférieure à celui positionné en aval. Le profil en long du chenal de la rivière Mitis a été réalisé à partir de la surface de l'eau des relevés LiDAR réalisés par le MRN entre le 11 et le 16 novembre 2009, ce qui correspond à un débit d'étiage moyen de 13 m³/s. Le PLZI de l'inondation en eau libre de 2011 a été obtenu en reliant chacun des repères historiques par une ligne droite, alors que le PLZI des inondations par embâcle de glace a été obtenu en projetant une ligne d'eau horizontale vers l'amont à partir de chacun des repères historiques, mais dont la hauteur absolue augmente verticalement lorsqu'un repère historique avec une hauteur absolue supérieure est rencontré. Respectivement, les résultats de ces démarches donnent un PLZI plus ou moins parallèle au profil en long avec une hauteur d'eau qui varie en fonction de la pente du chenal ainsi qu'un PLZI en escalier.

Une fois le PLZI obtenu, un *modèle numérique de ligne d'eau* (voir MNLE, Figure 44) fut produit pour interpoler une surface raster hydrologiquement correcte entre chacun des repères historiques. Le MNLE est une couche matricielle qui contient des valeurs d'altitude. Il fut obtenu avec l'outil « Topo to Raster » dans le logiciel SIG ArcGIS avec en entrée, les transects (profils transversaux) de points d'élévation de chacun des repères historiques (*Point_Elevation*) et le polygone limite de la surface à interpoler (*Boundary*). Les transects de point d'élévation, qui traversent la plaine alluviale sur sa pleine largeur, sont superposés aux repères historiques et tracés perpendiculairement à l'écoulement. Les points qui composent le profil contiennent la valeur d'altitude du repère historique qu'ils représentent. Le polygone limite doit recouvrir l'ensemble des profils et des surfaces de la plaine alluviale logées entre chacun d'entre eux. Hormis la résolution spatiale des pixels (*cell size*) en sortie qui est définie à 2 m de côté, les paramètres sont laissés par défaut. Enfin, une dernière étape a consisté à produire un MNZI en soustrayant le MNLE au LiDAR (Figure 44) à l'aide de l'outil « Minus » dans ArcGIS. Le MNZI est une couche matricielle qui permet de rendre un aperçu réaliste des étendues longitudinale et

transversale d'une cote de crue. Les pixels de cette couche contiennent de l'information sur la hauteur d'eau.

La Figure 46 présente un aperçu de la cartographie aval de la plaine alluviale de la rivière Mitis. Sur les quatre unités HGM représentées sur cette cartographie, le chenal plein bord est bien évidemment la seule unité HGM à être intégralement continue de l'amont vers l'aval. Les lacs, les formes fluviales périphériques et les dépressions humides et surfaces d'exfiltration sont représentées de façon discontinue et peu fréquente le long de la zone cartographiée. Hormis les lacs, qui sont une unité HGM marginale et qui figurent principalement à l'intérieur d'anciens méandres, les formes fluviales périphériques et les dépressions humides et surfaces d'exfiltration sont situés contre ou à proximité des versants.

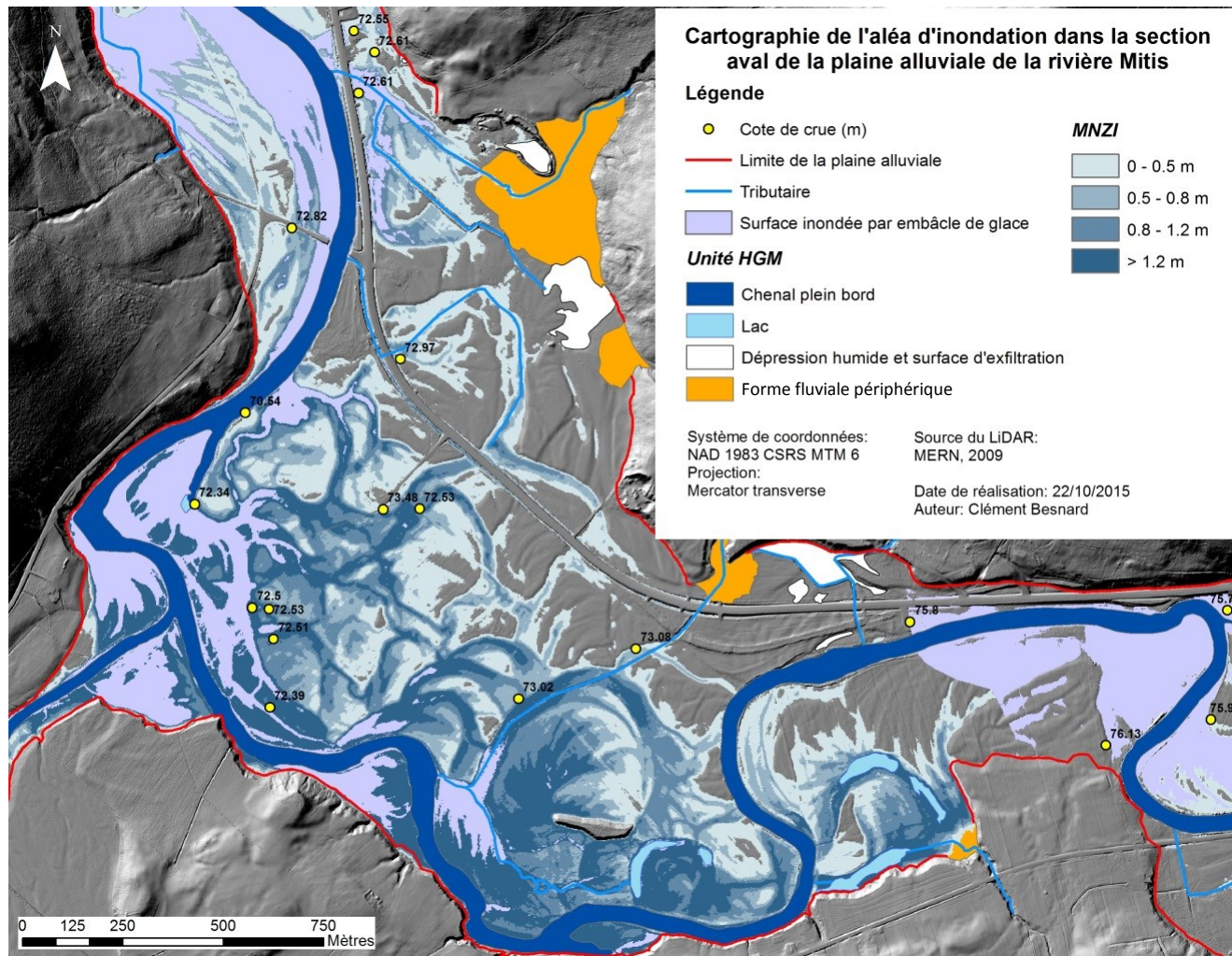


Figure 46 – Cartographie de l'aléa d'inondation dans la section aval de la plaine alluviale de la rivière Mitis. Classification du MNZI choisie en fonction du seuil de stabilité d'un individu en position debout dans une hauteur d'eau donnée : 0,5 m - la stabilité d'un enfant est compromise; 0,8 m - la stabilité d'un adulte (moyen) est compromise; 1,2 m - la stabilité d'un secouriste est compromise.

Sur les 9,25 km² de plaine alluviale³⁶ compris dans la cartographie aval, 5,67 km² ou 61 % sont recouverts par le MNZI qui illustre l'étendue de la crue du printemps 2011 (f = 15 ans). La superficie totale inondée par les embâcles de glace est de 2,18 km², soit 24 % de la plaine alluviale. Cette superficie totalise cinq embâcles de glace dont les superficies varient entre 0,09 km² et 0,81 km². Les inondations par embâcle de glace augmentent de 0,15 km² ou 2 % l'étendue inondable de la plaine alluviale. Cela fait donc 63 % de la plaine alluviale dont l'inondabilité a déjà pu être constatée.

Sur les 186 bâtiments dénombrés dans les limites de la plaine alluviale, 38 sont vulnérables aux crues de récurrence 15 ans et 11 sont vulnérables au refoulement des eaux générés par les embâcles de glace. Les embâcles de glace affectent six bâtiments en plus de ceux qui sont déjà touchés par les crues de récurrence 15 ans. Enfin, cinq bâtiments sont touchés par ces deux types d'inondations.

3.4.2.2 Optimisation de l'analyse morphologique pour la cartographie HGM de la portion amont

La cartographie amont illustre l'aléa d'inondation par l'intermédiaire d'une terminologie centrée sur la fréquence. Cette fréquence est illustrée par des polygones qui sont en fait des unités HGM qui ont été délimitées par photo-interprétation et sur le terrain à l'aide d'un GPS à l'intérieur des limites de la plaine alluviale (cf. section 3.3.2.3). Il est important de noter que, parce que la délimitation des unités HGM s'est avant tout basée sur le repérage des ruptures de pente plutôt que sur l'interprétation des modelés ou faciès de la plaine alluviale, leur caractérisation et ainsi leur classification fréquentielle devenaient une alternative à privilégier au niveau de la représentation cartographique. Plusieurs critères décisionnels (Tableau 15) ont aiguillé la caractérisation fréquentielle des différentes unités HGM.

³⁶ La superficie de la plaine alluviale de la cartographie aval ne comptabilise pas la superficie des formes fluviales périphériques (0,58 km²).

Sur les sept classes proposées dans le Tableau 15, trois identifient des surfaces avec une fréquence d'inondation élevée (classe 1, 2 et 3), une suggère une fréquence d'inondation relativement faible (classe 4), deux autres illustrent des fréquences d'inondation incertaine et non déterminée (classe 5 et 6) et une informe sur le caractère non inondable des surfaces (classe 7).

Tableau 15 – Clef décisionnelle des classes de fréquence d'inondation.

Critères décisionnels		Classe de fréquence d'inondation	Numéro de la classe
Unité HGM	Autre information		
Chenal plein bord	chenal en eau sur l'ensemble des séries de photographies aériennes	annuelle	1
Dépression humide et surface d'exfiltration	surfaces inondées sur les images satellites Google Earth du 5 mai 2014	printanière ou $Q_{(0-1)}$	2
Milieu humide riverain, chenal de débordement et autres formes d'érosion	laisses de crue (2014) et superposition des images satellites Google Earth 2014 avec le tracé des unités HGM	élevée ou située dans un intervalle de temps situé entre 0 et 2 ans	3
Autre surface alluviale	témoignages, faible indice B.-W., îlots inclus dans une zone 0-2 ans et faible surélévation par rapport à la zone 0-2 ans.	occasionnelle ou supérieure à 2 ans	4
	inondabilité de la surface non démontrée, mais dont le contexte suggère un caractère inondable incertain	incertaine*	5
Forme fluviale périphérique	forme fluviale dont l'inondabilité ne dépend pas du régime hydrologique de la rivière Mitis	non déterminée	6
Surface stable	indice B.-W. élevé et présence d'un horizon cendré	non inondable jusqu'à preuve du contraire	7

*Cette classe de fréquence d'inondation ne tend pas vers une récurrence spécifique. Autrement dit, si l'inondabilité des unités HGM qui y sont associées venait à être prouvée, il se pourrait autant que la récurrence soit élevée que faible.

Hormis le chenal plein bord qui est souvent associé à une période de retour de 0-2 ans et les formes d'érosion aux limites franches qui sont intuitivement associées à une haute fréquence d'inondation, les formes fluviales ou les indices de crue morphologiques peuvent difficilement renseigner sur la fréquence ou la magnitude de l'aléa sans l'appui d'une analyse hydraulique ou historique. Selon Levish (2002), les formes remaniées sont générées par des événements de crue récents contrairement aux formes dont les irrégularités ont été estompées par la météorisation (Levish, 2002). Aussi, l'étude de Demers et ses collaborateurs (2014) a révélé que les formes de sédimentation de la rivière Matane avaient une récurrence d'inondation variable (entre 0 et 100 ans). Par conséquent, le faciès des formes de sédimentation ne permet pas de caractériser la fréquence d'inondation avec une grande précision temporelle.

La fréquence d'inondation du chenal en condition de débit plein bord a été estimée à partir de l'interprétation des photographies aériennes de 1963, 1973, et 1980, des orthophotographies de 2001, de la mosaïque d'images hautes résolutions de 2004 et des images satellites de 2014. C'est l'intégralité de la section transversale du chenal qui est en eau sur l'ensemble de ces images, et ce, à des périodes de l'année différentes. Les seuls lambeaux de lit mineur émergés correspondent à quelques rares bancs d'accumulation périphérique au chenal. Ainsi, la récurrence d'inondation du chenal plein bord se traduit par une récurrence annuelle.

L'analyse fréquentielle a permis d'attribuer aux surfaces inondées visibles sur les images satellites Google Earth du 5 mai 2014, un débit de récurrence inférieure à 2 ans. Aussi, les surfaces inondées constatées sur le terrain lors du pic de crue printanier du 11 mai 2014 ont pu être associées à une récurrence proche de 2 ans. Les surfaces inondées à ces deux dates correspondent notamment à des milieux humides riverains occupant d'anciens bras connectés au chenal en permanence ou par intermittence et à des chenaux de débordement (formes d'érosion). C'est pourquoi ces formes furent associées à un débit de récurrence de 0-2 ans et que les unités HGM dont les limites incluaient une ou plusieurs d'entre elles furent systématiquement assujetties à cette période de retour (Figure 47). Les

dépressions humides et les surfaces d'exfiltration visibles sur les images satellites du 5 mai 2014 sont associées à une récurrence printanière ou à un débit équivalent à une récurrence annuelle ($\sim 150 \text{ m}^3/\text{s}$), car elles correspondent entre autres à des surfaces où s'accumule l'eau de fonte de neige et à des surfaces pouvant être inondées par l'exfiltration de la nappe causée par la hausse du débit de la rivière Mitis ($188 \text{ m}^3/\text{s}$).



Figure 47 - Détermination de la fréquence de crue des unités HGM contenant des milieux humides (délimitées par des lignes blanches : A) et des chenaux de débordement (photo oblique) à partir des surfaces inondées des images satellites du 5 mai 2014 (B). L'unité HGM représentée en orange (A) est associée à une fréquence d'inondation 0-2 ans.

Comme vu précédemment (cf. section 3.4.1), l'analyse pédologique a permis d'identifier des surfaces stables. La stabilité géomorphologique de celles-ci les classe d'office dans la classe de fréquence d'inondation *non inondable* ou du moins jusqu'à preuve du contraire. Un indice B.-W. élevé (> 10) et la présence d'un horizon cendré (podzol) dans le sol permirent de les identifier.

L'inondabilité de la majorité des autres formes alluviales a pu être confirmée par un faible indice B.-W. (< 10) du sol ainsi que par des témoignages. Étant donné que ces indices ne peuvent pas précisément renseigner sur la fréquence d'inondation, ces autres formes alluviales sont affectées à une fréquence d'inondation extrêmement variable ou imprécise, soit occasionnelle ou supérieure à 2 ans. Aussi, les surfaces peu surélevées par rapport aux surfaces inondables adjacentes ainsi que les îlots de terre émergeant des zones 0-2 ans furent inclus dans cette classe.

Pour les autres formes alluviales dont le caractère inondable ne put être confirmé, mais dont le contexte suggère tout de même un degré d'inondabilité potentiel ou ambigu³⁷, la fréquence d'inondation fut considérée incertaine. Cette classe inclut des surfaces au contexte multivarié :

- enclavement engendré par des unités HGM dont la fréquence d'inondation est spécifiée ou non déterminée;
- proximité altitudinale avec une zone inondable;
- non inondabilité géomorphologiquement non explicite (ex. : surface en pente graduelle comparable à une plaine en construction);
- inondabilité imposée par la rive opposée (prémisse d'asymétrie de l'inondabilité d'une plaine alluviale) ou suggérée par la contrainte d'une rive opposée haute;
- obstruction du niveau de base et du faciès fluvial et/ou de la jonction entre deux unités HGM provoquée par un remblai ou une infrastructure;

³⁷ Fait référence à la classe de récurrence.

- héritage de formes fluviales (plaine diachronique ou avec ancien niveau fluvial plus ou moins influencé par la dynamique fluviale actuelle).

Les formes fluviales périphériques sont toutes les unités HGM qui ne découlent pas de la dynamique fluviale de la rivière Mitis et dont la fréquence d'inondation n'a pas été déterminée. Étant donné que leur régime hydrologique est intrinsèque aux conditions locales, une investigation spécifique et indépendante à chacune d'entre elles serait nécessaire pour déterminer leur fréquence d'inondation.

L'approche HGM est une approche naturaliste qui cherche à représenter la plaine alluviale sous son aspect le plus naturel, c'est-à-dire, sans représenter les infrastructures humaines et les modifications que celles-ci pourraient apporter au contexte hydrogéomorphologique. C'est pourquoi les remblais, qui surélèvent localement la plaine alluviale, sont directement inclus dans les classes de fréquence qui leur sont moyennes.

La Figure 48 présente un aperçu de la cartographie amont de la plaine alluviale de la rivière Mitis. Hormis la classe de fréquence d'inondation *annuelle*, qui est d'ailleurs la seule à être continue de l'amont vers l'aval, les autres classes ont en commun une répartition spatiale parsemée. Les classes *printanière ou 0-1 an* et *non déterminée* sont parsemées en périphérie de la plaine alluviale alors que la classe *> 2 ans* est parsemée et souvent accolée contre la classe *0-2 ans* lorsqu'elle n'est pas directement incluse sous forme d'îlot à l'intérieur de celle-ci. La classe *0-2 ans*, qui est contiguë à la classe *annuelle*, est spatialement continue dans la moitié amont de la cartographie. La classe *incertaine* est aléatoirement localisée sur le profil transversal de la plaine alluviale et est tout comme les classes *non déterminée* et *printanière ou 0-1 an* peu fréquente et longitudinalement discontinue. Enfin, la classe *non inondable* est régulièrement représentée en périphérie de la plaine alluviale et surtout continue dans la moitié aval de la cartographie.

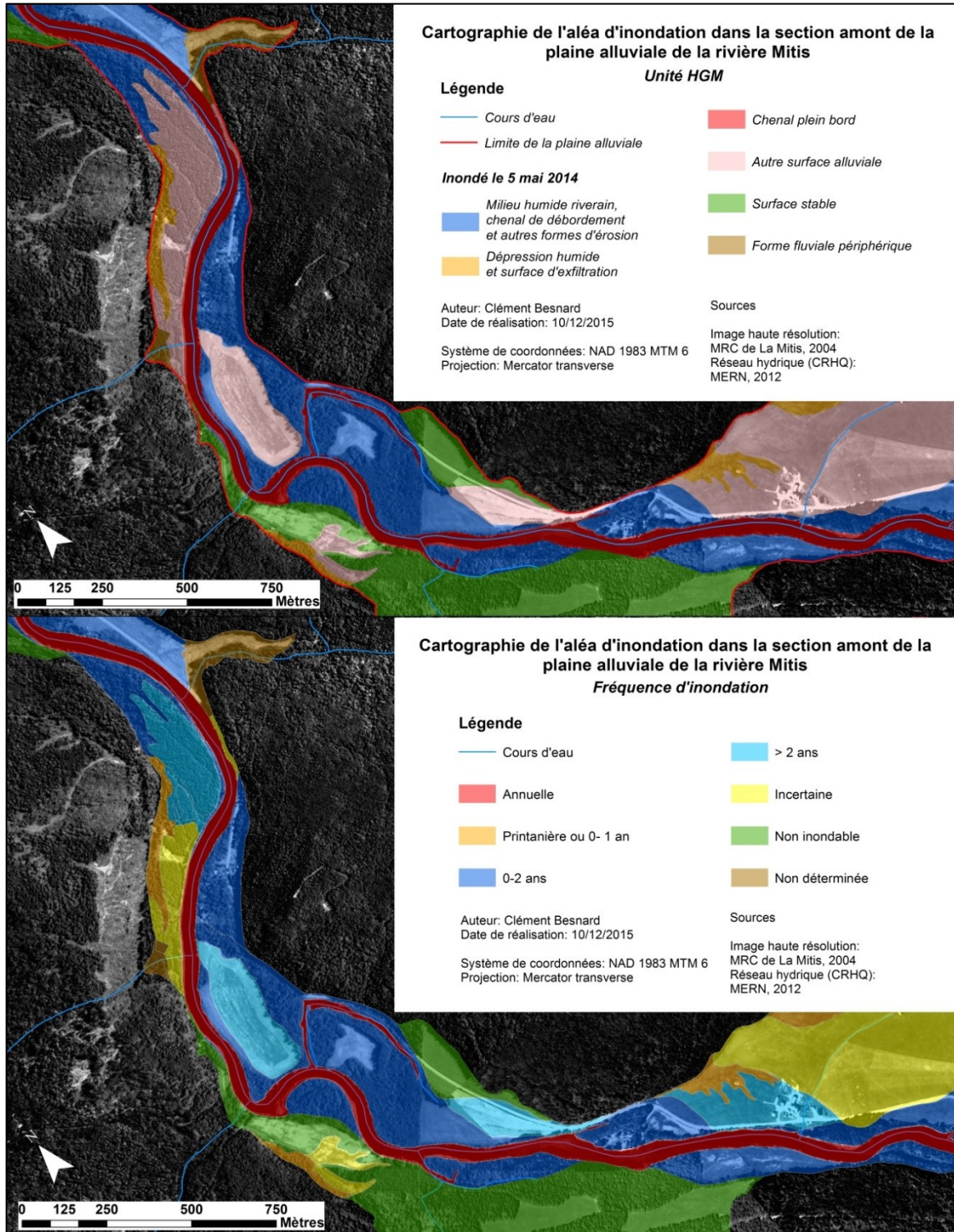


Figure 48. Cartographie de l'aléa d'inondation dans la section amont de la plaine alluviale de la rivière Mitis.

La plaine alluviale est occupée par 28 % de surfaces non inondables et 72 % de surfaces inondables (54 %) ou dont l'inondabilité n'est pas vérifiée (12 %) ou indéterminée (6 %). Cela revient à dire que près de trois quarts de la plaine alluviale sont susceptibles d'être inondés à un moment ou un autre. Les unités HGM dont la fréquence d'inondation est printanière ou de 0-1 an occupent la plus petite superficie de la plaine alluviale (3 %), suivis par les unités HGM dont la récurrence est indéterminée (6%) et supérieure à 2 ans (8 %). Ensuite, toujours dans un ordre croissant, ce sont les unités HGM dont l'inondabilité est incertaine (12%), les unités HGM dont l'inondabilité est annuelle (16 %), les unités HGM dont la récurrence d'inondation est comprise entre 0 et 2 ans (27 %) et bien sûr les unités HGM dont l'inondabilité est nulle (28 %). Malgré sa petite superficie de plaine alluviale à l'étude, le ruisseau Bernier détient 67 % des unités HGM dont l'inondabilité est incertaine.

La portion amont de la plaine alluviale comptabilise 51 bâtiments dont 37 % à l'intérieur d'unité HGM dont l'inondabilité est nulle et 35 % à l'intérieur d'unité HGM dont la récurrence d'inondation est de 0-2 ans.

Tableau 16 – Superficie occupée par chacune des unités HGM à l’intérieur des limites de la plaine alluviale et nombre de bâtiments associé à chacune d’entre elles.

Unité HGM	Fréquence d’inondation	Superficie occupée sur la plaine alluviale		Bâtiments Situés à l’intérieur de chaque classe de fréquence	
		km ²	%	nombre	%
Chenal plein bord	Annuelle	0,73	16	0	0
Dépression humide et surface d’exfiltration	Printanière ou 0-1 an	0,13	3	0	0
Milieu humide riverain, chenal de débordement et autres formes d’érosion	0-2 ans	1,23	27	18	35
Autres surfaces alluviales	>2 ans	0,34	8	8	16
	Incertaine	0,55	12	3	6
Surface stable	Non inondable	1,28	28	19	37
Forme fluviale périphérique	Non déterminée	0,27	6	3	6
Plaine alluviale*	Variable	4,52	100	51	100

* inclut les formes fluviales périphériques.

3.4.3 Comparaison avec les cartographies en vigueur à la MRC

3.4.3.3 Comparaison avec la cartographie HHS

La Figure 49 propose une comparaison des zones inondables 0-20 ans et 20-100 ans de la cartographie HHS de Sainte-Angèle-de-Mérici avec la zone inondable 0-15 ans du MNZI pour le même secteur. Cette figure permet de faire deux grands types de comparaison. D’abord, il est possible de comparer des aires totales des différentes zones de fréquence de crue. Aucune anomalie n’est à signaler du côté des superficies. En effet, plus la fréquence d’inondation diminue, plus l’étendue inondable croît (Tableau 16).

Ensuite, on peut s’intéresser à une comparaison des zones qui sont plus spécifiquement inondées et, plus particulièrement, aux zones d’inondation communes. Une différence de superficie est observée entre les superficies communes des zones inondables

HHS avec l'aire totale de la zone inondable du MNZI et l'aire totale de la zone inondable du MNZI. En théorie, les superficies communes des zones inondables HHS avec l'aire totale de la zone inondable du MNZI devraient être parfaitement égales à l'aire totale de la zone inondable du MNZI. Aussi, les superficies communes entre les zones inondables HHS avec l'aire totale de la zone inondable du MNZI varient entre les zones 0-20 ans et 20-100 ans alors qu'en théorie elles devraient être les mêmes (Tableau 17, voir nombres soulignés). Cela s'explique par le fait que le MNZI identifie 42 % de zones inondables en plus que le modèle HHS pour la récurrence 0-20 ans et 30 % de zones inondables de plus que le modèle HHS pour la récurrence 0-100 ans (Tableau 17, voir nombres en italique).

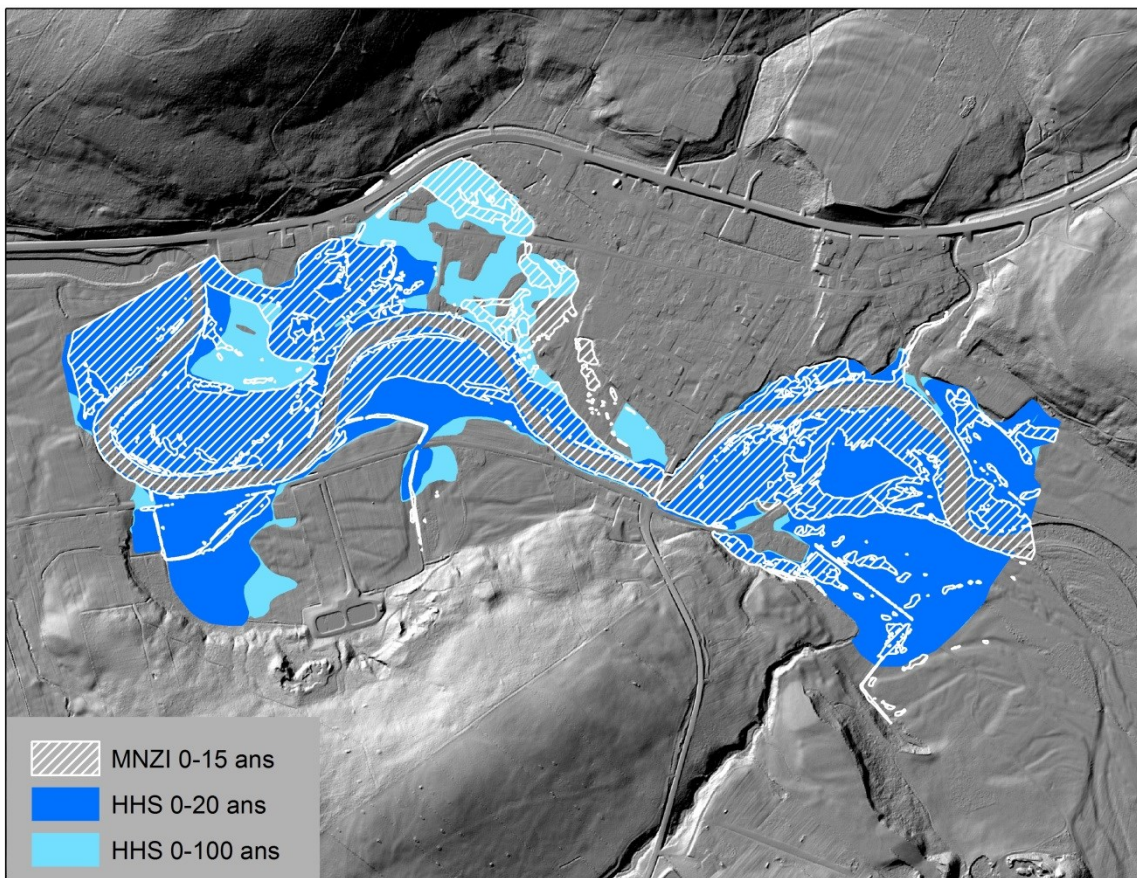


Figure 49 – Comparaison de la zone inondable 0-15 ans du MNZI aux zones inondables 0-20 ans et 20-100 ans de la cartographie HHS du secteur proximal au périmètre urbain de Sainte-Angèle-de-Mérici.

Tableau 17 – Récapitulatif des superficies comparées des zones inondables HHS avec la zone inondable du MNZI. Les nombres soulignés et en italique identifient des anomalies.

Méthode	Zone inondable	Aire totale	Superficie en commun avec le MNZI	Superficie supplémentaire MNZI / HHS		Superficie supplémentaire HHS / MNZI	
		km ²	km ²	km ²	%	km ²	%
MNZI	0-15 ans	0,61	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
HHS	0-20 ans	0,79	<u>0,43</u>	<i>0,18</i>	<i>42</i>	0,36	84
	0-100 ans	0,97	<u>0,47</u>	<i>0,14</i>	<i>30</i>	0,50	106

Les surfaces supplémentaires identifiées par le MNZI correspondent à deux types de reliefs négatifs, soit à des reliefs dont l'altitude est inférieure au niveau d'eau simulé. On retrouve ainsi les reliefs négatifs topographiquement connectés à des zones inondées par débordement et les reliefs négatifs topographiquement déconnectés des zones inondées par débordement et généralement situées à une certaine distance du chenal où peuvent survenir des inondations par rehaussement de la nappe phréatique (Figure 50). Les simplifications de l'interpolation et de l'extrapolation spatiale de la méthode HHS omettent ainsi des superficies qui sont assurément inondables par des crues de récurrence au moins égales à celle du MNZI (Figure 50). Étant donné sa plus grande récurrence (0-15 ans), la zone inondable identifiée par le MNZI devrait en théorie figurer en totalité à l'intérieur des limites des zones inondables HHS dont la récurrence est inférieure (0-20 et 20-100 ans). Les différences cartographiques constatées ne sont probablement pas dues au nombre de section transversale utilisée lors de la modélisation (trois par kilomètre linéaire de chenal), mais plutôt à cause de la faible résolution spatiale du MNE utilisée lors de la modélisation HHS (cf. section 1.3.4) et par le choix du paramétrage qui a servi à modéliser les zones inondables HHS. Il importe cependant de souligner que même avec un MNE avec une résolution spatiale élevée en intrant de la modélisation, les dépressions liées aux inondations par exfiltration ne feraient pas partie des zones inondées, car ce type d'inondation n'est généralement pas considéré. Ces zones représentent 0,02 km² (16 700

m²), comptent pour 3 % de la superficie du MNZI et 37 % se retrouvent à l'extérieur du 0-20 ans.

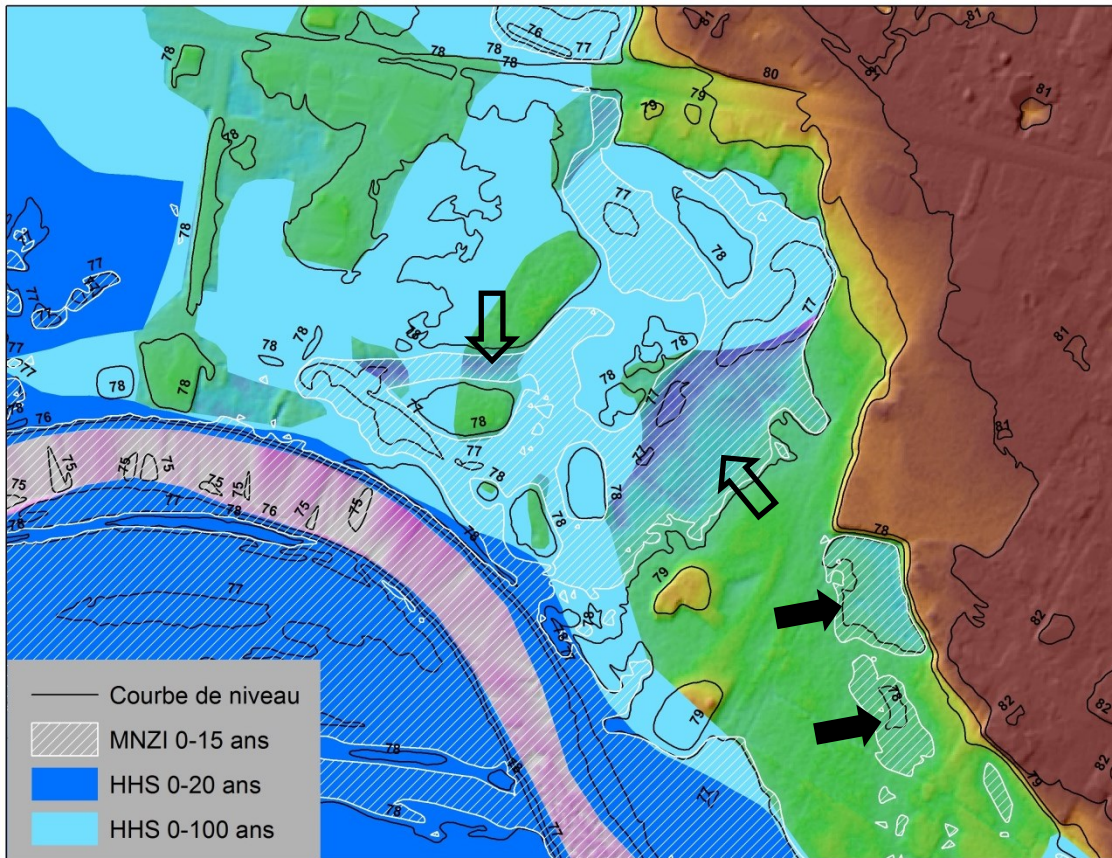


Figure 50 – Exemples d’anomalies identifiées dans la cartographie HHS et de différences cartographiques constatées entre les cartographies HGM et HHS. Flèches vides : reliefs négatifs topographiquement connectés à des zones inondées par débordement; Flèches pleines : reliefs négatifs topographiquement déconnectés des zones inondées par débordement.

3.4.3.4 Comparaison avec la cartographie historique (pinceau large)

En comparant la zone inondable de la cartographie historique de la MRC réalisée avec la méthode du « pinceau large » aux zones inondables de la cartographie HGM, il est évident que la cartographie HGM se révèle beaucoup plus conservatrice des surfaces inondables de la plaine alluviale que la cartographie historique (Figure 51). En effet, la cartographie historique identifie seulement 0,20 km² ou 4 % de zones inondables à l'intérieur de la plaine alluviale du secteur amont, alors que la cartographie HGM identifie

3,24 km² ou 72 % de zones inondables ou potentiellement inondables dans ce même secteur. Dans le secteur aval, c'est 23 % de la plaine alluviale qui est désignée inondable par la cartographie historique, alors que la cartographie HGM en identifie 63 %. La cartographie historique identifie des surfaces hautes perchées comme étant inondable alors qu'elles sont incontestablement trop élevées pour être inondées (Figure 51). Ce simple constat remet en doute la totalité du tracé de la cartographie historique. De plus, la zone inondable qui est tracée sur une carte topographique à l'échelle 1 : 20 000 semble parfaitement incohérente avec la position et l'orientation des courbes de niveau de celle-ci (Figure 52).

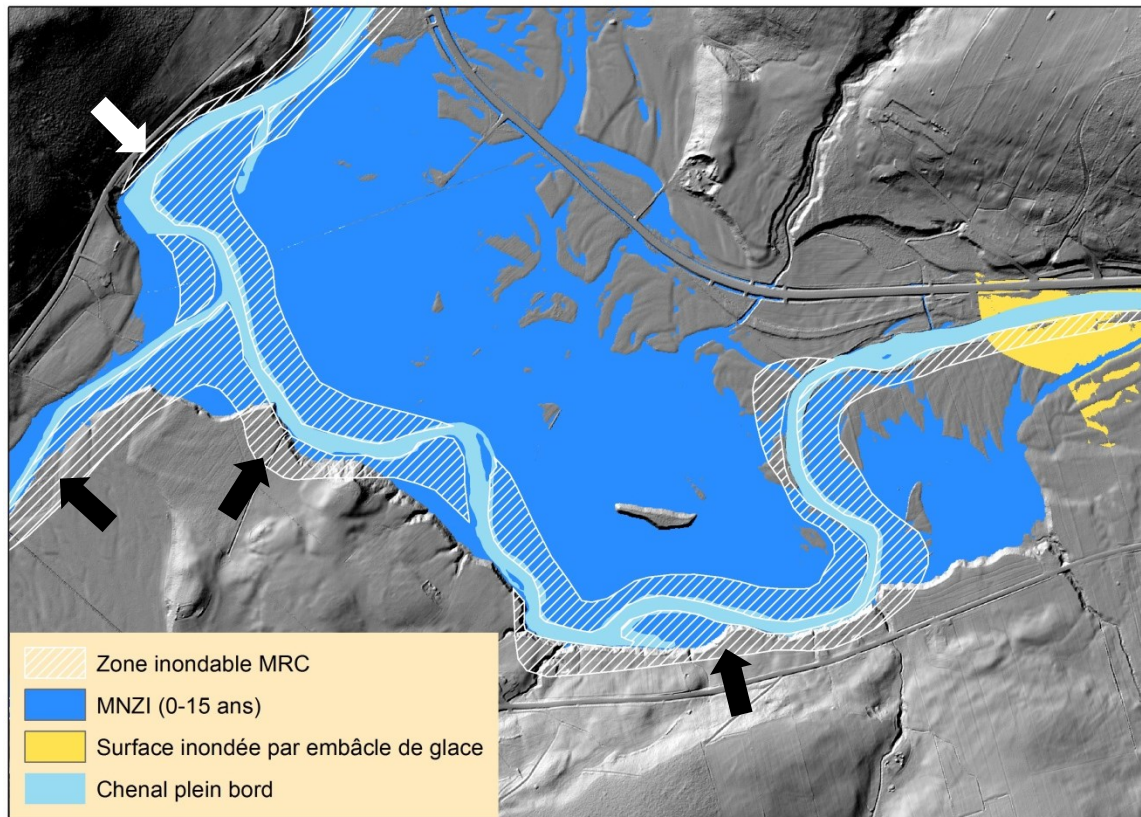


Figure 51 – Comparaison des zones inondables de la cartographie HGM à la zone inondable de la cartographie historique de la MRC de La Mitis réalisée avec la méthode du « pinceau large » dans un secteur représentatif. Les flèches indiquent des surfaces inondables qui ne devraient pas l'être en raison de leur élévation importante.

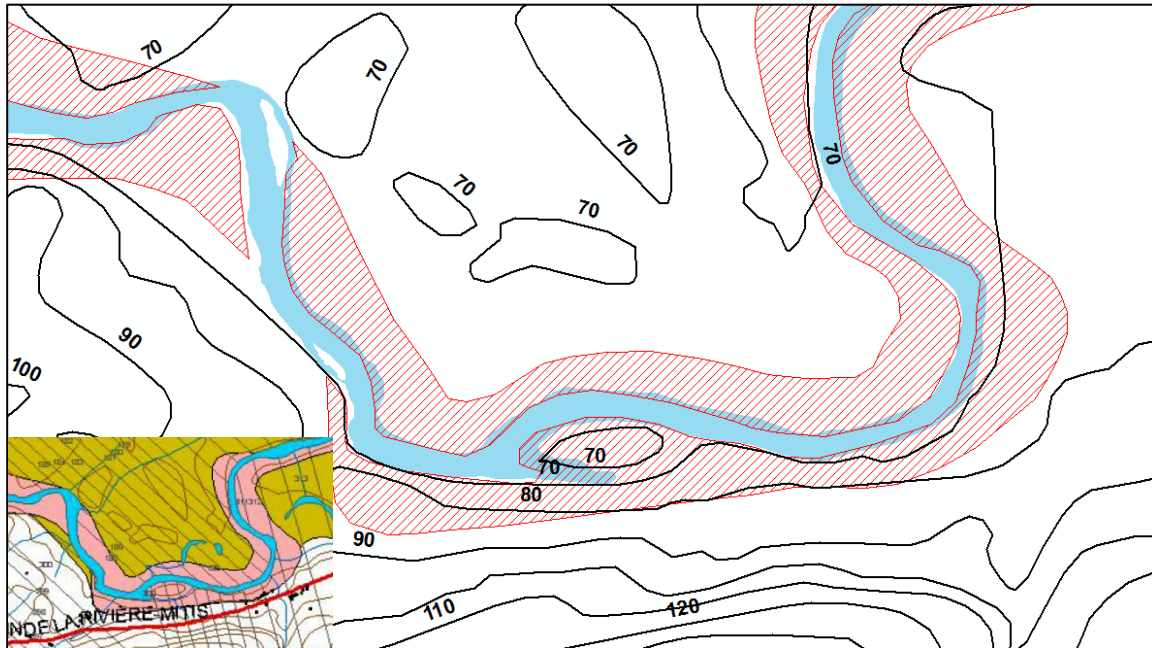


Figure 52 – Illustration des incohérences topographiques du tracé de la cartographie historique des zones inondables de la MRC de La Mitis réalisée avec la méthode du « pinceau large ».

3.5 DISCUSSION

3.5.1 Sources d'incertitude

Quelques erreurs sont remarquées dans les surfaces inondées simulées pour le segment C au niveau du secteur du lac Ouellet (Figure 53). Si l'on en croit les informations obtenues auprès des riverains, le MNZI semble surestimer l'étendue de l'inondation de la crue de 2011 alors que la surface inondée par embâcle de glace semble sous-estimer l'étendue de l'inondation créée par l'embâcle de glace de 1994. Selon les dires d'un riverain, contrairement à ce qui est visible sur la Figure 53 (voir cercle rouge), environ 15 pouces d'eau ainsi que des blocs de glace se seraient retrouvés sur la route au moment de l'embâcle de glace de 1994. Les divergences observées entre les conditions réelles

constatées par les riverains et les résultats cartographiques obtenus par modélisation peuvent s'expliquer de trois façons : la densité et la répartition des repères historiques, la complexité des processus d'inondation par embâcles et les sources d'information des repères historiques.

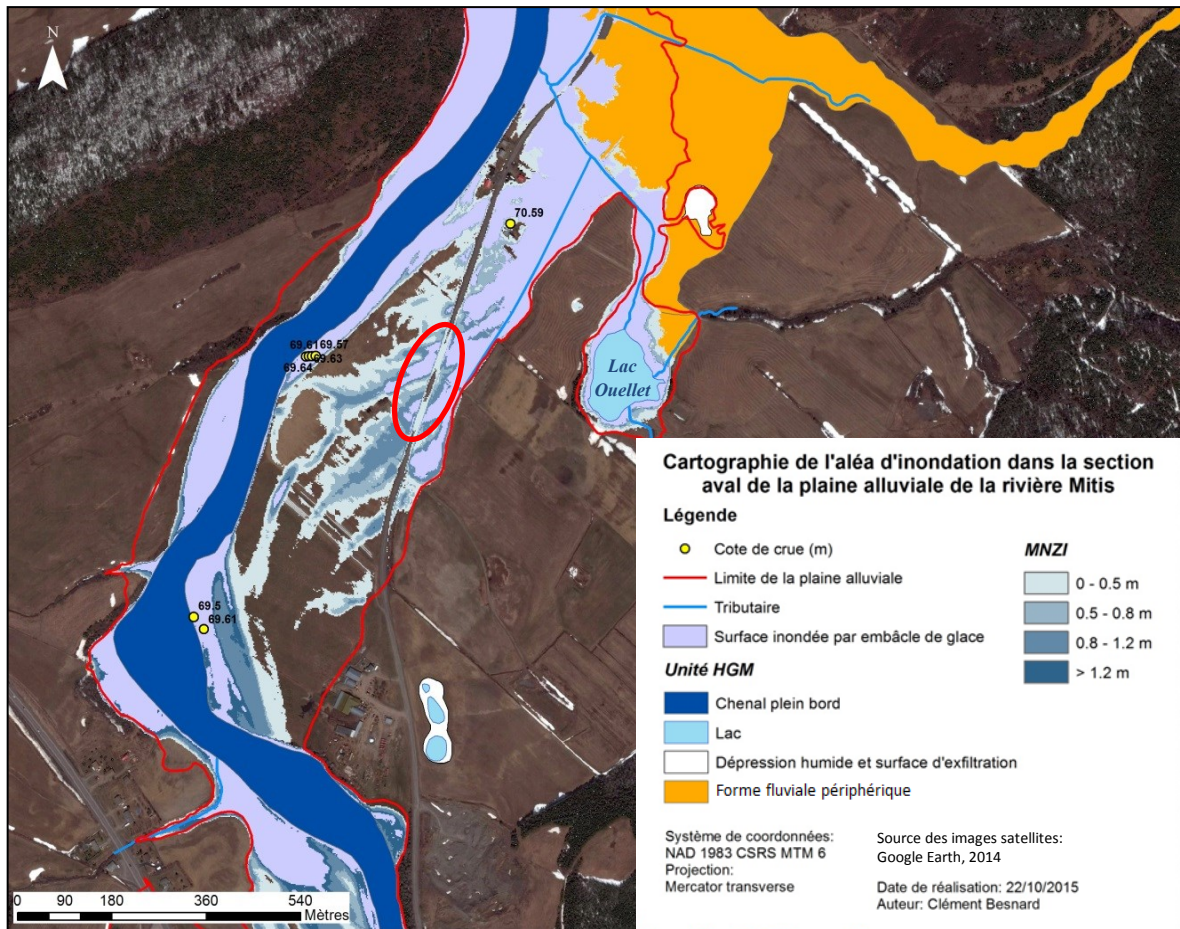


Figure 53 – Cartographie aval du secteur du lac Ouellet. Cercle rouge : sous-estimation de l'étendue de l'inondation par embâcle de glace de 1994.

Tout d'abord, selon les profils en long de zones inondables (Figure 54), le niveau d'eau de la crue du printemps 2011 dans le secteur du lac Ouellet devrait approximativement correspondre à celui de l'embâcle de glace de 1994 (voir cercle rouge, Figure 54). Ce constat étant bien sûr à nuancer étant donné qu'il est fondé sur la position d'une ligne d'eau dont l'altitude est influencée par le degré de la pente qui s'ajuste avec le

nombre et la répartition des repères historiques sur le tronçon. Autrement dit, plus la densité de repères historiques par kilomètre linéaire de cours d'eau pour un même événement est élevée, plus la probabilité que la hauteur de la ligne d'eau se rapproche de la réalité terrain est grande. L'incongruité observée sur le MNZI dans le secteur du lac Ouellet peut très bien s'expliquer par la faible densité de repère historique et la mauvaise répartition de ceux-ci par rapport au point d'inflexion de la pente. En effet, l'interpolation de la hauteur de la surface de l'eau pour le secteur du lac Ouellet repose sur deux repères historiques distants de 6,5 km qui délimitent un tronçon avec plusieurs points d'inflexion de la pente dont certains sont proches de 20° (voir lignes en pointillés rouges, Figure 54), ce qui remet légitimement en question l'étendue du MNZI pour ce secteur. Aussi, avec plus d'expérience, peut-être aurait-on pu paramétrée de manière adéquate l'outil *Topo to Raster* pour que celui-ci génère une interpolation qui tient compte de la prémisse qui associe les fluctuations de la hauteur de la ligne d'eau de l'écoulement à l'inclinaison de la pente d'un cours d'eau.

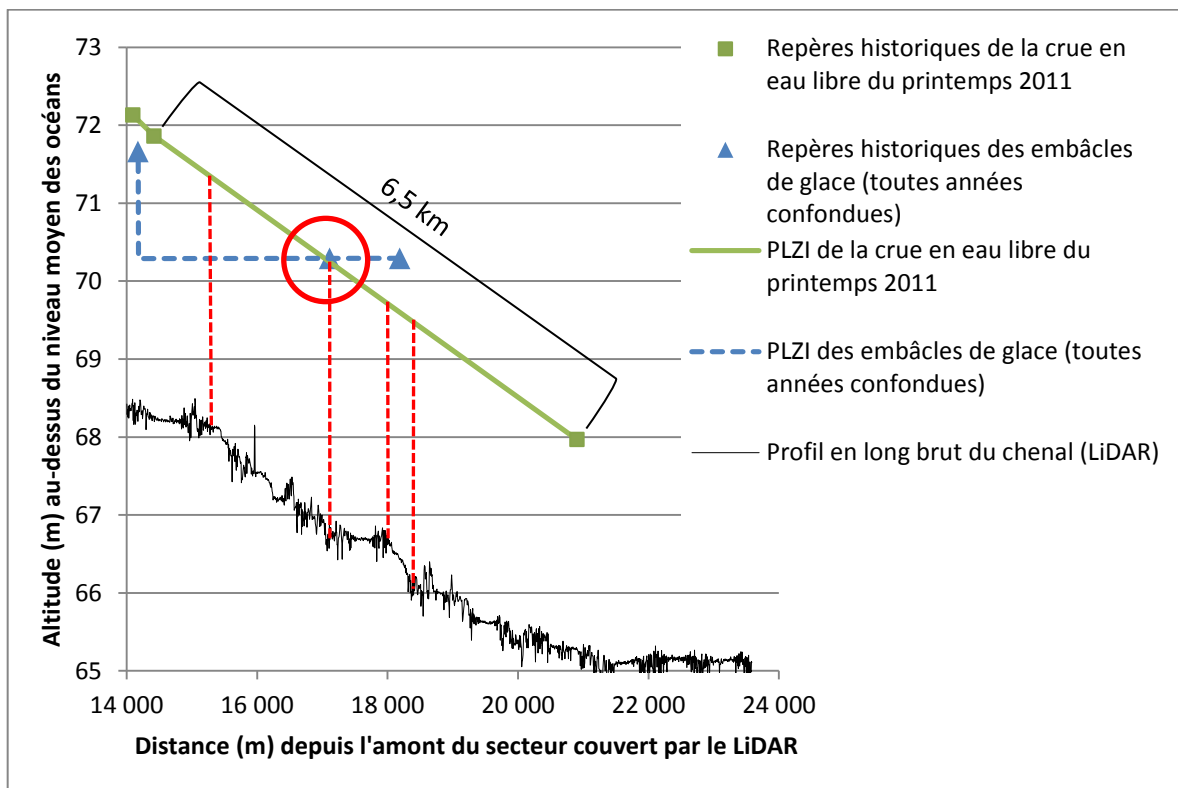


Figure 54 – Extrait de profils en long de zones inondables (PLZI) identifiant les incongruités constatées sur la cartographie des zones inondables dans le secteur du lac à Ouellet. Cercle rouge : altitude du PLZI de la crue de 2011 approximative à celle de l’embâcle de glace de 1994. Lignes en pointillés rouges : point d’inflexion dans la pente du lit.

D’autre part, la complexité des processus d’inondation par embâcle de glace peut expliquer la sous-estimation de l’étendue de l’inondation causée par l’embâcle de glace de 1994. En effet, la forte contrainte exercée par la poussée de la glace en provenance de l’amont conjuguée à des facteurs aggravants capables de dévier localement la direction de l’écoulement (ex. : rugosité du lit, rétrécissement du chenal, sinuosité élevée) sont plusieurs paramètres qui n’ont pas été pris en compte lors de la simulation. Il est faux de penser qu’un embâcle de glace se comporte de façon homogène sur toute sa longueur.

Finalement, certains secteurs du MNZI, qui ont été construits à partir de repères historiques correspondant à des limites de surfaces inondées extraits des photographies de la MRC lors de la matinée du 5 mai 2011, sous-estiment la portée réelle de la crue de 2011.

En effet, d'après un témoignage, le niveau de l'eau aurait été constaté environ dix pouces plus hauts la veille vers 19 heures sur le terrain d'une résidence située sur le chemin privé qui longe en partie le ruisseau Paquet. Des laisses de crues retrouvées sur place confirment cette information (Bergeron et Charest, 2011). Faute de repères historiques ayant marqué le pic de la crue de 2011, les repères historiques des photographies de la MRC furent comptabilisés, car ils témoignent des plus hauts niveaux d'eau constatés dans ces secteurs de la rivière Mitis.

Dans autre ordre d'idée, le niveau d'eau du segment D qui contient le réservoir de la centrale Mitis-1 a été modélisé à partir d'un seul repère historique, soit à partir d'un seul transect de points d'élévation projeté ou extrapolé vers l'aval, ce qui a engendré une inclinaison dans le plan d'eau du réservoir (20 cm de dénivelé entre le repère historique et le mur du barrage, voir Figure 55). Or, pour éviter ce biais, il aurait fallu procéder de la même façon que pour modéliser une surface inondée par un embâcle de glace, soit en interpolant une hauteur d'eau entre deux transects de points d'élévation ayant la même altitude. Ainsi, l'inclinaison du plan d'eau modélisé pour le réservoir aurait été parfaitement égale à zéro degré. L'altitude du repère historique qui est situé le plus proche de l'extrémité amont du réservoir devra être projeté vers l'aval (à l'inverse de la procédure utilisée pour les embâcles) en l'incluant dans un transect de points d'élévation qui aura été préalablement créé sur l'extrémité aval du réservoir, soit contre le mur du barrage (Figure 55).

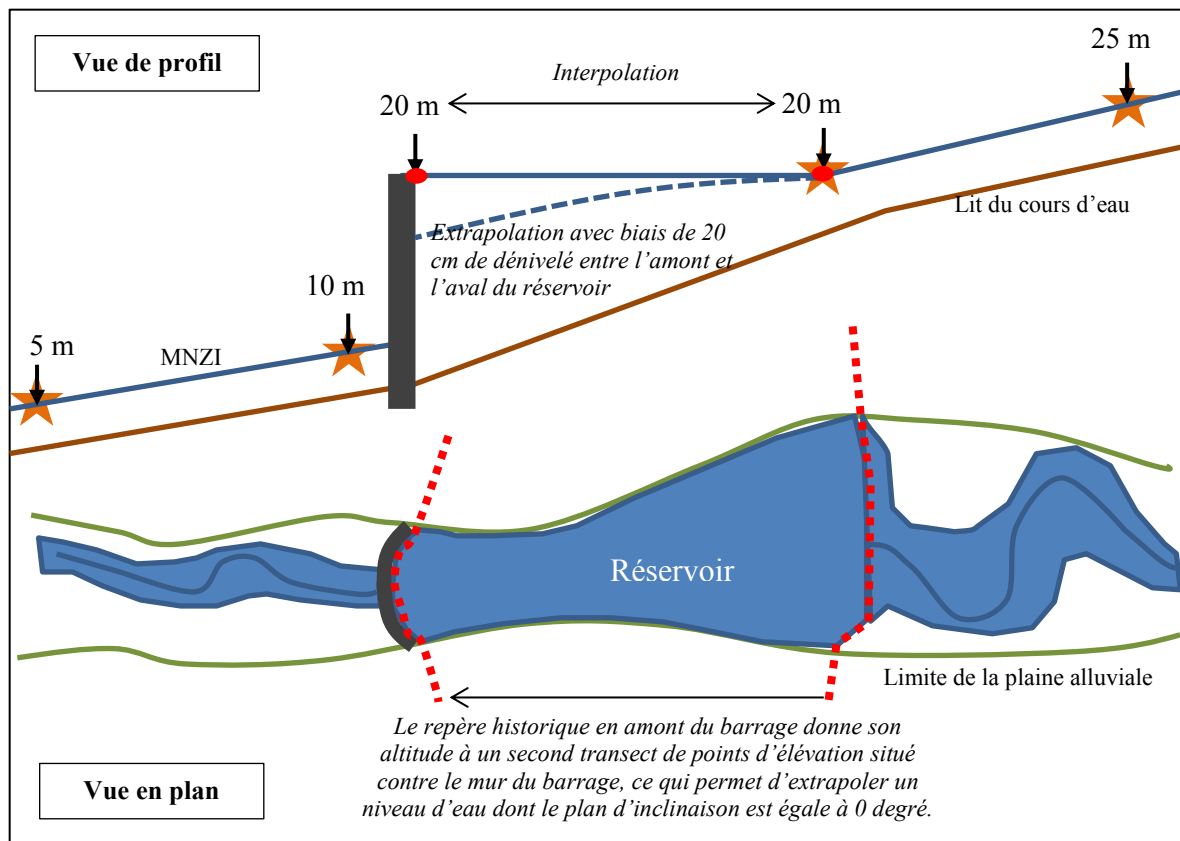


Figure 55 – Illustration de la procédure recommandée pour modéliser le niveau d'eau d'un réservoir de barrage. Étoile : repère historique. Point rouge et ligne pointillée rouge : transect de points d'élévation.

3.5.2 Recommandations pour la gestion de l'aménagement

3.5.2.1 Cartographie aval

Une cartographie des hauteurs d'eau peut être très utile dans le cadre de l'élaboration d'un plan de mesures d'urgence ainsi que pour planifier l'évacuation par embarcation. Celle-ci peut également aider à définir les zones de grand et de faible courant de la PPRLPI. D'une part, parce que le MNZI est généré à partir de la crue de 2011 qui est associée à une récurrence de près de 20 ans (~ 15 ans), il peut mener à la définition de la zone de grand courant. D'autre part, une stratégie peut être envisagée pour rencontrer

également les exigences pour la cartographie d'une zone de faible courant qui est déterminée à partir de la cote de crue de récurrence 100 ans et sur laquelle la hauteur d'immunsation des bâtiments est établie. Étant donné que le MNZI a été réalisé à partir d'une crue dont la récurrence du débit est inférieure à 100 ans, il pourra être ajouté une cote sécuritaire d'au moins 30 cm pour que les constructions, les ouvrages et les travaux réalisés puissent être conformes aux mesures de mitigation stipulées par la PPRLPI (PPRLPI, D. 468-2005, Ann. 1).

Les surfaces inondées par les embâcles de glace connues devraient être prises en compte lors de l'élaboration du zonage, car elles peuvent dépasser les limites des inondations en eau libre. De plus, des blocs de glace peuvent être poussés à l'extérieur du chenal et causer de sérieux dommage aux infrastructures. Pour ce qui est des unités HGM telles que les cônes alluviaux, les petites vallées affluentes, les dépressions humides et les surfaces d'exfiltration, celles-ci sont reliées à des aléas d'inondation qu'il est également recommandé de prendre en considération dans l'aménagement du territoire. Le Tableau 18 fait l'état des aléas d'inondation associés à chacune d'entre elles. Le type de processus, la fréquence, la puissance et la durée de l'aléa d'inondation permettent de proposer un niveau de contraintes à l'aménagement.

Tableau 18 – Recommandations de gestion de l'aménagement émises en fonction du type d'aléa d'inondation associé aux unités HGM.

Unité HGM	Type d'aléa d'inondation	Processus	Fréquence	Puissance	Durée	Contraintes à l'aménagement	Référence
Cône alluvial	Inondation torrentielle et <i>debris flow</i>	Aggradation et inondation soudaines, avulsion du chenal	Inconnue*	↑	↓	Sévère	Buffin-Bélanger et Héту, 2008; Demers et al., 2014; Demers et al., 2012.
Petite vallée affluente	Inconnu (probablement torrentielle)	Inconnu	Inconnue	↑	↓	Sévère	
Dépression humide	Inondation printanière	Accumulation des eaux de fonte des neiges	Élevée	↓	↑	Sévère	
Surface d'exfiltration	Inondation par exfiltration	Hausse et exfiltration de la nappe phréatique	Élevée	↓	↑	Sévère	Demers et al., 2012

*Dépend de la dynamique géomorphologique du cône (Buffin-Bélanger et Héту, 2008)

↑ élevé; ↓ faible.

Les limites de la plaine alluviale mettent en évidence les surfaces libres des caractérisations évoquées précédemment (MNZI et autres types d'inondation). Ces surfaces dites « libres » sont construites par des dépôts alluviaux qui peuvent avoir été mis en place par le régime hydrologique actuel, récent ou ancien. Étant donné leur lien génétique avec la rivière Mitis, celles-ci sont potentiellement sensibles à l'aléa d'inondation. En revanche, aucune information n'a pu confirmer leur inondabilité actuelle. C'est pourquoi la fréquence d'inondation de ces surfaces alluviales est faible, voire très faible. Par conséquent, si ces surfaces ne sont toujours pas touchées par l'étendue de l'addition d'une cote de 30 cm au MNZI de la crue de 2011 pour matérialiser les limites approximatives d'une crue de récurrence 100 ans, celles-ci devraient être aménagées avec un faible niveau de contraintes à l'aménagement sous la forme de zone d'inondabilité résiduelle telle que définie par Demers et al. (2014).

3.5.2.2 Cartographie amont

Contrairement à la cartographie aval, la cartographie amont ne peut être construite à partir de la modélisation des cotes historiques. C'est pourquoi celle-ci a surtout été construite à partir des références historiques contenues dans les images satellites du 5 mai 2014. Ainsi, une cartographie basée sur la récurrence pouvait être proposée et superposée plus facilement à la nomenclature législative de la PPRLPI.

Si les classes *annuelle*, *printanière* ou *0-1 an* et *0-2 ans* peuvent à coup sûr être incluses dans la zone de grand courant, il n'en va pas de même avec les autres classes. La classe *> 2 ans* identifie les surfaces inondées sur une récurrence supérieure à 2 ans avec un plafond de récurrence qui n'est pas défini. Cette classe couvre donc une très grande variabilité de récurrences qui contient peut-être des superficies inondables par des crues de récurrence qui vont probablement au-delà de 100 ans. De plus, elles contiennent aussi des superficies inondables par des crues de récurrence 2-20 ans. De ce fait, il n'est pas évident de proposer un mode de gestion précis pour l'aménagement de ces surfaces. Pour ce qui est des surfaces appartenant à la classe *incertaine*, le même genre de problème se présente, car il n'a pas été possible de déterminer si ces surfaces étaient plus enclines à être inondées

fréquemment ou moins souvent. Les surfaces de plaine alluviale affectées à la classe *non inondable* sont en fait des surfaces qui n'ont pas été inondées depuis un long moment (> 100 ans). Les sols matures retrouvés à l'intérieur de ces surfaces proscrivent toutes mesures de contraintes à l'aménagement. Toutefois, le caractère non inondable de ces surfaces est à nuancer. En effet, le statut de non-inondabilité n'exclue pas ces surfaces de la structure génétique de la plaine alluviale. Les processus d'ajustement et les changements du régime hydrosédimentaire (inondation due à l'aggradation du lit ou érosion due à la mobilité transversale du chenal) peuvent remettre en question la stabilité géomorphologique millénaire de ces surfaces à tout moment. Enfin, les surfaces avec une classe de fréquence d'inondation non déterminée sont difficiles à rattacher à un mode de gestion particulier. Des études spécifiques supplémentaires sont à prévoir dans le cas où un projet d'aménagement devait être développé sur une forme périphérique fluviale. Cependant, considérant le caractère imprévisible des aléas habituellement liés à ces surfaces, il est fortement recommandé de les inclure dans un zonage sévère.

3.5.2.3 Mentions générales

Il est important de souligner que l'inondabilité de la plaine alluviale ne se restreint pas uniquement à la surface. En effet, dépendamment de la perméabilité des dépôts qui composent le plancher alluvial, l'aléa peut provenir de sous la surface. C'est pourquoi un bâtiment qui est situé à l'extérieur des zones cartographiées comme étant inondables peut se retrouver avec un sous-sol vulnérable aux fluctuations de la nappe phréatique. Dans la plaine alluviale de la rivière Mitis, plusieurs riverains sont concernés par cette problématique, mais rares sont ceux qui ne se sont pas immunisés contre celle-ci depuis la crue de 2011. À ma connaissance, aucune carte de zones inondables n'illustre cet aléa cryptique au Québec. Des déductions ou inférences peuvent être faites à partir d'études portant sur le sujet des eaux souterraines, mais celles-ci sont plus souvent localisées et ponctuelles que largement étendues étant donné le coup que cela implique lors de l'échantillonnage par forage. De plus, on ne peut pas vraiment se fier à l'information contenue par les cartes pédologiques et de dépôts meubles, car celle-ci est plutôt suggestive

que précise. À la lumière de ce constat, quiconque décide d'investir la plaine alluviale doit être conscient de ce risque et prendre la responsabilité de s'en prémunir.

Comme il a déjà été mentionné, une des particularités de la cartographie HGM est de faire abstraction des éléments anthropiques de la plaine alluviale. Par contre, certains d'entre eux, tels que les excavations, incitent à étudier davantage le lien qu'ils peuvent entretenir avec l'aléa d'inondation. En poursuivant avec l'exemple des surfaces récemment ou prochainement excavées à l'intérieur des limites de la plaine alluviale, il est évident que même si leur quantité reste marginale, celles-ci peuvent localement modifier l'étendue des zones inondables. Le type d'inondation engendré à l'intérieur de ces surfaces est ambivalent dans la mesure où il peut être aussi bien associé à des inondations en eau libre qu'à des inondations par exfiltration. Les anciennes carrières ou bancs d'emprunt peuvent occuper des surfaces non négligeables à l'intérieur des plaines alluviales. Étant donné que les plaines alluviales constituent des superficies convoitées, car potentiellement exploitables pour le développement économique, l'usage territorial des sites d'excavation abandonnés est potentiellement reconvertible. C'est pourquoi avant de les restaurer et afin d'éviter les préjudices associés à une reconversion d'usage hâtive, il est important de baliser leur niveau d'inondabilité. Ainsi, les éléments anthropiques influant sur l'étendue de l'aléa d'inondation devraient au moins être délimités ou localisés sur les cartes de zones inondables.

3.5.3 Conclusion

La part active des méthodes géomorphologique, historique et pédologique dans l'approche HGM varie dans l'espace du tronçon cartographié. La disponibilité des données et le contexte anthropogéomorphologique sont les paramètres qui influencent le plus leur application. Chacune de ces méthodes est complémentaire aux autres, ce qui rend donc incontournable leur combinaison pour optimiser au maximum la cartographie des zones inondables. La méthode historique a été prépondérante dans la cartographie aval grâce à la

couverture LiDAR. Le contexte agricole et la plus faible puissance spécifique de la rivière Mitis dans la section aval ne permettaient pas l'applicabilité optimale de la méthode géomorphologique. Bien que la forte anthropisation de la section aval (relatif au contexte local) ne permette pas d'exploiter de façon optimale la méthode géomorphologique, celle-ci apparaît comme un avantage pour la méthode historique, car elle génère un plus grand nombre de repères historiques dans la mémoire collective. À l'inverse, une faible anthropisation du territoire permet à l'environnement fluvial de conserver ses traits naturels qui sont indispensables à l'application de la méthode géomorphologique. Par contre, elle fera du tort à l'application de la méthode historique, car elle n'est pas favorable au développement d'une large mémoire collective. Bien que ce dernier constat cadre avec la réalité de la section amont, le potentiel cartographique de la méthode historique n'a pas pour autant été amputé en raison des repères historiques générés par les images satellites de 2014. Ainsi, une équité dans l'utilisation des méthodes géomorphologiques et historiques a pu être conservée. La méthode pédologique, quant à elle, joue un rôle notable dans la cartographie de la section amont en apportant des informations supplémentaires permettant de valider le caractère non inondable de certaines surfaces de la plaine alluviale. C'est le contexte forestier qui permit son application régulière, contrairement à la section aval où celle-ci fut marginale. En somme et généralement, là où une méthode se révèle inefficace, inexploitable ou inappropriée, une des deux autres se révèle souvent opérationnelle.

L'influence du contexte législatif de la PPRLPI dans le processus cartographique des zones inondables de la plaine alluviale de la rivière Mitis est ressentie. En effet, un des objectifs sous-jacents était de pouvoir aisément convertir cette cartographie vers un format en adéquation avec le cadre législatif de la PPRLPI. C'est pourquoi la symbolisation cartographique du MNZI et des unités HGM matérialise implicitement ou directement des fréquences d'inondabilité. Aussi, étant donné la réflexion derrière l'adaptation de l'approche HGM pour cartographier ce tronçon, ce fut encore une fois l'occasion de démontrer l'importance du géomorphologue fluvial dans le processus de cartographie des zones inondables et la difficulté de standardiser cette approche.

CHAPITRE 4

DISCUSSION

Le portrait historique de l'approche HGM au Québec (Chapitre 2) a permis de comprendre que la meilleure façon d'appliquer l'approche HGM à l'hydrosystème du Québec méridional est de combiner plusieurs méthodes³⁸ de manière à s'adapter le plus possible aux caractéristiques locales pour identifier le plus justement possible les limites des zones inondables. L'application répétée de l'approche HGM sur plusieurs cours d'eau du Québec a permis de la faire connaître à l'extérieur du secteur académique. Les institutions gouvernementales commencent progressivement à l'exploiter et ses promoteurs œuvrent à son transfert vers le secteur privé. À l'heure actuelle, une étude est lancée pour comprendre si certains paramètres faciles à mesurer à l'échelle de la plaine alluviale peuvent préciser la démarche cartographique à privilégier avant même d'entamer le processus cartographique. Une telle opération rendrait le processus cartographique plus rapide, moins subjectif et permettrait d'orienter dès le départ sur un mode de gestion de l'aménagement et du territoire en adéquation avec le contexte local.

La cartographie HGM de la plaine alluviale de la rivière Mitis à quant à elle permet de conforter les conclusions soulevées dans le Chapitre 2, c'est-à-dire, d'employer une approche HGM intégrée qui se conforme aux conditions locales. Il a même été montré que celle-ci pouvait être adaptée à la variabilité longitudinale du contexte anthropogéomorphologique et à la disponibilité des données à l'intérieur d'un même tronçon. Grâce à la complémentarité des différentes méthodes utilisées et dans une certaine proportion à la grande résolution spatiale apportée par les relevés LiDAR, la cartographie

³⁸ Dont les méthodes dites « conventionnelles » font parties.

des zones inondables de la plaine alluviale de la rivière Mitis n'avait jusqu'à présent jamais été proposée avec un aussi grand niveau de détails.

Dans l'éventualité d'une utilisation officielle de la cartographie HGM de la plaine alluviale de la rivière Mitis par les gestionnaires du territoire de la MRC de La Mitis, il reste à évaluer la crédibilité actuelle et future de cette dernière. C'est pourquoi ce chapitre a pour but d'analyser le niveau de confiance du tracé des limites des zones inondables géomorphologiques de la cartographie de la plaine alluviale de la rivière Mitis selon la méthode proposée par Antonin Montané (2014). L'évaluation du niveau de confiance à également pour but de justifier l'élaboration de la démarche cartographique utilisée pour la rivière Mitis. Aussi, il est fait mention de quelques paramètres pouvant intervenir sur la magnitude et la fréquence des inondations de la rivière Mitis et qui pourraient remettre en cause à plus ou moins long terme la cartographie HGM. Toutefois, avant de traiter de ces sujets, il est intéressant de revenir sur la pertinence de l'approche HGM en tant qu'approche intégrée.

4.1 PERTINENCE DE L'APPROCHE HGM

Cette section met en avant cinq grandes catégories d'avantages qui font de l'approche HGM, une approche pertinente et adéquate à utiliser en cartographie des zones inondables, aussi bien au Québec qu'ailleurs dans le monde. La pertinence de l'approche HGM est ici abordée d'un point de vue intégré (plusieurs méthodes combinées), car c'est sous cette forme qu'elle s'avère la plus adaptée pour les cours d'eau du Québec à cet instant (ex. : rivières Matane, au Renard, de la Fourche et Bonaventure). C'est également ainsi qu'elle est présentée pour la cartographie de la plaine alluviale de la rivière Mitis qui est le résultat de la combinaison des méthodes pédologique, historique et géomorphologique.

4.1.1 Améliore la compréhension des dynamiques fluviales

L'approche HGM permet aussi bien une compréhension qualitative que quantitative des aléas liés à l'eau et une reconstitution du fonctionnement de l'hydrosystème et donc de la relation existante entre chacun des aléas. Autrement dit, elle permet d'avoir une vision intégrée sur l'espace fluvial et son évolution dans le temps. L'approche HGM reconnaît la diversité des environnements fluviaux et leurs dynamiques dans l'évaluation des risques d'inondation par l'entremise de la géomorphologie, mais aussi par le biais de la géologie, de la pédologie, de l'hydrologie, de l'histoire et de la biologie. C'est pourquoi elle est qualifiée d'approche intégratrice faisant la synthèse et le pont entre toutes les sciences. Elle s'appuie directement sur la présence et l'agencement structural des éléments du paysage fluvial. Sa démarche cartographique possède l'avantage de se conformer aux processus hydrodynamiques actuels. Elle mesure des phénomènes apparents et récents en combinant des indices recueillis directement sur le terrain (ex. : extension des crues de l'année déterminée par le recensement des laisses de crue). De plus, étant donné que l'approche HGM est plutôt naturaliste, elle « [...] manipule des concepts et des méthodes intuitivement accessibles aux profanes, et plus largement au grand public. » (Goutx, 2014). Ainsi, elle se veut aussi bien scientifique que pédagogique.

Les caractéristiques d'inondabilité des unités HGM sont non contestables³⁹, car elles reflètent les conditions réelles du terrain comme les limites spatiales et les mécanismes régulateurs des inondations potentielles (Garry et al., 2002; Ballais et al., 2005). Si la fréquence n'est pas toujours accessible au géomorphologue, la hauteur d'eau peut quant à elle approximativement être obtenue grâce à la topomorphométrie de la plaine alluviale. Il s'agit encore là d'une précision relative, mais qui permet d'extraire des données quantitatives qui sont fortes utiles aux assurances pour définir des classes

³⁹ Avec certaines nuances à prendre en compte dans les environnements sous influence anthropique (barrage, remblais...) ou présentant un héritage de dépôts mis en place par d'anciens régimes.

d'endommagement, car ces dernières calculent non pas l'endommagement de façon polynomiale, mais plutôt de façon linéaire par paliers (Goutx, 2014).

En suscitant l'intérêt des institutions gouvernementales québécoises, l'approche HGM fait déjà preuve d'un véritable pouvoir attractif qui lui confère indirectement une valeur informative et éducative notable. En France, sa valeur informative est déjà reconnue à travers les *atlas des zones inondables* (AZI). Ces atlas cartographiques ne possèdent pas de valeur réglementaire, mais sont utilisés comme outil de sensibilisation et d'aide à la décision (Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, 2014). Pourtant, l'approche HGM est un outil qui se révèle potentiellement utile à la cartographie des zones de contrainte à l'aménagement.

4.1.2 Considère l'intégrité de la plaine alluviale

La prise en compte de l'intégrité de la plaine alluviale est en soit un avantage majeur de l'approche HGM qui permet de ne pas uniquement se restreindre à l'enveloppe des crues de fréquence 0-100 ans et qui permet d'inclure plus largement l'ensemble des aléas liés à l'eau telle que les inondations torrentielles et les inondations par exfiltration, par exemple. Grâce à une cartographie large des éléments de la plaine alluviale (petite échelle), l'approche HGM permet d'anticiper les ajustements hydrosédimentaires et géomorphologiques causés entre autres par les changements climatiques (Biron et al., 2013). Ainsi, elle offre également une cartographie robuste aux environnements alluviaux des cours d'eau dynamiques et favorables aux embâcles de glace et inclut avec une plus grande certitude les ajustements climatiques potentiels de la courbe enveloppe des inondations maximales (Biron et al., 2013).

Dans certains cas, l'approche HGM peut identifier une zone d'« inondabilité résiduelle » ($f > 100$ ans). L'approche HGM permet ainsi d'être particulièrement conservatrice des zones inondables et des processus intrinsèques et allochtones aux cours

d'eau. En allant chercher la limite externe des formes mises en place par le régime hydrologique actuel et les régimes hydrologiques récents et anciens, c'est-à-dire, les limites de la plaine alluviale, elle reconnaît le caractère inondable potentiel immédiat et/ou futur de l'intégralité des surfaces constituées par ces formes.

Enfin, toujours en lien avec l'intégrité de la plaine alluviale, Goutx (2014) met en avant une règle de « transparence hydraulique des ouvrages » pour évoquer le fait que l'approche HGM considère les zones (dont l'information morphogénétique est attribuable aux caractéristiques de l'aléa d'inondation) protégées des inondations en eau libre par des ouvrages telles que des digues ou autres infrastructures linéaires surélevées comme étant bel et bien inondable considérant le fait qu'un ouvrage n'est jamais infaillible.

4.1.3 Adaptée aux particularités du milieu

La démarche cartographique de l'approche HGM est flexible, car elle s'adapte au contexte local et donc intègre les particularités propres à chacun des cours d'eau tels que les facteurs aggravants (ex. : constriction engendrée par les ponts dans la cartographie de la rivière au Renard). Dans la cartographie HGM de la plaine alluviale de la rivière Mitis cette qualité a été mise en valeur par une démarche cartographique élaborée en fonction du contexte anthropogéomorphologique et du type de données disponibles le long du tronçon à l'étude. Par le fait même, elle s'adapte à la diversité des plaines alluviales du climat tempéré froid propre au Québec méridional. Selon Goutx (2014) « [...] chaque contexte géologique croisé avec chaque contexte physiographique produit des marqueurs hydrogéomorphologiques dont l'identification nécessite de mettre en œuvre des méthodologies de terrain différentes dans les vallées alpines et dans des vallées bretonnes, par exemple. ». L'intégration de différentes méthodologies à l'intérieur d'une même approche se voit donc encore une fois soutenue. Par exemple, l'interprétation géomorphologique peut être validée à l'aide de la modélisation hydraulique. Ce type de validation d'une méthode par une autre est également réversible. C'est pourquoi dans ce cas-là on parle plutôt de complémentarité des méthodes. Autrement dit, les zones

inondables d'une cartographie réalisée avec une approche HHS peuvent être complétées avec l'intégration de méthodes permettant, par exemple, d'ajouter les espaces inondés par les embâcles de glace ou les espaces de mobilité si le désire est de rejoindre le concept d'espace de liberté.

4.1.4 Compatible avec la législation

L'approche HGM n'est pas seulement compatible avec l'application des approches conventionnelles du Québec, elle est également compatible avec la planification territoriale et la PPRLPI. Comme l'ont montré Demers et al. (2014) et Marchand et al. (2014), les modelés alluviaux et les surfaces inondées identifiées par un MNZI peuvent être rattachés à la définition de zones inondables de grand et de faible courant. De plus, elle est capable d'identifier et de suggérer des zones de contraintes supplémentaires. En effet, les modelés d'érosion et glaciels, les milieux humides et les surfaces d'exfiltration (rehaussement fréquent de la nappe), les cônes alluviaux dont le régime est torrentiel et les zones inondables par embâcle de glace peuvent tous de façon légitime être associés à la zone de contraintes à l'aménagement sévères.

Jusqu'à maintenant, les contributions apportées par le développement de l'approche HGM tendent à justifier son intégration aux méthodes conventionnelles du cadre normatif de la PPRLPI. En effet, la cartographie HGM se révèle particulièrement pertinente d'un point de vue législatif. Les caractères physiques qui s'en dégagent sont suffisants pour établir une typologie assimilable au cadre normatif. Par exemple, Demers et al. (2014) associent les modelés d'érosion et glaciels de la rivière Matane (dont les puissances spécifiques sont élevées) aux crues de récurrence 0-20 ans, soit à la zone de grands courants de la PPRLPI. Le produit d'une telle démarche est donc d'autant plus pertinent, car il peut participer à l'élaboration de zonages avec différents niveaux de contrainte à l'aménagement (Biron et al., 2013; Demers et al., 2014).

Par ailleurs, l'approche HGM permet d'aller chercher la limite des crues maximales au-delà de la zone inondable 20-100 ans de la PPRLPI. Ceci permet de proposer une troisième zone normative à laquelle un niveau de contraintes à l'aménagement faible (ou spécifique) peut être arrimé. Ce détail est crucial pour les tronçons fortement urbanisés où les enjeux sont élevés. En effet, l'intégration des crues de récurrence supérieure à 100 ans dans les plans de sécurité civile permet d'assurer que les infrastructures communautaires qui sont essentielles à la gestion des sinistres soient soustraites des zones à risque (Ballais et al., 2005; DIREN Midi-Pyrénées, 2000). Dans le cas des tronçons à faibles enjeux, l'application de l'approche HGM est également justifiable. En milieux ruraux, l'enveloppe maximale des inondations peut directement servir à l'application d'un zonage restrictif large qui n'aura, de toute façon, pas vraiment d'impact sur l'aménagement futur de ces territoires.

Depuis 2007, tel que détaillé dans le Chapitre 2, huit rivières aux contextes géomorphologiques et humains distincts ont permis de développer et révéler la pertinence de l'approche HGM au Québec aussi bien dans le secteur académique que dans le secteur institutionnel. Par la multiplication de ses applications, l'approche a suscité l'intérêt des autorités provinciales du Québec. Intérêt qui est indispensable pour que la reconnaissance législative de l'approche HGM puisse avoir lieu.

En 2014, avec l'aide conjointe du MSP, du MDDEFP et du CEHQ, le MAMROT a validé l'intégration de cartes HGM d'une portion de la rivière Bonaventure au schéma d'aménagement de la MRC de Bonaventure en remplacement des cartes réalisées avec la méthode du « pinceau large ». C'est par ce genre d'opération que commence la valorisation législative de l'approche HGM. Bien évidemment, c'est la poursuite de son application par le biais de la recherche académique qui renforcera son approbation et son intégration législatives aux côtés de l'approche HHS.

4.1.5 Cadre avec un mode de gestion intégrée et durable

Depuis le début de la révolution industrielle et l'abandon progressif des terres agricoles, les sociétés riveraines se sont barricadées derrière d'imposantes structures hydrauliques pensant à tort qu'elles leur permettraient intemporellement de se soustraire au risque (Arnaud-Fassetta et al., 2009; Ollero, 2010). Ce paradigme accorda une telle notoriété aux sciences de l'ingénierie que la culture du risque fut reléguée au second plan. Aujourd'hui, on ne cherche plus à contraindre les écoulements comme il était de coutume dans le passé, mais plutôt à se contraindre aux aléas en définissant des espaces fluviaux à l'aide de l'expertise hydrogéomorphologique pour maintenir les fonctions physiques naturelles des cours d'eau.

Depuis une vingtaine d'années, la gestion des cours d'eau semble converger vers un mode de gestion durable et intégrée qui laisse au cours d'eau un espace fonctionnel plus important dans lequel il peut évoluer librement (Warner et al., 2013). Ce concept se décline sous les noms de « Fluvial territory » en Espagne (Ollero, 2010), « River corridor » aux États-Unis (Kline et Cahoon, 2010) ou encore « Room for the river » aux Pays-Bas (Zenvenbergen et al., 2013) pour n'en citer que quelques-uns. Les démarches pour l'appliquer diffèrent d'un pays à l'autre, mais toutes y intègrent en partie ou en totalité le schéma de l'approche HGM dans le but de cartographier les aléas fluviaux. Au Québec, ce concept a vu le jour en 2013 sous le nom d'« espace de liberté » (Biron et al., 2013). L'approche HGM y est employée pour délimiter l'espace de mobilité, mais surtout l'espace d'inondabilité. Ce n'est pas par hasard si l'approche HGM suscite de plus en plus d'intérêts au Québec. En effet, au risque de se répéter, en plus d'être peu coûteuse et relativement facile et rapide à mettre en place, celle-ci a le pouvoir d'être rigoureuse et complémentaire, car elle apporte de la précision aux résultats des modèles hydrauliques (Baker, 1976; Baker, 1994; Ballais et al., 2005; Ballais et al., 2011a; Demers et al., 2014; Lastra et al., 2008; Lelièvre et al., 2008). Soutenus par l'émergence internationale du concept « making space for the river », les résultats dégagés par la cartographie HGM sont progressivement mis aux services des communautés riveraines pour améliorer leur compréhension des aléas

d'inondations et le bien-fondé de ceux-ci au sein des plaines alluviales. Tout cela permet une meilleure acceptation sociale des règles attenantes au programme d'espace de liberté (ex. : suppression d'infrastructures hydrauliques, dédommagements pour la perte de terres agricoles...).

L'approche HGM permet une cascade d'interventions grâce à l'identification de différents types d'aléa qui peut mener à l'estimation de l'intensité, la délimitation spatiale, l'arrimage d'un zonage, l'évaluation du risque encouru par combinaison avec une analyse des enjeux/vulnérabilités et finalement à la proposition de cartographies utiles à la prise de décisions. Par-dessus tout, lorsque celle-ci ne repose pas sur les contraintes de l'approche HHS, c'est-à-dire, sur des suites d'opérations statistiques laborieuses peu rapides à mettre en œuvre et dont le coût est plutôt élevé, il est possible de l'appliquer à l'échelle du bassin versant. Baker (1976) s'avance même à dire qu'elle est applicable à l'échelle régionale.

4.1.6 Conclusion

En somme, la géomorphologie est aussi indispensable que les sciences conventionnelles qui sont utilisées dans la gestion des risques d'inondation, car elle apporte un socle de bases préalables pour une bonne compréhension du milieu fluvial. La combinaison de méthodes, qui fait référence à l'approche HGM, est fort bénéfique pour l'optimisation de la cartographie des zones inondables. Selon Demers et al. (2014), l'approche HGM apporte un cadre d'analyse complémentaire aux pratiques de gestion des systèmes fluviaux. Aussi, de par son faible coût, l'approche HGM apparaît comme une alternative économique évidente aux MRC dévitalisées et aux municipalités dont le budget limité ne permet pas d'appliquer l'approche HHS (Ballais et al., 2005; Demers et al., 2014; Lelièvre et al., 2008). Toutefois, lorsque c'est possible, l'intégration de l'approche HHS à l'approche HGM est préférable. Leur complémentarité permet d'aller chercher un maximum de précision surtout dans les secteurs où la qualité et la disponibilité des

informations ne permettent pas l'applicabilité optimale de l'une d'entre elles (Lastra and al., 2008).

À terme, le développement de l'approche HGM devrait contribuer au perfectionnement du système de gestion des cours d'eau ainsi qu'au développement d'outils de gestion résilients aux changements climatiques tels que l'approche par espace de liberté. Ces moyens de gestion permettront aux conseillers en environnement et aux aménagistes du territoire d'orienter et de planifier efficacement leurs projets. Ainsi, la cartographie HGM jouera un rôle décisif dans la prise de décisions quant aux interventions réalisables dans l'emprise des contraintes naturelles de la PAF (Ballais et al., 2005).

4.2 ÉVALUATION DU NIVEAU DE CONFIANCE DU TRACE GEOMORPHOLOGIQUE

En toute logique, on s'attend à ce que le niveau de confiance accordé au tracé des zones inondables d'une cartographie exécutée selon une approche HGM (combinant plusieurs méthodes) soit plus élevé que celui d'une cartographie des zones inondables construite à partir d'une seule méthode. Ici, le niveau de confiance se définit selon la définition proposée par Montané (2014) : il représente une combinaison des imprécisions et des incertitudes. L'analyse du niveau de confiance doit permettre d'identifier par le biais d'une analyse simple et rapide les paramètres qui peuvent influencer la cartographie des zones inondables au moment de sa réalisation (Montané, 2014). Il est important de souligner que l'analyse du niveau de confiance mis en place par Montané (2014) s'applique pour un tracé obtenu à l'aide de la méthode HGM française ou d'une méthode géomorphologique pour faire le lien avec le jargon employé dans ce mémoire. Pour ce même genre d'exercice, c'est-à-dire, la validation du tracé des zones inondables, certains préféreront la comparaison des limites géomorphologique avec une crue historique (Chave, 2002), mais l'opportunité d'une telle comparaison demeure relativement rare. Aussi, il est possible de comparer une cartographie géomorphologique à une cartographie hydraulique

telle que Lastra et al. (2008) ou Biron et al. (2013) l'ont fait, mais encore une fois il faut que les modélisations soient disponibles ou réalisables⁴⁰.

Étant donné que l'approche HGM utilisée ici intègre en partie la méthode géomorphologique, l'application de l'analyse du niveau de confiance selon Montané (2014) s'avère justifiée. Aussi, cette dernière permet notamment de justifier plus objectivement le choix des démarches cartographiques amont et aval et la pertinence de ne pas uniquement se restreindre à l'application d'une seule méthode.

Dans un premier temps, une description des concepts relevant de l'analyse du niveau de confiance est effectuée. Ensuite, les éléments qui nuisent à l'interprétation géomorphologique sont énumérés. Enfin, avant de présenter les résultats de l'analyse du niveau de confiance de la cartographie de la plaine alluviale de la rivière Mitis, quelques précisions sont apportées à la méthodologie de Montané (2014) de manière à rendre le processus analytique un peu plus objectif.

4.2.1 Description des concepts encadrant le niveau de confiance : imprécisions et incertitudes

Pour évaluer le degré de fiabilité ou le niveau de confiance d'une cartographie HGM centrée sur l'interprétation géomorphologique, l'imprécision et l'incertitude peuvent être mesurées. Selon Montané (2014), l'imprécision se définit par la netteté des contacts entre les zones inondables et l'encaissant aussi bien du point de vue de la topographie que de la sédimentologie. Plus le contact est difficile à détecter, plus l'imprécision est grande (Figure 56). Quant à l'incertitude, celle-ci est définie par l'évolution naturelle ou anthropique de la plaine alluviale, c'est-à-dire, lorsque les formes visibles sur le terrain semblent

⁴⁰ f (coût/temps).

déconnectées du régime hydrologique actuel (Figure 56). Plus la cohérence entre les formes alluviales observées et le régime hydrologique est faible, plus l'incertitude est grande.

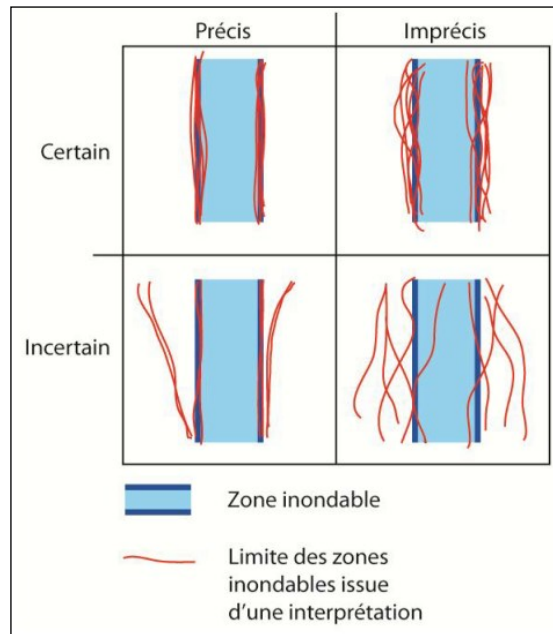


Figure 56 – Application des concepts d'imprécision et d'incertitude à la cartographie des zones inondables. Source : Montané, 2014.

Dans les facteurs d'imprécision, Montané (2014) englobe le type de plaine alluviale et la nature des matériaux qui composent les versants. Plus le type de plaine alluviale tend vers une puissance spécifique faible et plus la composition granulométrique des talus tend vers les argiles, plus l'interprétation géomorphologique est difficile et la précision du tracé est faible. Dans les facteurs d'incertitude, Montané (2014) inclut les dépôts hérités de l'Holocène (ex. : étagement de niveaux fluviaux dû à la glacio-isostasie) et l'anthropisation de la plaine alluviale (ex. : recalibrage de la géométrie du lit mineur, pont, remblai, type d'occupation des sols, extraction de matériaux granulaires dans le lit). Une forte prépondérance des dépôts hérités et un niveau d'anthropisation élevé augmentent le niveau de difficulté lors du traçage des zones inondables et par le fait même limitent la certitude du tracé.

Le type de données topographiques a également une influence sur l'imprécision et l'incertitude. À l'heure actuelle, la possibilité d'utiliser des relevés LiDAR sur certaines rivières et certains tronçons de cours d'eau permet de réduire les imprécisions et les incertitudes (Montané, 2014). En effet, les MNT de grande résolution comme les LiDAR permettent d'accroître la précision en écartant les erreurs de tracé découlant de l'utilisation de photographies aériennes sur lesquelles le fond topographique est souvent peu évident à décrypter surtout en présence de végétation. De plus, des variables quantitatives comme la pente transversale peuvent être utilisées pour valider les limites des zones inondables. L'emploi d'une couverture LiDAR permet aussi d'augmenter la certitude, car il devient alors possible de réfléchir en altitude absolue et d'obtenir instantanément des profils transversaux de la plaine alluviale.

Après avoir évalué l'intensité des paramètres qui influence le niveau d'incertitude et de précision du territoire à l'étude, Montané (2014) propose de combiner ces derniers dans un graphique (Figure 57) pour obtenir le niveau de confiance cartographique des zones inondables tracées à partir de la géomorphologie de la plaine alluviale.

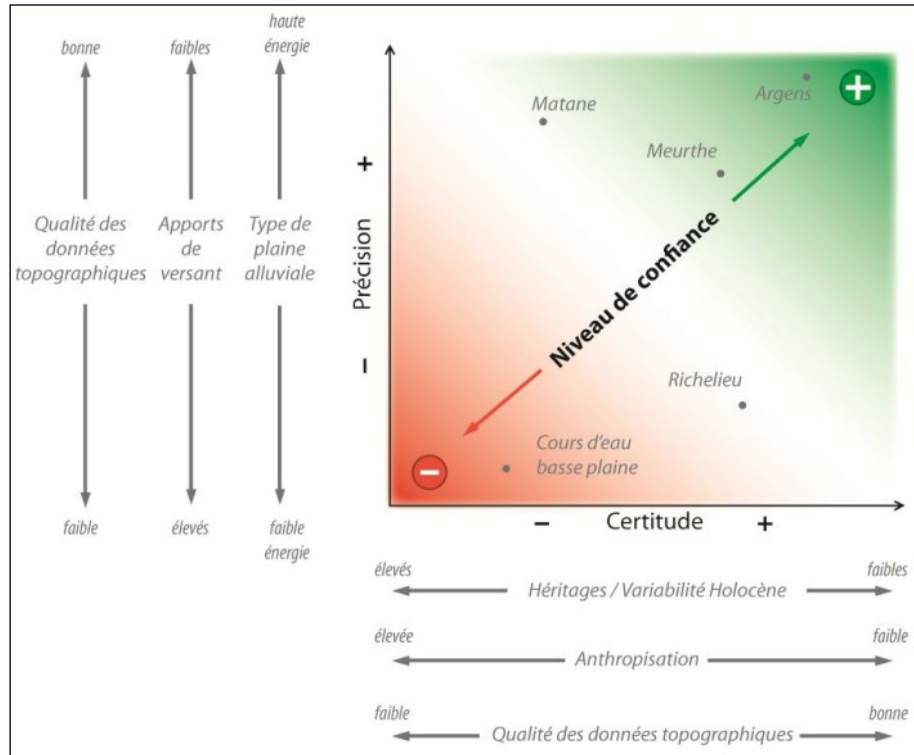


Figure 57 – Schématisation des paramètres influençant le niveau de confiance d'une cartographie HGM. Source : Montané, 2014.

4.2.2 Éléments nuisant à l'interprétation géomorphologique

Montané (2014) souligne quelques exemples d'environnements complexes pour la réalisation de cartographies HGM centrée sur la géomorphologie. Ces environnements sont les basses plaines, les zones fortement urbanisées et les sites contenant des dépôts hérités de l'Holocène. Dans le cas de la plaine alluviale de la rivière Mitis, trois principaux facteurs nuisent à l'interprétation géomorphologique. Il s'agit de l'héritage sédimentaire de la dernière période post-glaciaire (plaine diachronique), de la largeur de la plaine alluviale (effet de plaine vs contrôle lithologique) et de l'anthropisation (activités humaines et présence d'ouvrages hydrauliques).

Héritage sédimentaire de la dernière période post-glaciaire

Vers 13400 (\pm 200 BP; Desmarais, 1988), la fonte des glaciers a laissé des dépôts glaciaires qui se présentent désormais sous la forme de terrasses hautes perchées bien identifiables dans le paysage fluvial. Dans d'autres cas, ce type de dépôt se confond avec les sédiments mis en place par le régime hydrologique actuel, soit parce qu'il se retrouve à des niveaux topographiques proches du chenal actuel ou parce qu'il se retrouve dans la continuité directe d'un plan de la plaine actuelle sans démarcation franche. Dans les deux cas, la littérature parle de plaine polyphasée ou diachronique (Ferguson, 1981; Brown, 1990), où les facteurs antécédents persistent et induisent de façon passive un contrôle hydrosédimentaire sur la géomorphologie fluviale actuelle. À moins d'étudier la stratigraphie des dépôts, qui est longue et fastidieuse, peu de moyens sont disponibles pour discerner les dépôts anciens des dépôts récents. De plus, même si la distinction a pu être correctement faite, elle ne valide en rien la limite de la plaine alluviale fonctionnelle, car dans certains cas documentés (Chave, 2002), des terrasses héritées peuvent être immergées par les inondations actuelles. Pour se sortir de cette problématique, le recours à la modélisation hydraulique ou historique (MNZI) devient une solution inévitable. Dans le cas de la plaine alluviale du ruisseau Bernier confluyente à celle de la rivière Mitis, l'absence de données historiques et de MNE n'a pas permis de dégager avec certitude les surfaces fonctionnelles de celles qui ne le sont pas. C'est pourquoi une vaste superficie de la plaine alluviale du ruisseau Bernier a été cartographiée comme zone d'inondabilité incertaine.

Aussi, la présence d'importants dépôts argileux hérités de la transgression de la mer de Goldthwait peut avoir un impact sur la dynamique de la rivière. L'argile rend le plancher alluvial très cohésif dans la portion aval de la rivière Mitis, ce qui a tendance à restreindre la mobilité du chenal. Par le fait même, une faible dynamique fluviale induit une construction simple de la plaine et des formes alluviales plutôt lisses et estompées (Bizzi et Lerner, 2015). L'interprétation géomorphologique pour déduire du caractère fonctionnel des unités HGM est alors contre-indiquée pour les mêmes raisons que les environnements

en présence de dépôts glaciaires ou de terrasses mises en place lors du soulèvement isostatique.

« Effet de plaine » vs contrôle lithologique

L'« effet de plaine » illustre ici l'atténuation voir l'absence des contraintes lithologiques qui peuvent induire à la géométrie des cours d'eau une forte pente et une PAF restreinte. Selon Notebaert et Piégay (2013), la lithologie influence beaucoup la largeur de la plaine alluviale. C'est dans le secteur en face de la confluence des rivières Mitis et Neigette où l'« effet de plaine » se fait le plus ressentir. À cet endroit, la largeur de la plaine alluviale atteint près de 1,5 kilomètre de large et la pente du chenal 0,0009, alors qu'en amont de Saint-Angèle-de-Mérici la largeur de plaine alluviale peut être divisée par 15 et la pente du chenal multipliée par quatre (0,0037). L'élargissement de la PAF conjointe à la très faible pente du chenal, et par le fait même à une faible puissance spécifique (28 W/m²), a une influence sur la configuration presque plane et sans grand contraste de la plaine alluviale de la rivière Mitis (Nanson et Croke, 1992). Le réseau complexe de chenaux de débordement qui inondent la plaine par lambeau et sur sa pleine totalité même lors d'évènements d'inondation de faibles amplitudes rend la délimitation des zones inondables plutôt ardue. Alors que dans la plupart des cas les ruptures de pente permettent de tracer des lignes droites et parallèles à l'axe de la vallée de la rivière Mitis, dans ce cas-ci le découpage ressemble à de la dentelle et ne permet pas de faire la nuance entre différents niveaux d'inondabilité. De plus, la présence de la rivière Neigette ajoute probablement au contexte hydrosédimentaire local un niveau de complexité supérieur. Encore une fois, c'est la modélisation hydraulique ou historique qui permet de définir au mieux les limites d'inondabilité dans les secteurs où l'« effet de plaine » est fort.

Anthropisation

L'anthropisation du territoire se décline sous différentes formes ou types d'occupation des sols qui mènent à un plus ou moins grand degré d'artificialisation du paysage. Dans la plaine alluviale de la rivière Mitis, peu d'endroits sont réellement affectés

par l'anthropisation au point de ne plus rien voir de la géomorphologie fluviale comme cela peut être le cas dans les grands centres urbains. Certes, l'occupation des sols dans la plaine alluviale de la rivière Mitis ne masque pas la géomorphologie fluviale, mais elle peut cependant avoir un impact morphologique non négligeable.

L'activité agricole illustre parfaitement ce cas de figure, car elle estompe les indices morphosédimentaires du passage des crues. En effet, le travail annuel de la terre ainsi que certaines interventions volontaires perpétrés par les agriculteurs de la région, tel que le remblayage des cicatrices d'érosion (chenaux de débordement, recouplement de méandre...), altèrent l'interprétation de la géomorphologie de la plaine alluviale qui ne reflète plus l'état de la dynamique locale.

L'usage hydroélectrique des ressources en eau de la rivière Mitis peut également interagir avec la dynamique hydrosédimentaire et par le fait même être en contradiction avec l'interprétation des formes retrouvées sur la plaine alluviale. Les effets provoqués par les barrages de la centrale Mitis-1 et du lac Mitis ne sont pas tous connus, mais peuvent être suspectés. Selon Pinto Martins (2008), la construction d'un barrage est susceptible de modifier la dynamique d'un cours d'eau en amont comme en aval. Ce changement peut opérer à court terme dans les environnements où le transport sédimentaire en charge de fond est élevé. Il est certain que les barrages constituent une entrave non négligeable au transport sédimentaire, car les sédiments qui étaient habituellement évacués vers l'aval se retrouvent séquestrés dans leur réservoir. La position du barrage Mitis-1 est particulière, car ce dernier est situé en contrebas d'une vaste plaine alluviale avec une faible pente (0,0004). C'est cette faible pente qui rend potentiellement influant la portée des changements provoqués par le barrage sur le dynamisme de la rivière plusieurs kilomètres en amont du réservoir. Il est possible qu'un changement du niveau de base et un ajustement de la pente du chenal soient en train d'opérer avec l'obstruction sédimentaire engendrée par le barrage. Étant donné que la pente diminue, la puissance spécifique diminue également et c'est pourquoi celle-ci ne reflète pas forcément les modèles observés sur la plaine alluviale. Toutefois, dépendamment du contexte, l'ajustement de la pente du lit mineur est un

processus qui peut s'opérer sur plusieurs décennies, voire sur plusieurs millénaires (Figure 58). Pour ce qui est des impacts du barrage du lac Mitis situé en amont du tronçon à l'étude, l'étude de Robitaille (1999) a permis de constater l'influence de celui-ci sur le régime hydrologique de la rivière Mitis. En effet, les débits moyens enregistrés pendant les mois de mars et de février sont supérieurs à la normale, alors que les débits moyens enregistrés pendant le mois de mai sont inférieurs à la normale. Selon Robitaille (1999) : « Il ne fait nul doute que la gestion active des débits de la rivière Mitis par Hydro-Québec influence le cycle de ces débits ». Cependant, encore une fois, il est impossible de savoir sans une étude spécifique les effets du contrôle du débit sur la configuration actuelle des modelés de la plaine alluviale.

Enfin, en 1950, il est possible que l'agrandissement de la superficie du bassin versant de la rivière Mitis suite à la construction d'une digue à l'émissaire du lac Supérieur pour détourner une partie des eaux de la rivière Patapédia vers la rivière Mitis ait contribué à modifier le régime hydrologique de la rivière Mitis ainsi que la morphologie de la plaine alluviale (Robitaille, 1999).

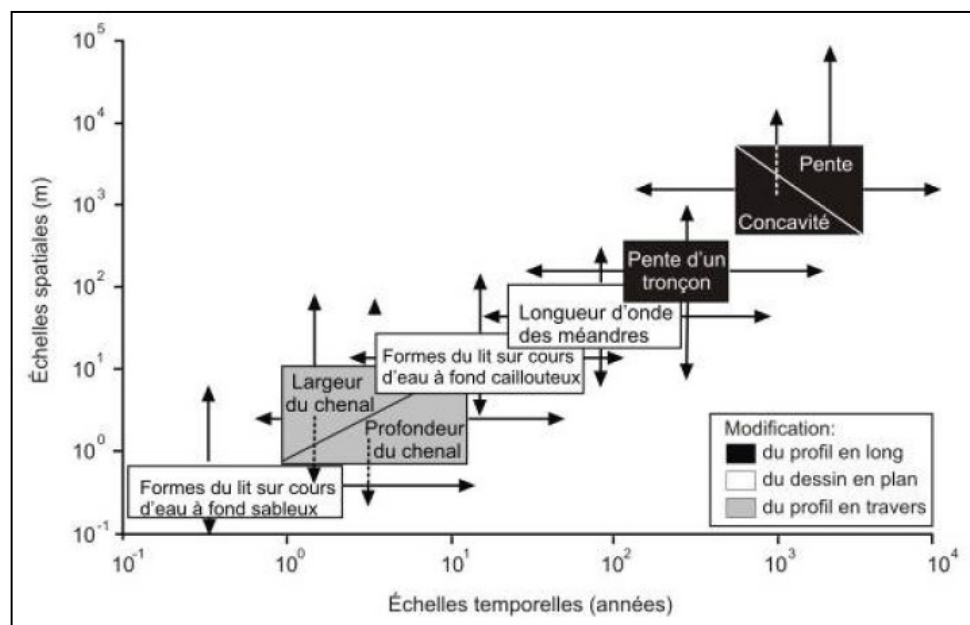


Figure 58 – Échelles spatiales et temporelles de l'ajustement des formes fluviales. D'après Knighton, 1984. Source : Pinto Martins, 2008.

La linéarisation, l'endiguement, le recalibrage et l'encrochement du lit mineur peuvent localement remettre en question la dynamique hydrosédimentaire et par le fait même contredire les observations du géomorphologue. Ces interventions court-circuitent les processus naturels essentiels à la dynamique fluviale. C'est pourquoi la portée des inondations et la mobilité même du chenal sont considérablement réduites ou exacerbées avec de surcroît l'incertitude quant à l'inondabilité d'une surface ou la mobilité du chenal (Chave, 2002; Montané, 2014). La superposition des anciennes photographies aériennes permet assurément de dire que la mobilité de la rivière Mitis est relativement faible sur un horizon de 50 ans. Une descente en canot sur la rivière Mitis a pu montrer que cette stabilité n'était pas spécialement causée par l'artificialisation des berges, mais plutôt par une bonne végétalisation de celles-ci et une composition sédimentaire relativement cohésive. Seule la linéarisation et le recalibrage de la rivière Rouge (Taylor, 2008), affluent de la Neigette, méritent une mention particulière étant donné qu'ils remettent considérablement en question l'interprétation géomorphologique de la plaine alluviale.

Les ouvrages comme les ponts qui créent du refoulement peuvent envoyer des surfaces qui à priori sont géomorphologiquement non fonctionnelles et également modifier la géomorphologie de la plaine alluviale en amont de leur position. En effet, ceux-ci peuvent à plus ou moins long terme provoquer une aggradation verticale de la plaine qui entraînera le comblement des dépressions et l'estompement des ruptures de pente (Chave, 2002).

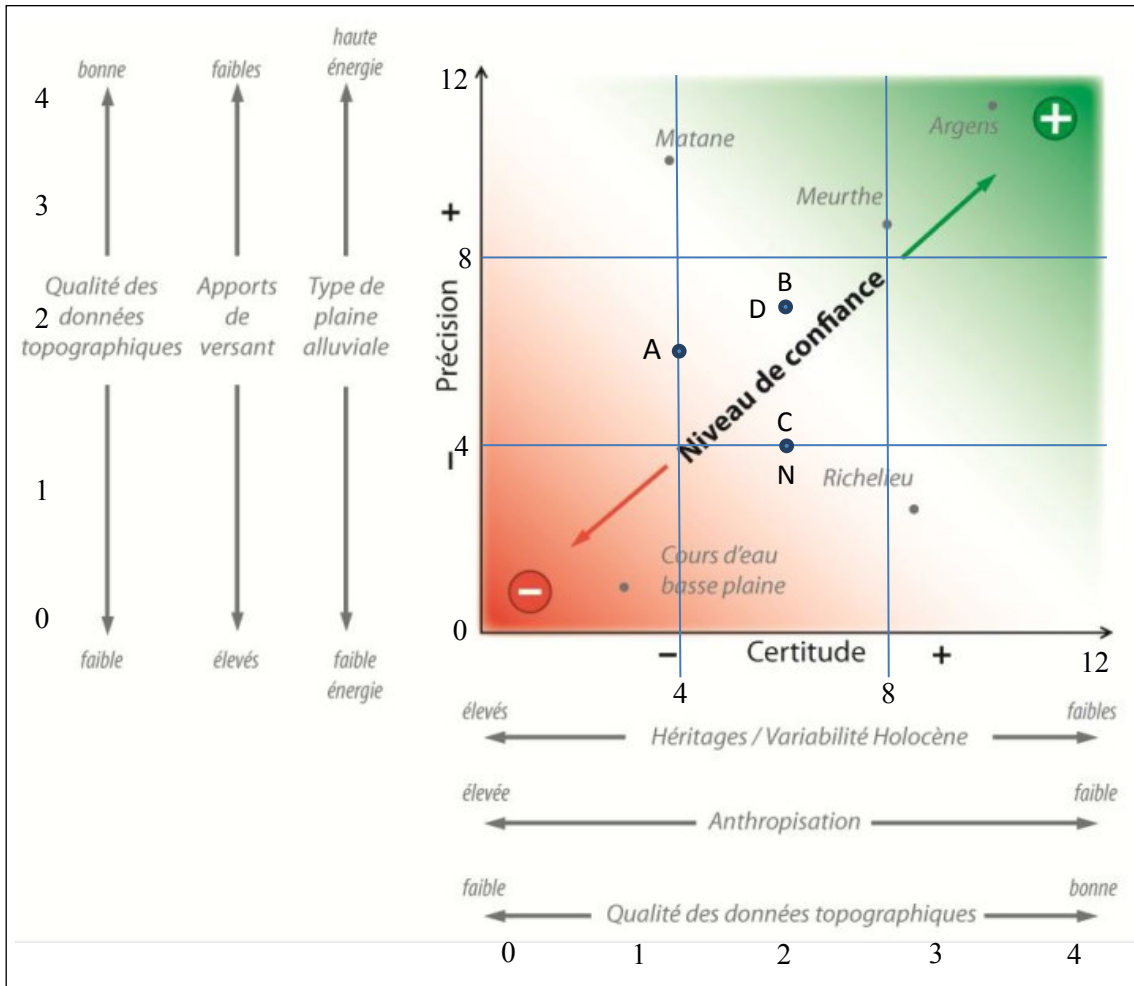
4.2.3 Niveau de confiance de la cartographie HGM de la rivière Mitis

Le niveau de confiance selon la méthode de Montané (2014) est une proposition conceptuelle. De ce fait, il s'agit d'une démarche particulièrement subjective et qualitative qui n'est pas reproductible, car elle dépend de la perception et du bagage de connaissance de son utilisateur. En dépit de cela, une approximation du niveau de confiance a quand même été faite pour chacun des segments de la rivière Mitis (cf. section 1.3.5) ainsi que

pour un cinquième segment (N) situé sur la rivière Neigette dont la puissance spécifique a pu être obtenue dans l'article de Demers et Buffin-Bélanger (2011).

De manière à rendre la démarche d'estimation du niveau de confiance plus transparente et automatisée et de façon à pouvoir expliquer plus aisément ce qui fait varier le niveau de confiance, on propose de superposer au graphique conceptuel de Montané (2014) un cadre quantitatif. Ce cadre se traduit par la combinaison d'échelles d'indices. Autrement dit, une échelle d'indices allant de 0 à 4 est attribuée à chacun des paramètres de précision et de certitude : qualité des données topographiques, apports de versant, type de plaine alluviale, héritages/variabilité Holocène et anthropisation (Figure 59). Étant donné que la somme maximale qu'il est possible de calculer pour chacun des axes (précision et certitude) est de 12 (3 (paramètres) x 4 (indice)), les axes x et y sont chiffrés de 0 à 12 (0 étant le plus faible niveau de confiance).

En raison de la part de subjectivité qui se dégage de l'analyse du niveau de confiance, il est délicat de comparer le niveau de confiance des segments de la rivière Mitis aux cours d'eau de la thèse de Montané (2014).



Indices attribués aux paramètres influençant le niveau de confiance du tracé de la cartographie géomorphologique des zones inondables des segments de la rivière Mitis								
Segment	Précision et certitude		Précision		Précision totale	Certitude		Certitude totale
	Qualité des données topographiques	Apports de versant	Type de plaine alluviale	Héritages/Variabilité Holocène		Anthropisation		
A	0	4	2	6	1	3	4	
B	4	2	1	7	2	0	6	
C	4	0	0	4	2	0	6	
D	4	3	0	7	2	0	6	
N	4	0	0	4	0	2	6	

Figure 59 – Démarche et résultats de l'estimation du niveau de confiance des segments de plaine alluviale des rivières Mitis et Neigette.

Globalement, le niveau de confiance des segments de la plaine alluviale de la rivière Mitis est moyen avec des niveaux de précision et de certitude qui ne sont ni faibles, ni élevés (Figure 59). Ces niveaux moyens de précision et de certitude s'expliquent par un contrebalancement des indices accordés pour chacun des paramètres. Par exemple, lorsqu'un segment a un indice élevé pour la qualité des données topographiques, il a un indice faible pour le type de plaine alluviale, ce qui a pour effet d'équilibrer le niveau de précision.

Hormis le segment A, la qualité des données topographiques est bonne, ce qui augmente la précision et la certitude. Contrairement aux segments A, B et D qui ont un encaissement plutôt stable et dont le contact avec la PAF est plus net, les segments C et N ont des versants dont les contours sont moins bien dessinés, car ils sont incisés dans des dépôts marins argileux. Ainsi, la précision pour ces deux derniers segments est diminuée. Le type de plaine alluviale de l'ensemble des segments oscille entre à énergie faible et à énergie modérée, ce qui a tendance à réduire la précision du tracé. L'héritage et la variabilité Holocène se situent en général entre moyen et élevé, ce qui limite la certitude lors de la délimitation des zones inondables. Enfin, l'anthropisation est relativement variable de l'amont vers l'aval. Les segments B, C et D sont surtout dominés par des terres agricoles à l'inverse du segment A qui est surtout dominé par de la forêt. L'occupation forestière étant moins contraignante pour l'interprétation géomorphologique, le segment A se retrouve avec un indice de certitude plutôt élevé. En plus de la prépondérance du secteur agricole dans le paysage des segments B, C et D, le segment B intègre la plus forte densité de population en raison de sa proximité avec le périmètre urbain de Sainte-Angèle-de-Mérici et les segments C et D sont respectivement potentiellement et totalement contraint par le régime hydraulique du barrage de la centrale Mitis-1. Ainsi, cela induit au segment B, C et D un indice de certitude très bas. Le segment N est quant à lui à mi-chemin entre un territoire agricole et un territoire forestier, ce qui induit au tracé de ce dernier un indice de certitude moyen.

Cette analyse du niveau de confiance par segment homogène de plaine alluviale montre que le niveau de confiance est globalement le même de l'amont (A) vers l'aval (B, C, D et N). Cette observation est en opposition à la proposition de Montané (2014) suggérant que le niveau de confiance est toujours plus élevé dans une zone de transfert que dans une zone de basse plaine côtière. Pourtant, en analysant de plus près la démarche utilisée pour calculer le niveau de confiance des segments à l'étude, il semble évident qu'une certaine variabilité existe à l'intérieur des différents paramètres entre les portions amont et aval (voir tableau de la Figure 59). En fait, c'est l'absence de LiDAR, dont la pondération est double, qui explique la diminution du niveau de confiance de la zone de transfert du tronçon à l'étude. Par conséquent, en ayant une couverture LiDAR pour le segment A, le niveau de confiance serait aussi élevé que celui du fleuve Argens et concorderait avec la proposition de Montané. On peut donc préciser que sa proposition est valide lorsque des tronçons avec des informations topographiques similaires sont comparés.

L'analyse du niveau de confiance de la cartographie géomorphologique des zones inondables est en soi intéressante à appliquer, car elle permet d'anticiper la faisabilité d'une cartographie HGM centrée sur l'interprétation géomorphologique. Le niveau de confiance moyen estimé pour la Mitis explique ici pourquoi il fut si difficile d'élaborer une démarche cartographique centrée sur l'interprétation géomorphologique. Le niveau de confiance de la cartographie amont de la plaine alluviale de la rivière Mitis qui se base en partie sur la délimitation des unités HGM a pu être amélioré grâce à la campagne de terrain qui permit de recueillir des données topographiques ponctuelles. Ainsi, la cartographie des zones inondables de la portion amont a un niveau de confiance réévalué à la hausse. La cartographie aval n'a quant à elle pas pu être développée sur une démarche comme celle de la portion amont en raison du niveau d'anthropisation trop avancé. Habituellement, en présence de ce type de situation, l'interprétation des plus anciennes photographies aériennes permet de contrecarrer ce problème. Cependant, dans ce cas, le type de plaine alluviale faisait de toute façon d'emblée obstacle à une application optimale d'une démarche centrée sur l'interprétation des formes. C'est pourquoi au final la cartographie aval des zones inondables a plutôt été faite à partir d'une modélisation historique.

En somme, l'estimation du niveau de confiance devient un outil préalable et incontournable pour vérifier l'applicabilité d'une approche cartographique des zones inondables centrée sur l'interprétation géomorphologique. En plus de faire gagner un temps considérable, son intégration à la cartographie HGM offre aux lecteurs une forme de transparence (Montané, 2014). Un niveau de confiance modéré à faible est un indice supplémentaire pour orienter la cartographie vers une approche combinée de manière à pouvoir éliminer les lacunes de la méthode géomorphologique et obtenir une cartographie robuste des zones inondables.

4.2.4 Avantages de l'utilisation d'un LiDAR

Le niveau de confiance de la cartographie HGM de la rivière Mitis (tous segments confondus) d'un point de vue strictement géomorphologique est mitigé. Ce constat est le reflet de l'ensemble des incertitudes et des imprécisions du territoire. Le paramètre prévalant dans la variabilité du niveau de confiance demeure la disponibilité des relevés topographiques LiDAR. La puissance informative du LiDAR est désormais parfaitement reconnue et rend en quelque sorte le géomorphologue complètement dépendant de celui-ci. La quantité d'informations géomorphologiques qui ressort à la lecture de ce type de MNT haute résolution est à la fois considérable, précise et certaine, ce qui permet incontestablement d'accélérer le processus cartographique. Par exemple, les cônes alluviaux sont beaucoup plus perceptibles sur des relevés LiDAR que sur des photographies aériennes. La faible pente qui caractérise ces formes coniques n'offre pas de limites nettes visibles à travers la canopée. De plus, elle n'est également pas si évidente à discerner sur le terrain. C'est pourquoi le recensement des cônes alluviaux en amont n'est probablement pas exhaustif et que leurs limites sont indiquées à titre suggestif. La précision et la certitude du tracé des cônes alluviaux et des autres unités HGM sont définitivement plus grandes en aval qu'en amont de la Mitis où le LiDAR est absent.

Ainsi, les relevés LiDAR ont un véritable potentiel cartographique, car ils facilitent l'interprétation du géomorphologue et permettent d'atteindre une plus grande certitude et précision des limites de zones inondables HGM. Par le fait même, ils sont indispensables pour modéliser des niveaux d'eau historiques à l'aide de la méthode du MNZI surtout dans les secteurs où les critères géomorphologiques ne permettent pas de distinguer la PAF de la PANF. Les relevés LiDAR doivent devenir un argument de promotion pour la cartographie HGM et un argument pour son autofinancement de manière à ce que les convoiteurs de cartographie engagent des fonds surrogatoires pour l'obtention des relevés LiDAR lorsque ceux-ci sont indisponibles.

4.3 PARAMETRES POUVANT INTERVENIR SUR LA PERIODE DE VALIDITE ET L'INCERTITUDE DES LIMITES DE LA CARTOGRAPHIE HGM DE LA PLAINE ALLUVIALE DE LA RIVIERE MITIS

Parce qu'il est dans l'intérêt des autorités de gérer durablement le territoire de la MRC, une énumération des paramètres pouvant intervenir sur la magnitude et la fréquence des inondations est proposée. Selon Slater et al. (2015), les changements climatiques et les modifications anthropiques font parties des facteurs qui notamment et respectivement influencent l'augmentation de la fréquence des hauts niveaux d'eau et la diminution de la capacité du chenal. Ce sont ces deux derniers constats qui sont incriminés dans la tendance à la hausse des inondations observées ces dernières décennies (Slater et al., 2015). Le but recherché étant bien sûr de montrer que la cartographie des zones inondables effectuée aujourd'hui n'est pas forcément celle de demain, car de nombreux paramètres qui ne sont pas directement reliés à une transformation morphogénétique de la plaine alluviale⁴¹ peuvent influencer le régime hydrologique et remettre en question l'interprétation du géomorphologue. Ainsi, en raison de l'existence de paramètres dont les effets sur le milieu fluvial sont difficiles à prévoir, il est complexe de mentionner une date d'expiration qui

⁴¹ Ou du moins, qui n'influence pas à court terme la morphologie de la plaine alluviale.

mettra fin à la validité du tracé des zones inondables. C'est pourquoi il faut être conscient qu'une remise en question du tracé des zones inondables est possible en tout temps.

4.3.1 Gestion des barrages : régulation des crues

La présence de barrages dans le bassin versant de la rivière Mitis implique une forme de régulation des débits. Matteau et al. (2009) classe l'impact hydrologique du barrage du lac Mitis comme étant de type homogénéisation, car il induit une faible variabilité inter mensuelle des débits.

Sur le terrain, des entrevues avec les riverains ont permis de mettre de l'avant deux types de réponses hydrologiques en lien avec le mode de gestion de ce barrage. D'un côté, certains riverains affirment que l'ouverture des vannes du barrage du lac Mitis pendant la crue printanière aggrave le débordement de la rivière Mitis. Des riverains résidant sur le chemin de la rivière Mitis-Nord depuis 1985, notamment touchés par la crue de 2011, ont évoqué que les problèmes liés aux inondations auraient commencé il y a huit ans. Toutefois, en 2015, ils auraient constaté un changement au niveau de la gestion des eaux du barrage en voyant le niveau d'eau monter progressivement peu de temps avant le pic de crue printanier. Selon eux, il s'agirait d'une ouverture préventive des vannes pour anticiper la hausse du niveau du réservoir occasionnée par la fonte des neiges. Cette observation n'a cependant pas pu être constatée sur l'hydrogramme des débits de 2015. Les pulsations du débit de la rivière semblent être de toute évidence corrélées avec l'apparition de températures au-dessus de 0°C et l'apport des eaux de pluie (Figure 60). Selon Réjean Savard, conseiller « communications et collectivité » à la direction régionale d'Hydro-Québec, l'ouverture des vannes en période de crue, qui est habituelle, aurait eu peu d'incidence sur les inondations du 5 mai 2011 (TV Mitis, 2011b). Il est peut-être audacieux de prétendre que le barrage soit la raison principale des débordements répétés dans le secteur situé entre les ponts Marcel et Marquis. En effet, le cycle naturel des crues aura toujours le dessus sur la fréquence et la quantité des débits turbinés et déversés par les

barrages. Il est d'autant plus improbable que le barrage exacerbe la crue étant donné que l'impact d'un barrage sur le régime hydrologique a plutôt tendance à réguler à la baisse les pics de crue ⁴² (Pinto Martins, 2008).

De l'autre côté, bien que certains riverains soient en désaccord avec le mode de gestion du barrage du lac Mitis, d'autres approuvent au contraire celui-ci. En effet, des riverains établis dans le secteur du lac Ouellet, qui ont vu la rivière Mitis déborder lors de l'embâcle de glace de 1994, affirment que c'est l'ouverture des vannes du barrage avant le pic de crue printanier qui permet de faire fondre le couvert de glace et qui évite une débâcle mécanique et par le fait même la formation d'embâcles de glace. Ces mêmes riverains ont d'ailleurs soulevé une corrélation intéressante entre les inondations provoquées par l'embâcle de glace de 1994 et la grève d'Hydro-Québec qui eurent lieu au même moment. Peu d'informations au sujet de la gestion du barrage du lac Mitis ont été transmises par Hydro-Québec. Ces témoignages n'ont donc pas pu être tous validés.

⁴² Il est important de nuancer la théorie au sujet de l'écrêtement des crues engendré par la présence d'un barrage, car le mode de gestion du barrage lui-même peut contredire cette théorie. Par exemple, l'ouverture des vannes en synchronisme avec le moment de la crue pour limiter la pression de l'eau sur le barrage peut augmenter le volume d'eau.

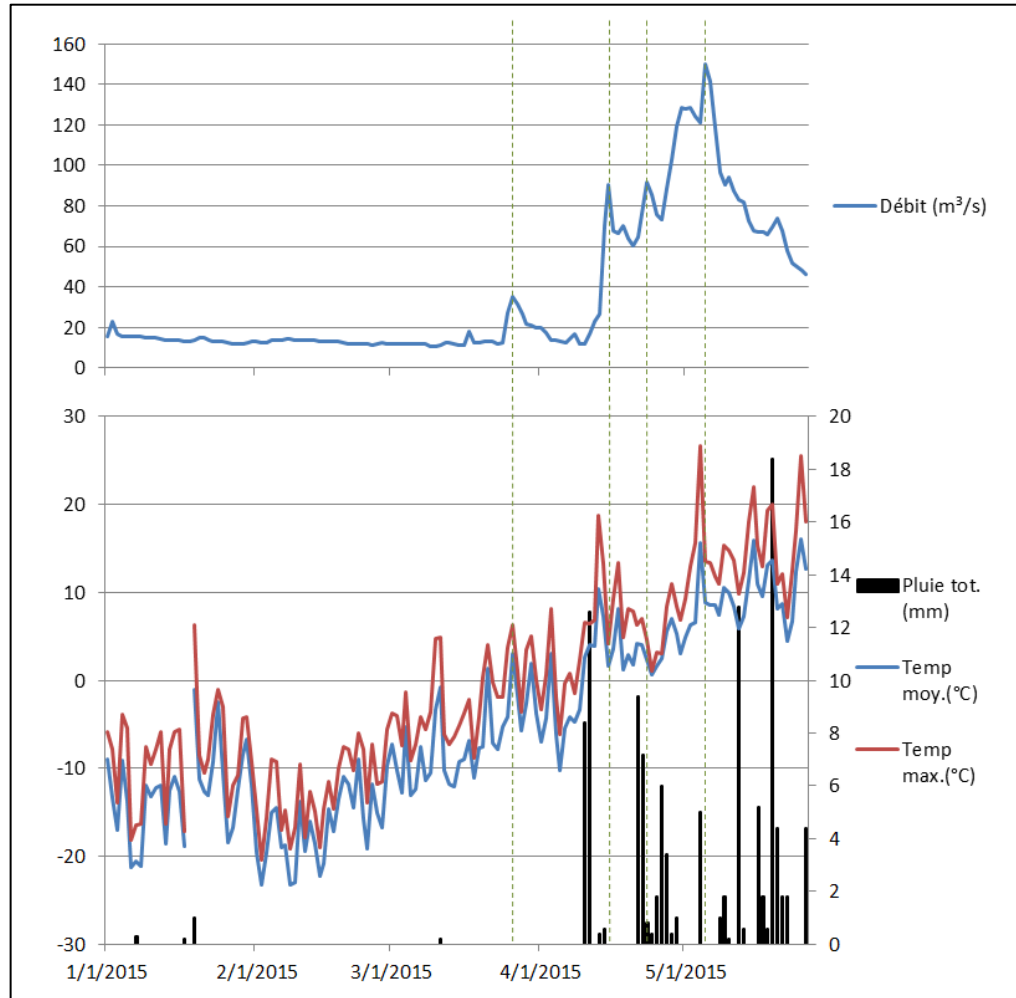


Figure 60 – Débit (m³/s), température (°C) et précipitation (mm) enregistrés entre le 1er janvier et le 26 mai 2015. Sources : Hydro-Québec (débits à la centrale Mitis-1) et Gouvernement du Canada (températures et précipitations à Mont-Joli), 2015.

4.3.2 Constriction, obstruction et comblement de la plaine alluviale et du chenal : remblais, ponts et résidus de dragage

Les remblais, qu'ils soient de type contigu ou de type champignon, deviennent des obstacles lorsqu'ils sont construits sur la plaine alluviale. Par exemple, la route 132 forme une barrière plus ou moins poreuse aux inondations de la rivière Mitis (Figure 61a). Dans

certaines circonstances, lorsque les ponceaux sont inexistant, elle joue un rôle de digue complètement hermétique aux crues ce qui limite la capacité de stockage en eau de la plaine et par le fait même peut contribuer à l'augmentation du niveau d'eau localement (Chave, 2002). En plus du volume de plaine soustrait aux inondations par endiguement, le volume du remblai lui-même occupe la plaine et diminue du même coup la capacité de stockage en eau de celle-ci. Hormis un remblai contigu à la voie ferrée qui correspond à un ancien site d'enfouissement de résidus de bois de la scierie de la compagnie Bowater (Figure 62), les principaux remblais rencontrés sur le site d'étude correspondent à des infrastructures routières et des fondations résidentielles (Figure 61b). Bien qu'empiétant le plus souvent sur la plaine alluviale, les remblais routiers peuvent aussi empiéter directement à l'intérieur du lit mineur. Ce genre de situation est observé en amont de Sainte-Angèle-de-Mérici où l'étréouissement de la plaine ne laisse pas suffisamment de place à l'encrage d'une route. C'est pourquoi à ces endroits le chenal se retrouve contraint par l'encrochement routier du chemin du Portage.

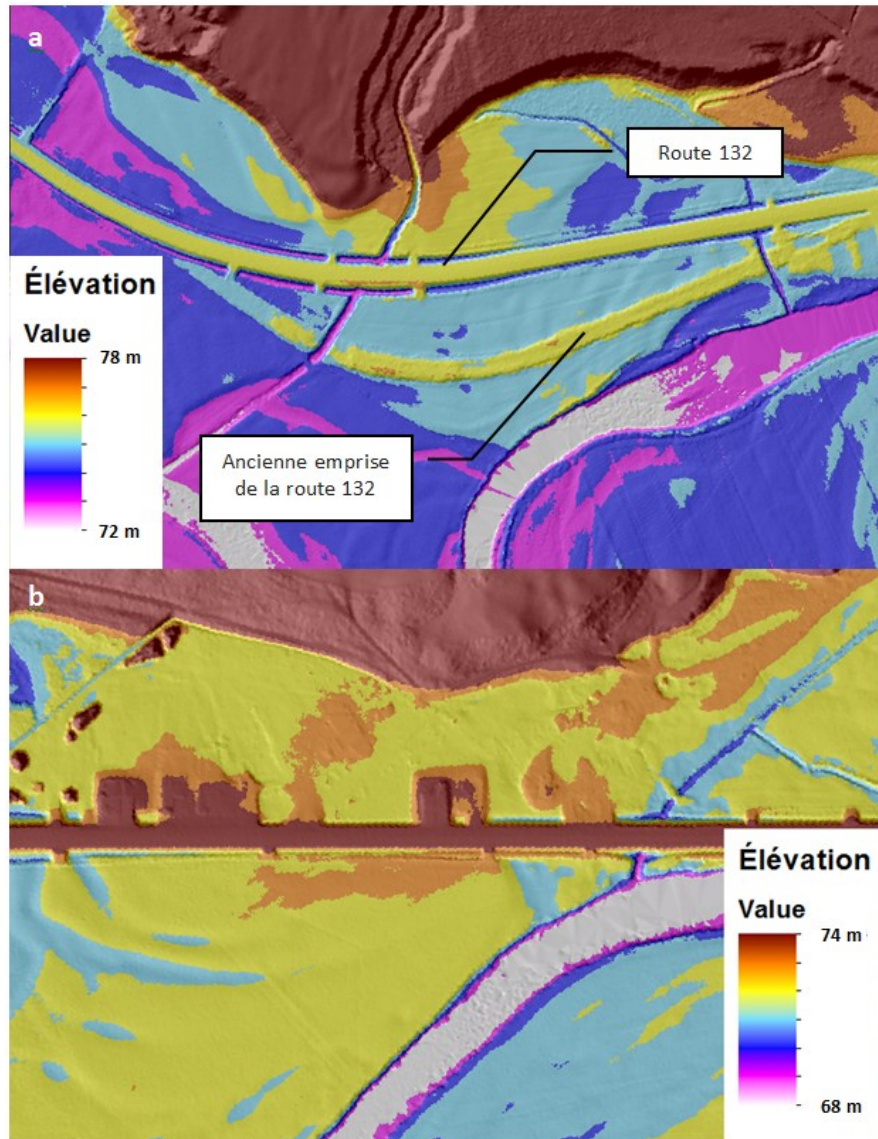


Figure 61 – Illustration des principaux types de remblai rencontrés dans la plaine alluviale de la rivière Mitis. a) remblais d’infrastructure routière; b) remblais d’infrastructure résidentielle contigus à un remblai routier.

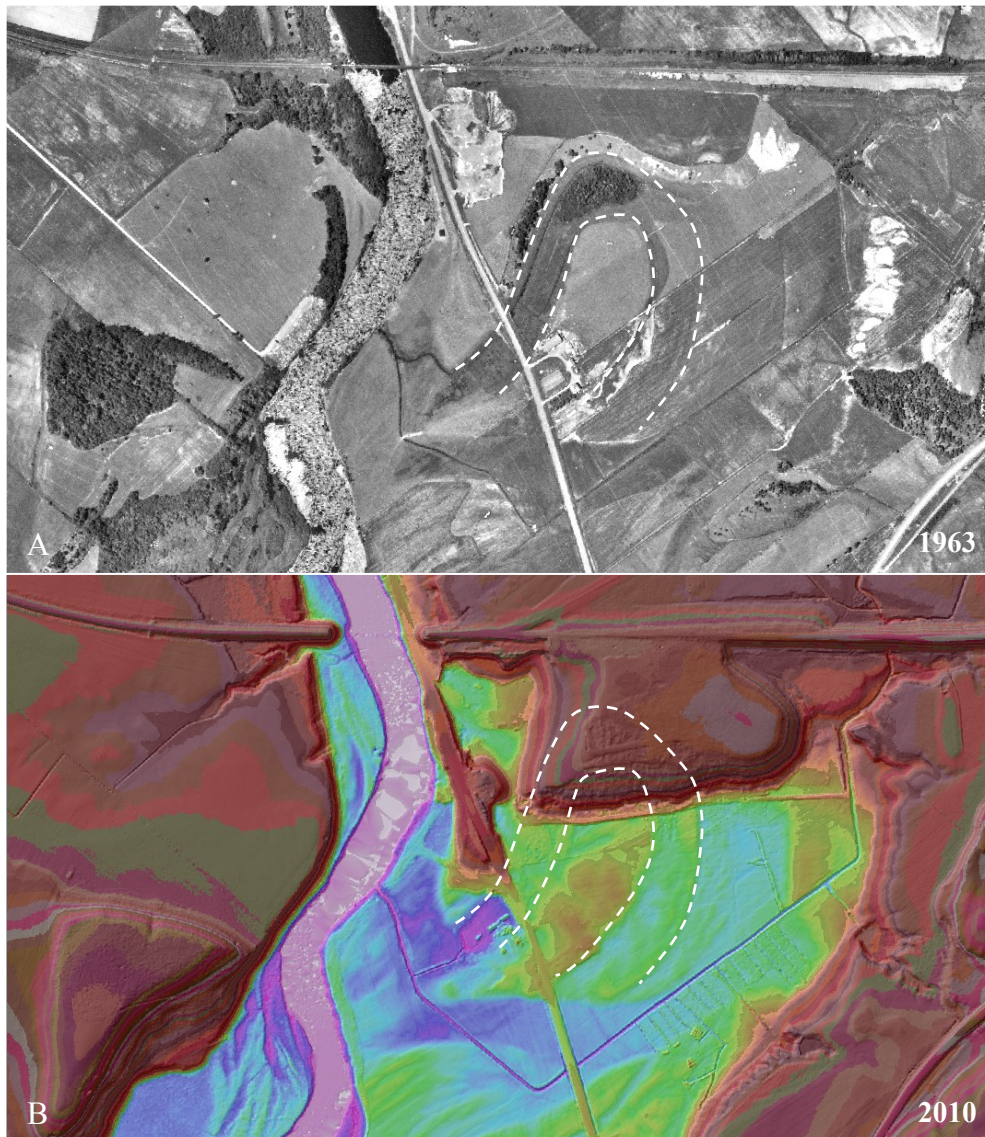


Figure 62 - Remblai contigu correspondant à un ancien site d'enfouissement de résidus de bois de la scierie de la compagnie Bowater (B). Les lignes pointillées correspondent aux limites d'un paléo-chenal (A).

De l'aval vers l'amont du site d'étude, six ponts traversent la rivière Mitis : pont de Price (chemin de Price), pont de la voie ferrée, pont Marcel (route 132), pont Marquis (chemin du Pont Marquis), pont Duplessis (rue Langlais) et pont Sainte-Jeanne-d'Arc (3^e rang). Les ponts contraignent la rivière à s'écouler en un point précis et fixe, ce qui inhibe totalement la mobilité latérale du chenal sur l'axe transversal de la plaine qui passe en ce

point. Comme ceux-ci sont souvent accompagnés et profilés d'un haut remblai qui sert d'assise au tablier de la route, la plaine se retrouve transversalement endiguée ce qui force l'écoulement à s'engouffrer par l'unique voie d'évacuation qu'est l'arche du pont. Ainsi, lorsque la rivière épanche ses eaux sur la plaine alluviale, le niveau de l'eau en amont de ces édifices à tendance à monter et refouler, inondant ainsi des terres de manière récurrente qui n'étaient jusque-là pas ou peu fréquemment inondées, et ce, sur le même principe que les embâcles. D'autre part, plus un pont a de piliers à l'intérieur du lit mineur plus l'écoulement en est entravé et plus il y a de chance d'apercevoir la formation d'embâcle (Arnaud-Fassetta et al., 2009), entraînant ainsi une modification du champ d'inondation en amont de ce dernier (Chave, 2002). C'est pourquoi il est alors légitime de tenir compte des inondations provoquées par les ponts lorsque vient le temps de cartographier les zones inondables.

La crue de 1979 a pu être reconnue comme équivalente à la crue de 2011 en terme de superficie inondée dans le secteur situé entre les ponts Marcel et Marquis alors qu'il existe une différence de $112 \text{ m}^3/\text{s}$ entre celles-ci. Cette similitude pourrait s'expliquer par la surélévation de l'emprise routière de la route 132 en 1980. En effet, en 1979 la crue avait un plus large espace de liberté, car elle pouvait à cette époque franchir la hauteur du remblai de la route 132 facilitant ainsi l'écoulement des eaux de crue vers l'aval. Après 1980, les crues n'ont plus eu d'autres choix que de s'écouler sous le pont de la 132 (Figure 63). Ce goulet d'étranglement rehausse donc probablement le niveau de l'eau et augmente la superficie inondable pour des crues de moins grande fréquence.

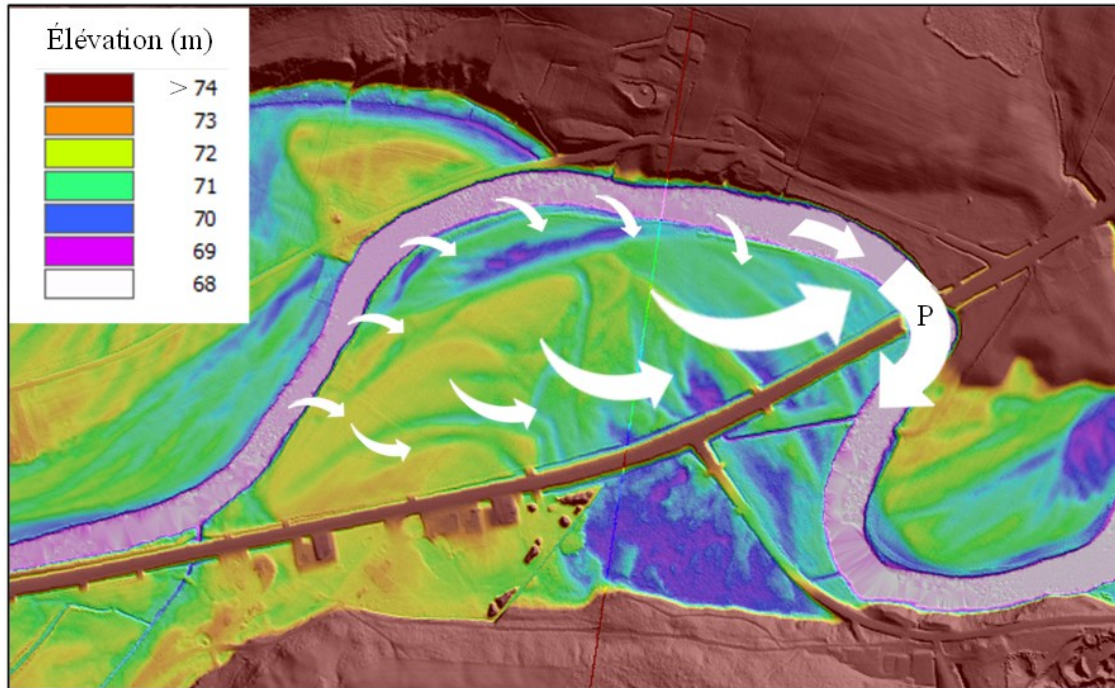


Figure 63 – Constriction de la plaine alluviale de la rivière Mitis causée par le rehaussement de la route 132 en 1980 et la présence du pont Marcel (P) construit en 1936.

Aussi, les résidus de dragage datant de l'époque de la drave qui bordent la rivière sous forme de levée alluviale, endiguent et canalisent l'écoulement en certains endroits de la rivière (Figure 64). Cet endiguement du chenal peut provoquer l'obstruction du chenal en période de débâcle printanière. La grande fréquence de formation des embâcles de glace et le début d'un recouplement de méandre dans le secteur de la rue des Riverains pourraient d'ailleurs en être la cause.

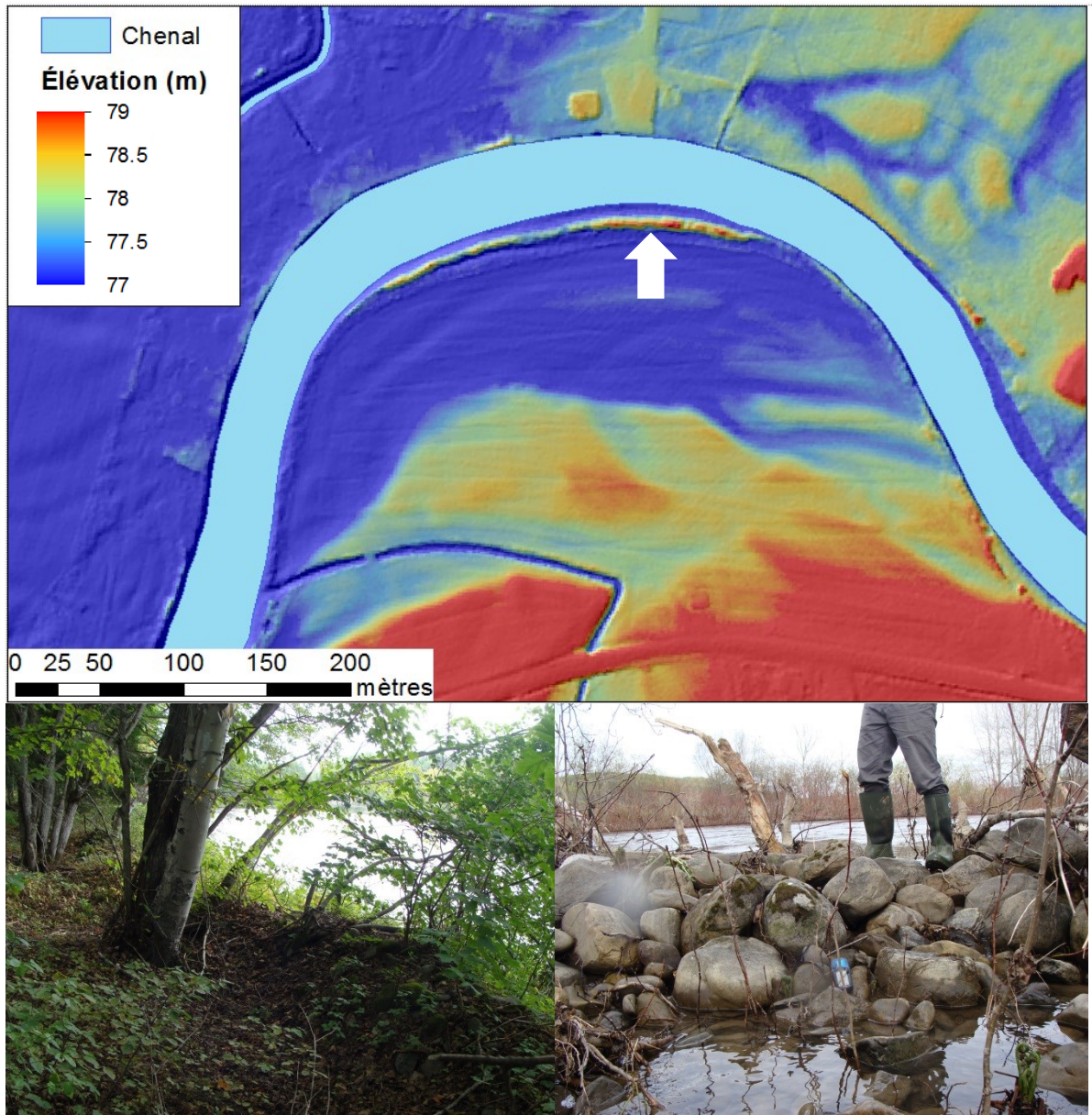


Figure 64 – Résidus de dragage endiguant le chenal de la rivière Mitis.

4.3.3 Excavation dans la plaine alluviale

Bien qu'occupant une très faible proportion de la plaine alluviale, il est possible que les excavations (banc d'emprunt, carrière, dragage de la rivière) puissent avoir un impact sur l'étendue des inondations. En effet, à l'inverse des remblais, celles-ci peuvent représenter des volumes supplémentaires pour le stockage de l'eau à l'intérieur de la plaine alluviale lorsqu'elles se retrouvent connectées aux fluctuations du niveau d'eau de la rivière (surface et/ou aquifère). La connectivité du banc d'emprunt situé non loin de l'embouchure de la rivière Neigette (Figure 65) n'a pas pu être vérifiée, mais son inclusion à l'intérieur de dépôts sableux et de graviers fins littoraux et sublittoraux rend cette hypothèse probable (Desmarais, 1988).

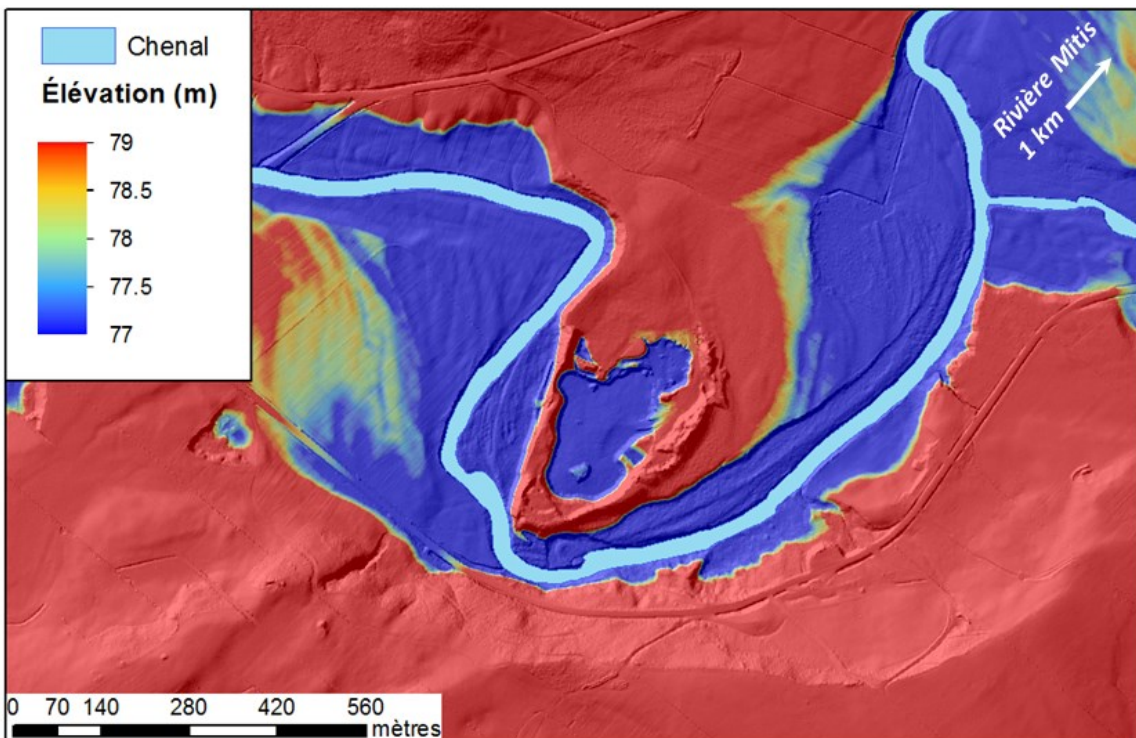


Figure 65 – Excavation dans la plaine alluviale de la rivière Neigette correspondant à un banc d'emprunt (gravière).

4.3.4 Changement climatique et réponse hydrologique

Les changements climatiques peuvent intervenir dans la fréquence des crues, mais aussi dans leur magnitude (GIEC, 2007). Les données climatiques révèlent une hausse significative (p-value = 0,001) des températures moyennes annuelles et des précipitations totales annuelles entre la seconde moitié du XX^e siècle et le début du XXI^e siècle dans le secteur de Rimouski (Figure 66). Une augmentation moyenne de près de 1°C est constatée entre la seconde moitié du XX^e siècle et le début du XXI^e siècle avec un écart maximal de 4,09°C. Pour ce qui est des précipitations totales annuelles, c'est une augmentation moyenne de près de 120 mm (p-value = 0.006) qui est notée entre ces mêmes périodes avec un écart maximal de 559,4 mm (Figure 66). Les débits maximums annuels semblent être corrélés avec ces deux paramètres, car une augmentation moyenne de 31 m³/s (p-value = 0,261) est observée entre ces deux périodes (Figure 66).

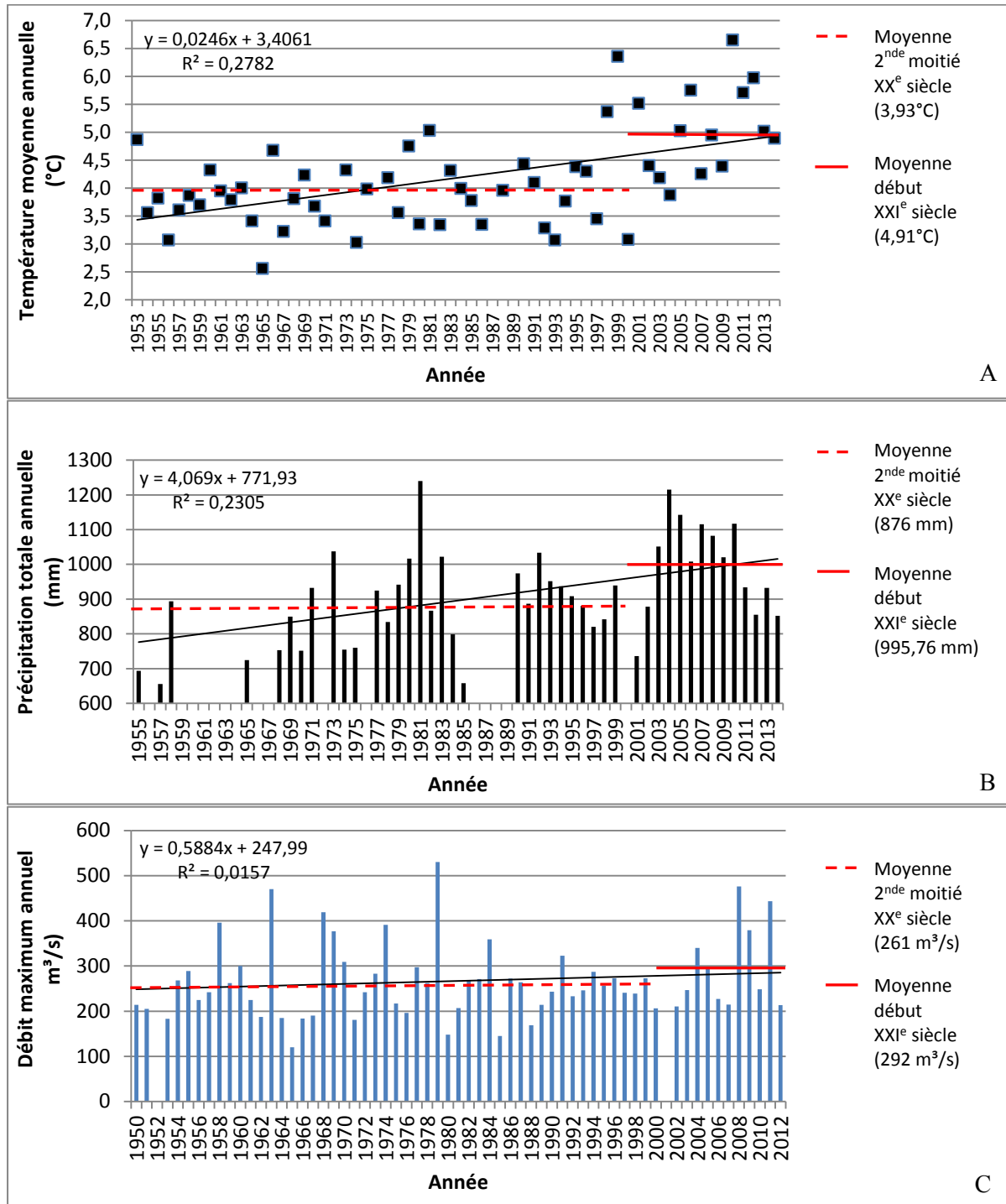


Figure 66 – (A) Températures moyennes annuelles (°C) de 1953 à 2014, (B) précipitations totales annuelles (mm) de 1955 à 2014 et (C) débits maximums annuels (m³/s) de 1950 à 2012 provenant de la station météorologique de Rimouski et des stations hydrométriques 02QA010 et 02QA002 de la rivière Rimouski. Source : Gouvernement du Canada, 2016.

Si la hausse des températures prédite par les modèles se confirme, il se pourrait que l'on observe un pic de crue et des embâcles de glace beaucoup plus tôt au printemps (Saint-Laurent et al., 2009). Cela pourrait également signifier une augmentation du ruissellement hivernal, moins de précipitations neigeuses, une hydraulicité plus forte en hiver et par le fait même un pic de crue moins prononcé lors de la fonte des neiges (Laforce et al., 2011; CEHQ, 2015a; Buffin-Bélanger et al., 2015a). D'autre part, la hausse des précipitations aura un effet sur la fréquence des inondations, mais aussi sur la variabilité des débits solides et liquides (Buffin-Bélanger et al., 2015a; Lane et al., 2007; Saint-Laurent et al., 2009).

Les modèles pour le Canada et le nord-ouest des États-Unis prédisent des précipitations hivernales plus abondantes et de faibles quantités d'eau en été. Pour le secteur de Rimouski, la hausse des précipitations hivernales est déjà observée depuis la moitié du XX^e siècle (Figure 67), alors que la hausse des précipitations estivales pour cette même période semble démentir la tendance projetée par les modèles à l'échelle du Canada. De nombreuses études canadiennes ont également prédit une diminution des écoulements à l'automne (Laforce et al., 2011). La tendance à la hausse des précipitations automnales observée à Rimouski sur la période de 1953 à 2012 semble ne pas converger vers cette prédiction (Figure 67). Cela dit, en zoomant de plus près, la dernière période (1993-2012) montre une augmentation moins importante, ce qui pourrait laisser croire à un changement de tendance à court terme. Ce changement est d'ailleurs vérifiable sur la plupart des modèles de l'atlas hydroclimatique du Québec méridional. En effet, ceux-ci prévoient une faible diminution, voire une stabilisation des débits moyens automnaux pour le bassin versant des rivières Mitis et Rimouski pour l'horizon 2040-2070 (CEHQ, 2015a).

La non-représentativité des données saisonnières (été/automne) peut s'expliquer par la localisation maritime de Rimouski, car les études d'ampleur fédérale comptabilisent de vastes secteurs (ex. : les Prairies) dont le contexte continental influence principalement un déficit hydrique (Ouellet et al., 2012). Si l'on infère et l'on projette dans le futur la hausse des précipitations saisonnières de la Figure 67 au régime hydrologique de la rivière Mitis, il

est certain que l'on peut s'attendre à une hausse généralisée des débits. Toutefois, l'atlas hydroclimatique du Québec méridional confirme seulement une hausse des débits moyens saisonniers pour les périodes hivernale et printanière (CEHQ, 2015a).

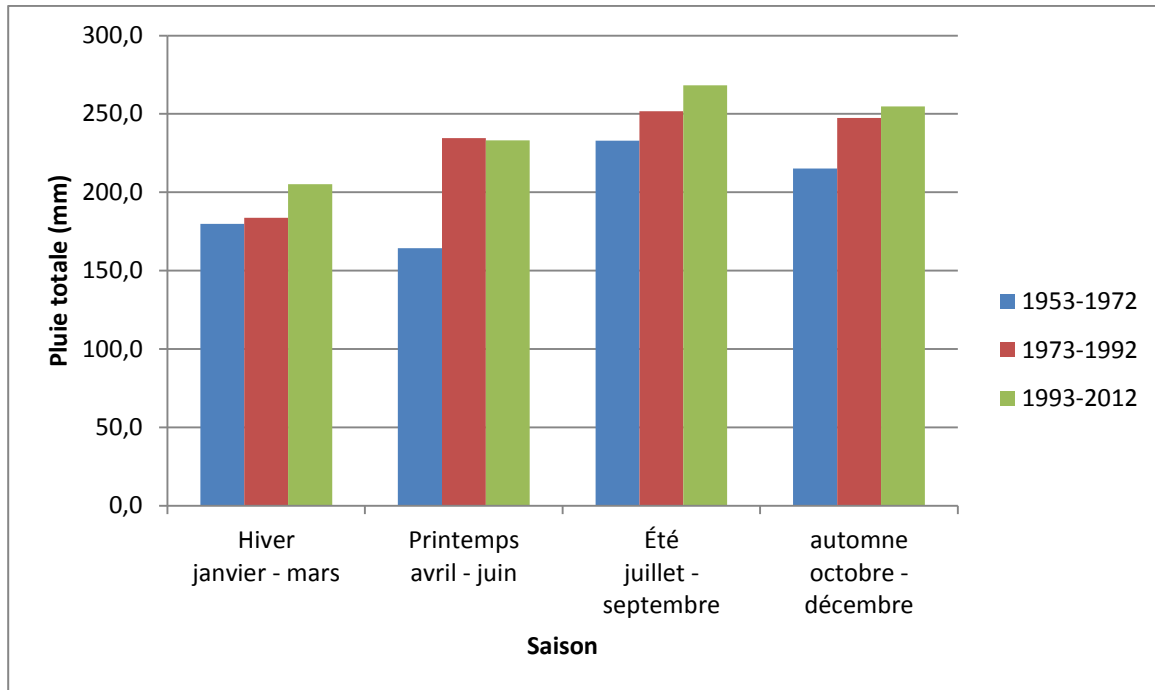


Figure 67 – Pluie totale (mm) en fonction de la saison pour les périodes de 1953 à 1972, 1973 à 1992 et 1993 à 2012 provenant de la station de Rimouski. Source : Gouvernement du Canada, 2015.

Contrairement aux études fédérales, les études provinciales ont tendance à davantage refléter les observations constatées pour la région de Rimouski (Laforce et al., 2011; Minville et al., 2008). Pour les bassins versants des rivières du Nord et Châteauguay, les modèles climatiques produits par Laforce et al. (2011) prédisent une hausse progressive des températures et des précipitations jusqu'à l'horizon 2080. Pour la région de la rivière Péribonka, Minville et al. (2008) vont même jusqu'à estimer un réchauffement saisonnier de 1 à 14°C et une variation de 9 à 55 % des précipitations saisonnières avec les plus grands changements attendus en hiver et au printemps. Globalement, une augmentation des débits saisonniers (pour les trois horizons de temps) est annoncée, hormis en été pour les horizons 2020 et 2050 où c'est l'inverse qui est pronostiqué (Minville et al., 2008).

L'étude menée par Buffin-Bélanger et al. (2015a) sur les bassins versants des rivières Matane, Yamaska-Sud-Est et de La Roche prévoit également des précipitations totales annuelles à la hausse et un réchauffement anticipé de +4°C d'ici l'horizon 2080 (T°C moy./an). Étant donné que la rivière Mitis est située à une cinquantaine de kilomètres à l'ouest de la rivière Matane, il n'est probablement pas faux d'extrapoler les résultats prédits pour la Matane à la Mitis. Il n'est donc pas improbable que dans un futur proche une diminution des débits printaniers dus à une augmentation des précipitations liquides hivernales soit observée. La plus grande fréquence des crues hivernales entraînera une plus grande occurrence des embâcles de glace (Buffin-Bélanger et al., 2015a).

Aussi, les modèles développés pour la Matane suggèrent une augmentation des débits de récurrence 2 ans pour les horizons 2050 et 2080 avec un essoufflement des débits de récurrence 20 et 100 ans (Buffin-Bélanger et al., 2015a). L'atlas hydroclimatique du Québec méridional va également dans ce sens en prédisant une diminution probable du volume des crues printanières de récurrence 20 ans pour l'horizon 2050 dans le cas de la rivière Mitis, mais ne prévoit aucune variabilité pour le débit de pointe des crues printanière de récurrence 20 ans (CEHQ, 2015a). Autre fait intéressant à souligner, l'atlas prévoit une augmentation très probable du débit de pointe des crues estivales et automnales de récurrence 20 ans (CEHQ, 2015a).

Selon certains auteurs, l'augmentation du nombre d'évènements de précipitations extrêmes prévue dans le sud du Québec causera de plus en plus de dommages en lien avec les inondations, car c'est là que l'essentiel de la population se concentre (Minville et al., 2008; Ouellet et al., 2012).

4.3.5 Géométrie et rugosité du chenal et de la plaine alluviale

Des redoux soudains et des précipitations liquides abondantes au cours de l'hiver ou au début du printemps peuvent déclencher la débâcle mécanique du couvert de glace de la

rivière et ainsi augmenter considérablement le risque de formation d'embâcles de glace. Certains tronçons de rivière, de par leur configuration, sont plus propices à la formation d'embâcles. La forte sinuosité, le rétrécissement du chenal et la présence de bancs d'accumulation peuvent entre autres favoriser davantage l'obstruction de la rivière par accumulation de glaces ou de bois morts, ce qui peut augmenter localement la fréquence et l'étendue des inondations. Indirectement, si l'obstruction du chenal est récurrente à l'intérieur de méandres prononcés, des recoupements de méandre peuvent avoir lieu (Smith et Pearce, 2002).

La rugosité du lit et de la plaine alluviale peut également influencer l'étendue des inondations. C'est pourquoi le n de Manning figure dans les principaux paramètres en entrée des modèles hydrauliques. Plus la rugosité est grande, plus la vitesse du courant est ralentie et plus l'étendue inondée peut être grande. Les irrégularités dans la configuration du chenal, la variabilité dans la taille et la forme des sections du chenal, les obstructions (débris, piliers, blocs, troncs...), la granulométrie du lit et des berges, la densité de la végétation présente dans le chenal et le degré de méandrisation sont les paramètres qui font varier la rugosité du chenal. Pour ce qui est de la rugosité de la plaine alluviale, ce sont les irrégularités de la surface (dépressions, reliefs, milieux humides...), la variabilité dans la géométrie de la plaine, les obstructions (identiques à celles du chenal) et le type de couverture végétale (Arcement and Schneider, 1989). De plus, une certaine variabilité saisonnière est à considérer, car la densité végétale peut varier du tout au tout entre l'hiver et l'été. L'été, la présence du feuillage peut notamment augmenter la rugosité. De ce fait, un débit similaire en été et en hiver peut avoir une portée de champ inondable différente. Le type de végétation et la superficie végétalisée sont des indicateurs prévalant dans la variabilité de la rugosité de la plaine.

La variabilité temporelle de la rugosité de la plaine alluviale de la rivière Mitis aurait pu expliquer la similarité des surfaces inondées lors des crues de 1979 et 2011 (différence de $112 \text{ m}^3/\text{s}$ entre ces deux crues). Toutefois, très peu de différences sont constatées au niveau de la végétalisation du territoire entre les images aériennes de 1963 et de 2014. Dans

ce cas, les hypothèses d'un embâcle de glace en 2011 et du rehaussement de la route 132 en 1980 sont les hypothèses les plus plausibles. Il y a également une troisième hypothèse qui n'avait jusque-là pas été soulevée⁴³ et qui peut autant intervenir sur la rugosité du chenal que sur la forme du chenal. Il s'agit du dragage du chenal pour faciliter la descente des billots de bois qui se faisait à l'époque de la drave. En effet, dans le bassin versant de la rivière Mitis, la drave s'est faite jusqu'en 1979. On peut supposer que le dragage du lit mineur maintenait le talweg de la rivière Mitis à un niveau beaucoup plus bas que celui d'aujourd'hui. Depuis que les opérations de dragage se sont arrêtées, il est fort probable qu'un ajustement par aggradation du lit se soit produit et ait ainsi rehaussé le niveau du talweg. Pour ces raisons, il faut une crue de moins grande amplitude pour atteindre les limites de crues aussi importantes que celles qui étaient observées avant 1979 (le niveau plein bord étant atteint plus rapidement aujourd'hui). Si cette hypothèse ou une autre s'avérait être vraie, il est clair que cela donnerait tort aux riverains qui incriminaient Hydro-Québec dans la part de responsabilité des inondations de 2011. Par le fait même, cette situation montre à quel point les activités humaines (tout comme la protection par les digues) peuvent effacer la culture du risque et entretenir de fausse perception de sécurité à long terme, car rappelons-le, certains riverains disaient ne jamais avoir été inondés auparavant.

4.3.6 Perspectives sur la pérennité de la cartographie

Afin d'émettre des recommandations sur la durabilité de la cartographie HGM de la rivière Mitis, un bilan sédimentaire aurait été intéressant à produire. En effet, les fluctuations du régime hydrosédimentaire (apport/érosion, transit et accumulation) influent énormément sur la pérennité de la cartographie, car il existe un lien direct avec l'étendue des inondations (Lane et al., 2007). Toutefois, la campagne de terrain pour la segmentation

⁴³ Et probablement d'autres hypothèses insoupçonnées comme la différence de forme des hydrogrammes de crue.

de la plaine alluviale à l'étude et l'analyse historique des photographies aériennes permettent de dire que le dynamisme de la rivière Mitis est très limité dans un horizon de 50 ans et par le fait même que les apports sédimentaires semblent très restreints.

Pour ce qui est de la robustesse de la cartographie HGM face aux changements climatiques futurs, si l'on infère les analyses de la Matane à la Mitis, les fluctuations positives de la courbe enveloppe des inondations maximales ne devraient pas excéder de plus de 10 % en superficie les zones inondables HGM cartographiées dans le plus pessimiste des scénarios projetés (Biron et al., 2013). Ces surfaces inondées additionnelles sont souvent associées à l'empiètement de la zone inondable sur les versants de l'encaissant. L'impact des changements climatiques sur l'étendue des zones inondables est donc surtout fonction de la configuration des versants : pente abrupte ou progressive (Biron et al., 2013).

Les changements observés dans l'occupation des sols et l'exploitation de la ressource en eau peuvent remettre en cause la cartographie des zones inondables. Par exemple, l'intensification ou l'extension des pratiques agricoles sur le territoire du bassin versant peuvent accroître le ruissellement et la concentration des écoulements (Ballais et al., 2011b; Ouellet et al., 2012). Aussi, la gestion des barrages a un impact direct sur l'étendue des inondations. Par contre, il est très difficile d'anticiper l'évolution du mode de gestion futur des barrages ou une erreur humaine/technique préjudiciable tel qu'il fut constaté lors du déluge du Saguenay en 1996.

Les décisions futures concernant l'aménagement du territoire auront une influence potentielle sur les limites des zones inondables de la cartographie HGM. Par exemple : le retrait, l'ajout ou la modification d'infrastructures comme les ponts et les remblais pourraient interférer avec l'étendue des crues. Il faudra alors judicieusement penser à leur implantation et à leur conception avant leur mise en œuvre sur le territoire (exemple pour les ponts : tirant d'air, largeur des arches, nombre et largeur des piliers à l'intérieur du lit mineur...).

4.4 CONCLUSION

La pertinence de l'approche HGM dans sa forme intégrée peut se résumer en cinq grandes catégories d'avantages : 1) une meilleure compréhension du milieu fluvial et de son fonctionnement, 2) une prise en considération de l'intégrité de la plaine alluviale, 3) une adaptation à l'unicité de chaque environnement fluvial, 4) une adéquation avec la législation du Québec et 5) une compatibilité avec un mode de gestion intégrée et durable.

Étant donné que la méthode géomorphologique est souvent la méthode promue dans l'utilisation de l'approche HGM, il s'avère primordial de vérifier son applicabilité à travers une analyse du niveau de confiance du tracé géomorphologique. Cet exercice, bien qu'exécuté après le processus cartographique, a permis d'appuyer le choix de la démarche cartographique pour la délimitation des zones inondables de la plaine alluviale de la rivière Mitis. Somme toute, il est évident que même avec un niveau de confiance élevé, la cartographie géomorphologique, tout comme la cartographie des approches conventionnelles, est susceptible d'être remise en question dès l'instant où un des paramètres pouvant intervenir sur la magnitude et la fréquence des crues à un effet significatif sur le milieu fluvial.

CONCLUSION GÉNÉRALE

La cartographie HGM au Québec à son stade d'évolution le plus récent à tendance à s'appliquer de concert avec les autres approches. Le développement et l'application de la cartographie HGM sur la plaine alluviale de la rivière Mitis ont effectivement pu confirmer cette tendance. Il y a deux ans, en commençant la cartographie HGM de la rivière Mitis, je souhaitais appliquer à la lettre l'approche HGM par modèles tels que définis par Demers et al. (2014). Toutefois, au fur et à mesure que je l'appliquais, j'observais une inadéquation en raison notamment d'un contexte fortement perturbé par les activités humaines et le manque de données topographiques précises dans certains secteurs. Bien que dans le cas de la rivière Mitis la théorie qui encadre le seuil de 75 W/m^2 se soit révélée vraie pour ce qui est de la loi qui associe la proportion inondable de la plaine en fonction de la puissance spécifique d'un tronçon homogène, une certaine contradiction demeure autour de la relation puissance/assemblage des formes⁴⁴. En effet, dans les sections de plaine alluviale où la puissance spécifique est inférieure à 75 W/m^2 , un agencement de formes d'érosion habituellement retrouvé dans les plaines complexes subsiste. Cette ambiguïté restera singulière tant et aussi longtemps que la lumière ne sera pas totalement faite sur la diversité alluviale du Québec méridional ou qu'une étude spécifique sur l'impact de l'homme sur la composition géomorphologique de la plaine alluviale n'ait été entreprise pour ce secteur de la Mitis.

Lors de la cartographie des zones inondables de la plaine alluviale de la rivière Mitis quelques secteurs se sont avérés difficiles à cartographier ou en conflit avec les fondements soutenus par la théorie fluviale. Ce fut bien sûr notamment le cas pour le secteur en aval du pont ferroviaire (segment D) dont le niveau de base est directement contraint par le

⁴⁴ Assemblage de formes = type de plaine = simple ou complexe.

réservoir du barrage de la centrale Mitis-1. Le secteur en amont de la voie ferrée (segment C) est également sujet à une remise en question des limites de la cartographie HGM en raison de la présence du barrage Mitis-1 qui crée une rétention des sédiments et un ajustement potentiel de la pente du lit. Dans ce cas, il est pertinent de se demander si les caractéristiques géomorphologiques de la plaine alluviale en amont du barrage reflètent encore les conditions du régime hydrologique actuel ? Si oui, pour combien de temps ? Ces questions peuvent aussi se poser pour les autres segments qui sont sous l'influence du régime hydrologique homogénéisé du barrage du lac Mitis. Enfin, le contexte diachronique de la plaine alluviale du ruisseau Bernier n'a pas permis d'aboutir sur une cartographie robuste des zones inondables. La morphogénèse de cette plaine semble davantage découler d'un régime hydrosédimentaire glaciaire qu'un régime hydrosédimentaire alluvial. D'ailleurs, les cartes de dépôts de surface indiquent des dépôts pro-glaciaires de type épandage dans l'environnement du ruisseau. Trop peu d'indices de crue satisfaisants pour qualifier la cartographie HGM de ce secteur à sa juste valeur ont été retrouvés. Les différences d'échelle et de contexte sédimentaire entre les plaines alluviales des cours d'eau Mitis et Bernier n'ont pas permis de recourir à l'inférence.

Il est bon de rappeler que la cartographie HGM rattachée à ce mémoire reste la description d'une situation à un temps donné et que les surfaces inondables et non inondables qui y sont désignées peuvent être remises en cause en tout temps, et ce, par de nombreux facteurs. Toutefois, ceci ne discrédite en rien ce qui a pu être fait et ces surfaces resteront assignées à leurs statuts d'inondabilité jusqu'à preuve du contraire. Ces faits sont également valables pour la plupart des cartographies des zones inondables de ce monde. Aussi, il est important de souligner qu'une surface désignée inondable est certainement plus inondable qu'une surface qui ne l'est pas. Autrement dit, la probabilité qu'une surface non inondable soit inondée n'est pas impossible. Cependant, cette probabilité reste bien évidemment plus faible que pour une surface désignée inondable. Enfin, le terme « surface » employé ici spécifie que l'inondabilité a été démontrée en surface et non sous la surface. Cette nuance est importante, car cela dissocie les inondations provoquées par la nappe des inondations provoquées par la rivière. La personne qui consulte la cartographie

est donc avertie que les surfaces spécifiées non inondables ne veulent pas forcément dire que le sous-sol ne l'est pas. Sinon, l'usage du terme « surface d'exfiltration » est indiqué pour des surfaces inondées par la nappe phréatique, ce qui inclue donc l'inondabilité du sous-sol.

L'issue de l'insertion d'une telle cartographie auprès de la communauté locale n'était pas l'objet de ce mémoire même si pourtant le choix des démarches fut teinté et précédé de réflexions anticipatives quant à la cohérence avec le cadre normatif assujetti à la province auquel la MRC est contrainte. Le développement législatif de la cartographie HGM de la rivière Mitis se poursuivra dans le cadre du doctorat de Simon Massé qui a notamment pour objectif de faciliter le transfert des connaissances HGM auprès des institutions municipales ainsi que dans le cadre d'un projet de recherche HGM financé par le MSP et le fond Vert du Québec et dont Sylvio Demers est le chargé de projet. Des tables de concertations sont prévues avec les acteurs de la MRC pour décider des différents niveaux de sévérité à attribuer aux aléas d'inondation dans le but d'élaborer un zonage de contraintes à l'aménagement. Des décisions devront être prises concernant les unités HGM dont la fréquence d'inondation est incertaine ou non déterminée et il sera l'occasion d'utiliser le MNZI pour estimer une zone de faible courant et ainsi intégrer la cartographie HGM au schéma d'aménagement de la MRC de La Mitis comme il avait pu être fait en 2014-2015 pour la cartographie HGM de la rivière Bonaventure.

Le premier objectif spécifique a permis de mettre en évidence la possibilité d'une intégration de l'approche HGM dans le cadre d'analyse des institutions québécoise pour ce qui est de la gestion des risques d'inondation. Son développement constant ne devrait pas être pris comme un manque de fiabilité, mais plutôt comme l'opportunité de laisser évoluer la démarche de manière à ce que l'on puisse toujours bénéficier des techniques et des façons de faire les plus optimales, chose que l'on ne se permettait pas avec l'approche HHS et qui a fini par aboutir à l'inadéquation des cartographies avec les réalités du terrain. La cartographie des zones inondables HGM de la rivière Mitis permet de confirmer la nécessité d'adapter la démarche cartographique au contenu de l'environnement fluvial. Plus

l'environnement fluvial est longitudinalement hétérogène, plus le recours à l'emploi de plusieurs méthodes est nécessaire pour obtenir une cartographie continue et robuste de l'aléa d'inondation. Il est donc primordial d'accepter que l'approche HGM soit perçue comme une approche de type combiné (flexible) et de se défaire de l'idéologie qui soutient qu'une démarche tend à être parfaite lorsqu'elle est standardisée. Cette redéfinition de l'approche HGM aurait pu également mener à une renomination de celle-ci. Cependant, ceci aurait effacé tous les efforts de promotion faits jusqu'à présent sous l'appellation « hydrogéomorphologique » qui est désormais bien intégré dans le langage des institutions gouvernementales.

Tant et aussi longtemps qu'il n'existera pas de revue exhaustive à propos de la diversité des plaines alluviales du Québec méridional, l'élaboration d'une trajectoire géomorphologique ou d'une segmentation morphogénétique de la plaine alluviale restera une étape préalable indispensable pour aborder la cartographie des zones inondables et anticiper la démarche cartographique la plus appropriée au contexte local. Dans ce sens, il convient également de considérer de placer l'évaluation du niveau de confiance en étape préopératoire, car elle permet de faire un choix éclairé quant à la trajectoire méthodologique à emprunter compte tenu du niveau d'optimisation qu'il est possible d'atteindre via l'interprétation géomorphologique.

La présence/absence des relevés LiDAR a montré à quel point il était indispensable de posséder des informations topographiques de hautes précisions pour octroyer un haut niveau de certitude/précision au tracé géomorphologique. La puissance informative des relevés LiDAR a également été forte utile dans le cadre de la modélisation historique de la crue de référence de 2011. C'est donc grâce à la complémentarité des différentes méthodes utilisées et dans une certaine proportion à la grande résolution spatiale apportée par les relevés LiDAR, que la cartographie des zones inondables de la plaine alluviale de la rivière Mitis a pu atteindre un tel niveau de détails. Aucun travail antérieur n'est comparable à ce qui a pu être fait ici en termes de quantité et de qualité de résultats restitués. Ce travail original sera utile pour les communautés (même si des ajustements restent à faire), mais

surtout, il aura su illustrer de manière convaincante la pluralité de l'approche HGM. Par conséquent, il offre une contribution majeure à l'aménagement du territoire en lien avec le risque d'inondation et il en va de même pour le portrait historique de l'approche HGM au Québec. À l'avenir, il sera primordial de s'assurer de bien transmettre l'approche, car elle a fortement évolué.

ANNEXES

Annexe 1 - Description des stations hydrométriques.

*Source : CEHQ
Rivière Rimouski, 022003 et 022001*

Numéro de la station : 022003
Nom de la station : Rimouski
Description : À 3,7 km en amont du pont-route 132
État : Station ouverte
Période(s) d'activité : De octobre 1962 à aujourd'hui
Municipalité : Rimouski
Région administrative : Bas-Saint-Laurent
Lac ou cours d'eau : Rimouski, Rivière
Région hydrographique : Saint-Laurent sud-est
Bassin versant à la station : 1 615 km²
Régime d'écoulement : Influencé journallement
Numéro fédéral de la station : 02QA002

Numéro de la station : 022001
Nom de la station : Rimouski
Description : À 3,7 km en amont du pont-route 132
État : Station fermée
Période(s) d'activité : De février 1923 à septembre 1962
Municipalité : Rimouski
Région administrative : Bas-Saint-Laurent
Lac ou cours d'eau : Rimouski, Rivière
Région hydrographique : Saint-Laurent sud-est
Bassin versant à la station : 1 610 km²
Régime d'écoulement : Influencé mensuellement
Numéro fédéral de la station : —

Les stations 022003 et 022001 sont localisées dans le même secteur de la rivière Rimouski. Celles-ci couvrent deux périodes d'enregistrement qui se succèdent dans le temps. Les stations 022003 et 022001 ont été choisies pour la transposition, car elles sont situées à moins de 40 km à l'ouest de la centrale de Price.

Source : Hydro-Québec
Rivière Mitis, barrage de la centrale Mitis-1

Numéro du barrage : X0000536
Nom du barrage : Barrage de la Mitis-1
Description : Rue Saint-Paul
État : Fonctionnel
Période(s) d'activité : Depuis 1923
Municipalité : Price
Région administrative : Bas-Saint-Laurent
Lac ou cours d'eau : Mitis, Rivière
Région hydrographique : Saint-Laurent sud-est
Bassin versant à la station : 1 796 km²
Type de régime hydrologique : Naturel
Catégorie administrative : Forte contenance
Longueur de refoulement : 2 000 m

Source : Gouvernement Canada
Rivière Mitis, centrale de Price, 02QA003

En service ou fermée :	Fermée	Province / Territoire :	Québec
Latitude :	48° 37' 19" N	Longitude :	68° 08' 15"
Superficie brute du bassin versant :	1800 km ²	Superficie effective du bassin versant :	N. D.
Période :	74 ans	Durée de la période des mesures	1921 - 1994
Régime hydraulique :	Régulation	Période :	N. D.
Données en temps réel disponibles :	Non	Données sur les sédiments disponibles :	Non
Type de plan d'eau :	Rivière	Réseau hydrométrique de référence :	Non
Bureau régional d'Environnement Canada :	MONTREAL		
Données fournies par :	QUEBEC HYDRO-ELECTRIC COMMISSION		
Repère des données publiées :	ARBITRAIRE		

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Anctil F., Martel F. et Hoang V. D. (1998) Analyse régionale des crues journalières de la province du Québec. *Canadian Journal of Civil Engineering*, vol. 25, n° 2, pp. 360-369
- Arcement G.J. et Schneider V.R. (1989) Guide for selecting Manning's roughness coefficients for natural channels and floodplains. United States Geological Survey Water-Supply Paper 2339, pp. 1-38.
- Arnaud-Fassetta G., Astrade L., Bardou É., Delahaye D., Fort M., Gautier E., Jacob N., Peiry J.-L., Piégay H. et Penven M.-J. (2009) Fluvial geomorphology and flood-risk management. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, vol. 1 (2009), n° 2, pp. 109-128
- Ashmore P.A. (2015). Towards a sociogeomorphology of rivers, *Geomorphology*, vol. 251, pp. 149-156
- Bagnold R.A. (1966) An approach to the sediment transport problem from general physics. In: Thorne C. R., MacArthur R. C. et Bradley J.B. (eds.), *The Physics of Sediment Transport by Wind and Water. American Society of Civil Engineers*, New York, pp. 231–291
- Bailly A. (2001) Les concepts de la géographie humaine. A. Colin (éditeur), Paris, 5^e éd., Collection U. : Série Géographie, 333 p.
- Baker V. R. (1975) Flood Hazards along the Balcones Escarpment in Central Texas: Alternative Approaches to their Recognition, Mapping, and Management. Bureau of Economic Geology, *Geological Circular*, vol. 75, n° 5, 22 p.
- Baker V. R. (1976) Hydrogeomorphic methods for the regional evaluation of flood hazards. *Environmental Geology*, vol. 1, n° 5, pp. 261-281
- Baker V. R. (1994) Geomorphological understanding of floods. *Geomorphology*, vol. 10, n° 1-4, pp. 139-156
- Ballais J.-L., Garry G., et Masson M. (2005) Contribution de l'hydrogéomorphologie à l'évaluation du risque d'inondation : le cas du Midi méditerranéen français. *Comptes Rendus Geoscience*, vol. 337, n° 13, pp. 1120–1130

- Ballais J.L., Chave S., Delorme V., et Esposito C. (2011a) Le lit majeur exceptionnel: premier bilan. *Revue Géographique de l'Est*, vol. 51, n° 3-4.
- Ballais J. L., Chave S., Dupont N., Masson É. et Penven M.J. (2011b) La méthode hydrogéomorphologique de détermination des zones inondables. *Physio-Géo*, vol. 5 (2011), Varia 2011, 168 p.
- Ballesteros-Cánovas J. A., Stoffel M., St George S. et Hirschboeck K. (2015) A review of flood records from tree rings. *Progress in Physical Geography*, vol. 39, n°6, pp. 794-816
- Beaudry-Pilotte J., Gagnon-Grenier É. et Randall B. (2012) Vers une cohabitation harmonieuse sur la rivière Mitis. Dans le cadre de l'Éco-stage Katimavik, 35 p.
- Bergeron A. et Charest C. (2011) Notes de la visite effectuée par Annie Bergeron et Cédric Charest en date du 5 mai 2011 entre 9h55 et 10h05 après le pic de crue de la rivière Mitis. MRC de La Mitis.
- Besnard C., Demers S. et Buffin-Bélanger T. (à soumettre) Évolution de l'approche hydrogéomorphologique au Québec. *Revue canadienne des ressources hydriques*.
- Biron, P., Buffin-Bélanger, T., Larocque, M., Demers, S., Olsen, T., Ouellet, M. A., Choné, G., Cloutier, C. A. et Needelman, M. (2013) Espace de liberté: Un cadre de gestion intégrée pour la conservation des cours d'eau dans un contexte de changements climatiques. Rapport remis à Ouranos. 122 pages + annexes.
- Bizzi S., Lerner D. N. (2015) The use of stream power as an indicator of channel sensitivity to erosion and deposition processes. *River Research and Applications*, vol. 31, n°1, pp. 16-27
- Blair T. C. et McPherson J. (1994) Alluvial fans and their natural distinction from rivers based on morphology, hydraulic processes, sedimentary processes and facies assemblages. *Journal of sedimentary research*, vol. A64, n° 3, pp. 450-489
- Bockheim J. G. (2005) Soil endemism and its relation to soil formation theory. *Geoderma*, vol. 129, n° 3-4, pp. 109-124
- Brown A.G. (1990) Holocene floodplain diachronism and inherited downstream variations in fluvial processes; a study of the River Perry, Shropshire, England. *J. Quat. Sci.*, vol. 5, n°1, pp. 39-51
- Buffin-Bélanger T. et Héту B. (2008) Les risques d'inondation sur les cônes alluviaux dans l'est du Québec. Comptes rendus de la 4e Conférence canadienne sur les

- géorisques : des causes à la gestion, Presse de l'Université Laval, Québec, pp. 359-366
- Buffin-Bélanger T., Demers S., Olsen T., Montané A. et Morneau F. (2012) Évaluation des outils hydrogéomorphologiques pour la cartographie des espaces de liberté dans les systèmes fluviaux du Québec, 3 p. [en ligne] URL : <http://www.graie.org/ISRivers/actes/> Comptes rendus de la 1ère Conférence Internationale sur les Recherches et Actions au service des fleuves et grandes rivières, Lyon, France.
- Buffin-Bélanger T., Biron P., Larocque M., Demers S., Olsen T., Choné G., Ouellet M.-A., Cloutier C.-A., Desjarlais C., et Eyquem J. (2015a) Freedom space for rivers: an economically viable river management concept in a changing climate. *Geomorphology*, vol. 251, pp. 137-148
- Buffin-Bélanger T., Chaillou G., Cloutier C.-A., Touchette M., Héту B. et McCormack R. (2015b) Programme d'acquisition de connaissance sur les eaux souterraines du nord-est du Bas-Saint-Laurent (PACES-NEBSL). Rapport final, 199 p.
- Buntley B.T. et Westin F. C. (1965) A comparative study of developmental colour in a Chestnut-Chernozem-Brunizem soil climosequence. *Soil Science Society of America Journal*, vol. 29, n° 5, pp. 579-582
- French C., Periman R., Scott Cummings L., Hall S., Goodman-Elgar M. et Boreham J. (2009) Holocene alluvial sequences, cumulic soils, and fire signatures in the middle Rio Puerco Basin at Guadalupe Ruin, New Mexico. *Geoarchaeology*, vol. 24 (2009), n° 5, pp. 638–676
- CEHQ (page consultée le 10 février 2014) Zones inondables – Informations générales [en ligne] URL : <http://www.cehq.gouv.qc.ca/zones-inond/>
- CEHQ (2015a) Atlas hydroclimatique du Québec méridional – Impact des changements climatiques sur les régimes de crue, d'étiage et d'hydraulicité à l'horizon 2050. Québec, 81 p.
- CEHQ (page consultée le 4 mai 2015b) Barrages – Fiches techniques [en ligne] URL : https://www.cehq.gouv.qc.ca/barrages/detail.asp?no_mef_lieu=X0000543
- CEHQ (page consultée le 7 janvier 2016) Barrages – Fiches techniques [en ligne] URL : https://www.cehq.gouv.qc.ca/barrages/detail.asp?no_mef_lieu=X0000536
- Chauvette B. (1992) Carte de dépôts de surface – Mont-Joli, 22C/9. Réalisé par Gestafor Consultants inc. pour le Service des inventaires forestiers, Ministère des Forêts, Gouvernement du Québec, 1 : 50 000.

- Chave S. (2002) Pertinence de la cartographie hydrogéomorphologique dans l'approche des inondations rares à exceptionnelles : exemples de sept bassins fluviaux dans les Corbières et le Minervois. In: *Géomorphologie : relief, processus, environnement*. Octobre-décembre, vol. 8, n°4. pp. 297-306. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 2002, n° 4, pp. 297-306
- Church M., and Jones D. (1982) Channel bars in gravel-bed rivers, in Hey R. D., Bathurst J. D., et Thorne C. R. (eds.) *Gravel-bed rivers: Fluvial processes, engineering and management*: Chichester, United Kingdom, John Wiley and Sons, pp. 291–338
- Cloutier C.-A., Buffin-Belanger T., et Larocque M. (2014) Controls of groundwater floodwave propagation in a gravelly floodplain. *J. Hydrol.*, vol. 511 (2014), pp. 423-431
- Courchesne F. et Hendershot W. H. (1997) La genèse des podzols. *Géographie physique et Quaternaire*, vol. 51, n°2, pp. 235-250
- Couture G., Joly L. et Plante H. (1984) Étude environnementale du bassin hydrographique Métissien. Rapport remis à la SARRM. Octobre 1984, Mont-Joli, Québec, 126 p.
- Cox R. J., Shand T. D. et Blacka M. J. (2010) Australian Rainfall and Runoff Revision Projects. Project 10, Appropriate Safety Criteria for People, Stage 1 Report, Institution of Engineers, Australia, 21 p.
- DECCW (2005) NSW Floodplain Development Manual - Appendix L, New South Wales Government, Sydney, Australia, 9 p.
- Demers S., Dubé J. et Olsen T. (2009) Application de l'approche hydrogéomorphologique pour l'évaluation des aléas fluviaux dans des tronçons de la rivière Cap-Chat et de la rivière Verte en Gaspésie. Réalisé par l'équipe de recherche en dynamique fluviale de l'université du Québec à Rimouski. Rapport remis au Service de l'atténuation des risques, Ministère de la Sécurité publique. 52 p. + annexes.
- Demers S. et Buffin-Bélanger T. (2011) Une méthode illustrée pour la sectorisation morphodynamique de la rivière Neigette (Québec). *The Canadian Geographer / Le Géographe canadien*, vol. 55, n° 3, pp. 318–333
- Demers S., Olsen T. et Dubé J. (2012) La cartographie des zones inondables par une approche hydrogéomorphologique : Volume 2 Guide méthodologique. Rapport présenté au ministère de la Sécurité publique du Québec, 32 p.
- Demers S., Olsen T., Buffin-Bélanger T., Marchand J.-P., Biron P. et Morneau F. (2014) L'hydrogéomorphologie appliquée à la gestion de l'aléa d'inondation en climat

- tempéré froid : l'exemple de la rivière Matane (Québec). *Physio-Géo*, vol. 8 (2014), Varia 2014, pp. 67-88
- Demers S. (2015) Communication personnelle. Laboratoire de géomorphologie et dynamique fluviale, Département de biologie, chimie et géographie, Université du Québec à Rimouski.
- Desmarais L. (1988) Géologie et géomorphologie quaternaire : secteur du lac Matapédia et de la rivière Mitis (Québec). Mémoire de maîtrise en sciences de la terre, Université du Québec à Montréal, Montréal, 150 p.
- DIREN, Midi-Pyrénées, (2000) « De la cartographie informative...à la cartographie des aléas une démarche technique en Midi-Pyrénées ». Version 2, guide méthodologique édité en septembre 2000 et diffusé au niveau national, 31 pages + planches cartographiques.
- DIREN, PACA (2007) L'approche hydrogéomorphologique en milieux méditerranéens: une méthode de détermination des zones inondables. Direction régionale de l'environnement Provence-Alpes-Côte d'Azur, 59 p.
- Dubé J. (2014) Communication personnelle – Géométrie hydraulique des cours d'eau du Bas-Saint-Laurent. Mémoire de baccalauréat en cours de réalisation, Département de biologie, chimie et géographie, Université du Québec à Rimouski.
- Dubois J.-M. (2004) Les rapports de recherche. Département de géographie et télédétection, Université de Sherbrooke; rapport au Ministère de l'éducation du Québec, Sherbrooke, 200 p.
- Dupont N., Penven M.-J., Gaboreau W. et Gaillard S. (2005) Définition des indicateurs pour une cartographie de la courbe enveloppe des inondations dans le cadre de l'utilisation de la méthode hydrogéomorphologique. Rapport DIREN Bretagne, 52 p.
- EMA (1999) Managing the Floodplain. Australian Emergency Management Series, Part 3, Volume 3, Guide 3, Emergency Management Australia, Canberra, 91 p.
- Fanton M. et Marre A. (2007) Les cartes hydrogéomorphologiques en régions tempérées : l'exemple de la vallée de la Marne entre Vitry-le-François et Châlons-en-Champagne. *Bulletin de l'Association de Géographes Français*, vol. 84, n° 1, pp. 22-34
- Ferguson R. I. (1981) Channel form and channel changes. In: J. Lewin (éditeur), *British Rivers*. Allen & Unwin, London, pp. 90-125

- Frigon M. (page consultée le 13 juin 2008) Récolte – La récolte de bois submergé. Article paru dans le magazine Opérations Forestières et de Scierie [en ligne] URL : <http://www.operationsforestieres.ca/recolte/la-recolte-de-bois-submerges>
- Garry G., Ballais J.-L., et Masson M. (2002) La place de l'hydrogéomorphologie dans les études d'inondation en France méditerranéenne / The contribution of hydrogeomorphology in flood hazard assessment: a review of the situation in southern France. *Géomorphologie : Relief, Processus, Environnement*, vol. 8, n° 1, pp. 5–15
- Gervais Beaulac V.-L. (2013) Analyse spatiale des sols alluviaux en zone active de sédimentation (Centre-Sud du Québec). Mémoire de maîtrise en science de l'environnement, Université du Québec à Trois-Rivières, Trois-Rivières, 73 p.
- GIEC (2007) Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [Équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A. (publié sous la direction de~)]. GIEC, Genève, Suisse, ..., 103 p.
- Goutx D. (2014) Les leçons de l'incorporation de l'expertise hydrogéomorphologique dans la doctrine française de prévention des risques d'inondation. *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement*, vol. 14, n°2, consulté le 25 janvier 2015. [en ligne] URL : <https://vertigo.revues.org/15036>
- Gouvernement du Québec (2014) *Loi sur l'aménagement et l'urbanisme*, Chapitre A-19.1, Chapitre I - Section II, Publications du Québec, Québec.
- Hallouche B., Benyahia M., Moueddene K. et Marok A. (2010) Apport de l'hydrogéomorphologie dans la cartographie des zones inondables. Exemple de la plaine de Sidi Bel Abbès (Algérie Nord occidentale). *Sécheresse*, vol. 21, n° 3, pp. 219-224
- Hickin, E. J. (1995) *River Geomorphology*. E.J.Hickin (éditeur), Wiley, Chichester, 233 p.
- INSPQ (page consultée le 3 mars 2014) Ma santé - Évènements extrêmes - Inondations [en ligne] URL : <http://www.monclimatmasante.qc.ca/public/inondations.aspx>
- Jousse S. (2013) Représentation de la population du Bas-Saint-Laurent concernant la réponse des cours d'eau de leur village dans un contexte de changement climatique. Mémoire de maîtrise en géographie, Université François Rabelais, Tours, 74 p.

- Kline M. et Cahoon B. (2010) Protecting River Corridors in Vermont. *Journal of the American Water Resources Association* (JAWRA), vol. 46, n° 2, pp. 227-236
- L'Avantage (2011) Actualités - Barrage du Lac Métis: l'inquiétude des uns; la bonne foi d'Hydro-Québec [en ligne] URL : <http://www.lavantage.qc.ca/Actualites/2011-07-10/article-3505205/Barrage-du-Lac-Metis%3A-linquiétude-des-uns%3B-la-bonne-foi-dHydro-Quebec/1>
- La Voix de Matane (1955) Inondation à Ste-Angèle. La Voix de Matane, 9e année, n° 29, 3 février, p. A01.
- Lafond R., Cauchon C. et Ducruc J.-P. (1992) Pédologie forestière. Modulo (éditeur), Mont-Royal, Québec, 144 p.
- Laforce S., Simard M.-C., Leconte R., Brissette F. (2011) Climate change and floodplain delineation in two southern Quebec River Basins. *Journal of the American Water Resources Association*, vol. 47, n° 4, pp. 785-799
- Landry R. (2013) Type de modes de gestion des crues saisonnières et leurs impacts sur la relation entre le climat et les débits en aval des barrages au Québec (Canada). Mémoire de maîtrise en sciences de l'environnement, Université du Québec à Trois-Rivières, Trois-Rivières, 50 p.
- Lane S. N., Tayefi V., Reid S. C., Yu D. et Hardy R. J. (2007) Interactions between sediment delivery, channel change, climate change and flood risk in a temperate upland environment. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 32, n°3, pp. 429-446
- Lastra J., Fernandez E., Diez-Herrero A. et Marquinez J. (2008) Flood hazard delineation combining geomorphological and hydrological methods: an example in the Northern Iberian Peninsula. *Natural Hazards*, vol. 45, n° 2, pp. 277-293
- Lea D.M. et Legleiter C.J. (2016) Mapping spatial patterns of streampower and channel change along a gravel-bed river in northern Yellowstone. *Geomorphology*, vol. 252 (2016), pp. 66-79
- Lelièvre M.-A., Buffin-Bélanger T. et Morneau F. (2008) L'approche hydrogéomorphologique pour la cartographie des zones à risque d'inondation dans les vallées de petites et moyennes tailles : un exemple commenté pour la vallée de la Rivière-au-Renard. In: Locat J., Perret D., Turmel D., Demers D. et Leroueil S. 2008. Comptes rendus de la 4e Conférence canadienne sur les géorisques: des causes à la gestion. Proceedings of the 4th Canadian Conference on Geohazards : From Causes to Management. Presse de l'Université Laval, Québec, 594 p.

- Leopold L. B., Emmett W. W. (1976) Bedload measurements, East Fork River, Wyoming, *Proc. Natl. Acad. Sci., U.S.A.*, vol. 74 (1977), n° 7, pp. 2644–2648
- Lévesque A. et Lévesque R. (1974) Géomorphologie de la rivière Métis. Mémoire de baccalauréat en géographie, Université du Québec à Rimouski, Rimouski, 57 p.
- Lévesque J. et Courtois R. (1983) Description du bassin de la rivière Métis et de ses utilisateurs : les antagonistes entre les différents aspects de l'utilisation de l'eau. Ministère du Loisir de la Chasse et de la Pêche – Service de l'aménagement et de l'exploitation de la faune, octobre 1983, 43 p.
- Levish D. R. (2002) Paleohydrologic bounds: non-exceedance information for flood hazard assessment. In: House P. K., Webb R. H., Baker V. R. et Levish D. R. (eds), Ancient floods, modern hazards: principles and applications of paleoflood hydrology, *Water Science and Application Series*, vol. 5, 175-190.
- Locat (1978) Quaternaire : région de Baie-des-Sables - Trois-Pistoles. p.64, in. Direction générale de la recherche géologique et minérale. Rapport DPV-605 - Le Quaternaire de la région de Baie-des-Sables – Trois-Pistoles. Ministère des Richesses naturelles du Québec, Québec, 1 : 50 000.
- MAMROT (page consultée le 13 juin 2014) Répertoire des municipalités [en ligne]
URL : <http://www.mamrot.gouv.qc.ca/repertoire-des-municipalites/>
- Marchand J.-P., Didier D., Buffin-Bélanger T. et Bernatchez P. (2014) Cartographie des zones inondables et des zones de submersion à l'aide d'une méthode hydrogéomorphologique pour le secteur de la rivière Bonaventure. Rapport de recherche remis à la municipalité de Bonaventure, 82 p.
- Marre A. (2007) Cartographie géomorphologique et cartographie des risques. *Bulletin de l'Association des Géographes Français*, vol. 84, n° 1, pp. 3-21
- Martel G. (2007) Détermination des zones de crues, Sainte-Angèle-de-Mérici, Rivière Mitis. Rapport présenté à la MRC de La Mitis, Mont-Joli, 7 p.
- Massé S., Buffin-Bélanger T. et Biron P. (2015) Valorisation des connaissances hydrogéomorphologiques dans la gestion des cours d'eau au Québec. Affiche présentée au colloque RHQ 2015 - La recherche hydrologique au Québec : État des lieux et perspectives, École de technologie supérieure, Montréal, 9-10 juin.
- Massé S. et Claveau S. (2015) Délimitation de l'espace de liberté du ruisseau des Douze et d'une zone de conservation potentielle, St-Hyacinthe, QC. Rapport et documents cartographiques présentés à la Réserve naturelle du Boisé des Douze et à la ville de St-Hyacinthe, 17 p. + annexes.

- Matteau M., Assani A. A. et Mesfioui M. (2009) Application of multivariate statistical analysis methods to the dam hydrologic impact studies. *J. Hydrol.*, vol. 371 (2009), n°1, pp. 120–128
- MDDEFP (2014) - Politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables, R.L.R.Q. c. Q-2, r.35 dans le cadre de la Loi sur la qualité de l'environnement (R.L.R.Q., c. Q-2). Ministère du Développement Durable de l'Environnement et des Parcs. Publications du Québec, Québec.
- MDDELCC (2015) Détermination des zones inondables par une approche combinée – Rivière de la Fourche. Direction de l'expertise hydrique, Québec, DEH 4132-0231-05-1401, 83 p. et 7 annexes.
- MDDEP (2008) Politique de protection des rives, du littoral et des plaines inondables, Note explicative sur la ligne naturelle des hautes eaux : la méthode botanique experte. Gouvernement du Québec, 8 p. + annexes
- Mens M. J. P., Erlich M., Gaume E., Lumbroso D., Moreda Y., van der Vat M. et Versini P. A. (2008) Integrated flood risk analysis and management methodologies: Frameworks for flood event management. FLOODsite Report T19-07-03. Wallingford, Oxfordshire: HR Wallingford, 98 p.
- Ministère de l'Environnement, Direction du milieu hydrique (1989) Cartographie des zones inondables, Rivière Matane. Rapport MH-89-07, Matane, 15 p.
- Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie (page consultée le 22 avril 2014) DREAL Languedoc-Roussillon - Atlas des Zones Inondables (AZI) par bassin versant [en ligne] URL : <http://www.languedoc-roussillon.developpement-durable.gouv.fr/atlas-des-zones-inondables-azi-par-r997.html>
- Minville M., Brissette F. et Leconte R. (2008) Uncertainty of the impact of climate change on the hydrology of a nordic watershed. *Journal of Hydrology*, vol. 358, n° 1-2, pp. 70-83
- Montané A. (2014) L'approche hydrogéomorphologique : pratiques, valorisations et développement d'une méthode de cartographie des zones inondables. Thèse de doctorat, Université de Montpellier 3, Montpellier, 280 p.
- Montané A., Buffin-Belanger T., Vento O., Come J.-M. (2014) Réalisation d'un modèle numérique de zones inondables sur la rivière Matane et propositions d'utilisation réglementaire. Rapport méthodologique, Ministère de la Sécurité Publique du Québec, 31 p.

- MRC de La Mitis (2007) Schéma d'aménagement et de développement révisé. Section V – La protection de l'environnement, Chapitre 12, Les eaux potables et usées. pp. 12/1-12/5
- Nanson G. C. et Croke J. C. (1992) A genetic classification of floodplains. *Geomorphology*, vol. 4, n° 6, pp. 459–486.
- Natur'Eau-Lac (2012) Analyse cartographique des zones potentielles de risque à la sécurité des personnes ou des biens concernant les cours d'eau - Étude du bassin versant de la rivière Eaton sur le territoire de la MRC du Haut-Saint-François. Rapport initial présenté à la MRC du Haut-Saint-François, Saint-Camille, 53 p. et 3 annexes.
- Natur'Eau-Lac (2013) Analyse cartographique des zones potentielles de risque à la sécurité des personnes ou des biens concernant les cours d'eau du bassin versant de la rivière au Saumon. Rapport préliminaire présenté à la MRC du Haut-Saint-François, Saint-Camille, 30 p. + annexes.
- Naturam (1985) inc. (1992) Plan de mise en valeur de la rivière Mitis. Rapport final présenté à la SARRM. Dossier 91 D475, mars 1992, 103 p.
- Nicholas A. P., Ashworth P. J., Kirkby M. J., Macklin M. G. et Murray T. (1995) Sediment slugs : Large-scale fluctuations in fluvial sediment transport rates and storage volumes, *Prog. Phys. Geogr.*, vol. 19, pp. 500-519
- Notebaert B. et Piégay H. (2013) Multi-scale factors controlling the pattern of floodplain width at a network scale: The case of the Rhône basin, France. *Geomorphology*, vol. 200, n°1, pp. 155-171
- Ollero A. (2010) Channel changes and floodplain management in the meandering middle Ebro River, Spain. *Geomorphology*, vol. 117, n° 3-4, pp. 247–260
- Olsen T. (2015) Aménagement des rivières de la MRC de la Haute-Gaspésie suite à la tempête post-tropicale Arthur. Avis technique en géomorphologie fluviale présenté à la MRC de la Haute-Gaspésie, Rimouski, 31 p.
- Olsen T. et Buffin-Bélanger T. (2012) Caractérisation hydrogéomorphologique du ruisseau Martin et de son bassin versant. Rapport présenté au MDDEP et à COPERNIC. Laboratoire de géomorphologie et dynamique fluviale. LGDF-003-UQAR. 43 p.
- Ouellet C., Saint-Laurent D. et Normand F. (2012) Flood events and flood risk assessment in relation to climate and land-use changes : Saint-François River, southern Québec, Canada. *Hydrological Sciences Journal – Journal des Sciences Hydrologiques*, vol. 57, n°2, pp. 313-325

- Parker C., Thorne C.R. et Clifford N.J. (2015) Development of ST:REAM: a reach-based stream power balance approach for predicting alluvial river channel adjustment. *Earth Surf Proc Landf*, vol. 40, n°3, pp. 403–413
- Péloquin-Guay M. (2013) Détermination du corridor de liberté du ruisseau Métairie, Ste-Hyacinthe. Rapport final présenté à ville de Sainte-Hyacinthe, 20 p.
- Penven M.J., Dupont N. et Gaillard S. (2004) Fonctionnement hydrogéomorphologique et cartographie des fonds alluviaux dans le contexte armoricain. *Mosella*, vol. 29, n° 3-4, pp. 101-111
- Pinto Martins D. (2008) Aménagements hydroélectriques et impacts sur la dynamique des flux d'eau et de sédiments. Le cas du haut Paraná, Brésil. Thèse de doctorat de géographie, aménagement et urbanisme, Université Lumière Lyon 2, Lyon, 212 p.
- Progrès-Écho (2011) Actualités – La région affectée – Par les inondations [en ligne] URL : http://www.myvirtualpaper.com/doc/lavantage/20110508_ped_opt/2011050601/5.html#4
- Radio-Canada (2005) Nouvelles - Un barrage qui menace de céder [en ligne] URL : <http://ici.radio-canada.ca/nouvelles/Index/nouvelles/200504/27/006-BARRAGEMETIS.shtml>
- Robitaille, P. (1999) Qualité des eaux des rivières Mitis et Matane dans le Bas-Saint-Laurent et des rivières Ste-Anne, York, Bonaventure, Cascapédia et Nouvelle en Gaspésie, 1979 à 1997. Québec, Direction des écosystèmes aquatiques, Ministère de l'Environnement, Envirodoq N'En990237, rapport N' QE-120. 32 pp. et 7 annexes.
- Saint-Laurent D. et Lavoie L. (2009) Récurrence des inondations et édification des plaines alluviales des bassins du centre-sud du Québec (Canada). *Revue des Sciences de l'Eau*, vol. 22, n°1, pp. 51-68
- Saint-Laurent D., Mesfioui M. et Evin G. (2009) Hydroclimatic Variability and Relation with Flood Events (Southern Québec, Canada). *Water Resources*, vol. 36, n° 1, pp. 43–56
- Salomon J.-N. (2007) Cônes d'éboulis, de déjection, glacis et piémonts: essai de définitions. *Études de Géographie Physique*, vol. 34, pp. 53–67
- Santangelo N., Daunis-i-Estadella J., Di Crescenzo G., Di Donato V., Faillace P.I., Martín-Fernández J.A., Romano P., Santo A. et Scorpio V. (2012) Topographic predictors of susceptibility to alluvial fan flooding, Southern Apennines. *Earth surface processes and landforms*, vol. 37, n° 8, pp. 803-817

- SARRM *inc.* (1983) Gestion du bassin hydrographique Métissien. Juin 1983, 141 p.
- Schaetzl R. J. et Anderson S. (2005) Soils: Genesis and Geomorphology. Cambridge University Press, New-York, 817 p.
- Scheidegger A. E. (1973) Hydrogeomorphology, *Journal of Hydrology*, vol. 20, n° 3, pp. 193-215
- Slater L. J., Singer M. B. et Kirchner J. W. (2015) Hydrologic versus geomorphic drivers of trends in flood hazard, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 42, pp. 370–376
- Smith D. G. et Pearce C. M. (2002) Ice jam-caused fluvial gullies and scour holes on northern river flood plains. *Geomorphology*, vol. 42 pp. 85-95
- Sui, J., Karney, B. et Fang, D. (2005) Variation in water level under ice-jammed condition field investigation and experimental study. *Nordic Hydrology*, vol. 36, n°1, pp. 65-84
- Taylor S. (2010) Analyse de la dynamique spatio-temporelle de la formation des embâcles de glace dans un tronçon de la rivière Ouelle, Québec. Mémoire de maîtrise en géographie, Université du Québec à Montréal, Rimouski, 69 p.
- Taylor, S. (2008) Effets, résidus et reprise de linéarisations. L'exemple de la rivière Rouge, Sainte-Angèle-de-Mérici, Québec. Mémoire de baccalauréat en géographie, Université du Québec à Rimouski, Rimouski, 53 p.
- Tremblay S., Ouimet R. et Houle D. (2002) Prediction of organic carbon content in upland forest soils of Quebec, Canada. *Can. J. For. Res.*, vol. 32, pp. 903-914
- Tremblay, Louise (tremblay.louise.3@hydro.quebec.ca). Question cartographie rivière Mitis, [courrier électronique original de Clément Besnard] (clement.besnard@uqar.ca), 28 janvier 2016.
- TV Mitis (2011a) Politique - Hydro-Québec projette déjà de restaurer le barrage du Lac Mitis [en ligne] URL : <http://www.tvmitis.ca/politique/1980-hydro-quebec-projette-deja-de-restaurer-le-barrage-du-lac-mitis>
- TV Mitis (2011b) Affaires et économie - L'état du barrage du Lac Mitis est sécuritaire selon Hydro-Québec [en ligne] URL : <http://www.tvmitis.ca/affaires-et-economie/354-letat-du-barrage-du-lac-mitis-est-securitaire-selon-hydro-quebec>
- Warner J. F., van Buuren A. et Edelenbos J. (2013) Making Space for the River: Governance Experiences with Multifunctional River Flood Management in the US and Europe. Warner J. F., van Buuren A. et Edelenbos J. (eds.), IWA Publishing, London, UK, 201 p.

- Wolman M. G. (1971) Evaluating alternative techniques of flood plain mapping. *Water Resources Research*, vol. 7, n° 6, pp. 1383-1392
- Wulamu M., Ballais J.-L. et Delorme V. (2013) L'applicabilité de la méthode hydrogéomorphologique au domaine aride du Xinjiang (Chine) : le cas du bassin versant du Karakash. *Physio-Géo*, vol. 7 (2013) : Varia 2013, pp. 285-306
- Zevenbergen C., Rijke J., Herk S., Van Ludy J., et Ashley R. (2013) Room for the river : international relevance. Baltzer Science Publishers, Water Governance 02/2013, pp. 24-31

