

Cartographie de l'espace de liberté de la rivière Mastigouche

-

Rapport final

Rapport réalisé dans le cadre du projet « Prise en compte de l'espace de liberté de la rivière Mastigouche dans les outils d'urbanisme en vue de l'adaptation aux changements climatiques » et présenté à Association de la gestion intégrée de la rivière Maskinongé (AGIR Maskinongé) et à la municipalité de Mandeville

Pascale Biron, William Massey et Guénoé Choné

Laboratoire de gestion des cours d'eau de l'Université Concordia

Avril 2018

Analyses et rédaction :

William Massey, M.Sc.
Professionnel de recherche

Guéno   Choné, M.Sc.
Professionnel de recherche

Supervision :

Pascale Biron, Ph.D
Professeure titulaire

Laboratoire de gestion des cours d'eau
Département de géographie, urbanisme et environnement
Université Concordia

Financement :

Fonds d'Action Québécois pour le Développement Durable (FAQDD)

TABLE DES MATIÈRES

1	Le concept d'espace de liberté.....	1
2	Le cas de la rivière Mastigouche : problématique et origine du projet	1
3	Objectifs du projet	2
4	La cartographie de l'espace de liberté.....	2
5	Évaluation de l'espace mobilité	4
5.1	Détermination de l'espace M_{plaine}	4
5.2	Détermination de l'espace M_{50}	8
5.2.1	Détermination des zones probables d'érosion sur 50 ans	8
5.2.2	Détermination des zones probables d'avulsion	10
5.2.3	Évaluation de l'érosion en absence d'enrochement	11
5.2.4	Identification des zones à fort dynamisme	11
5.3	Le delta de la rivière Mastigouche : un cas particulier	12
6	Évaluation de l'espace d'inondabilité.....	14
6.1	La méthode hydrogéomorphologique.....	14
6.2	La méthode hydraulique	17
6.2.1	Analyse hydrologique.....	18
6.2.2	Modélisation hydraulique	18
6.3	Utilisation conjointe des méthodes HGM et hydraulique	19
6.3.1	Utilisation de la méthode hydraulique en support à la méthode HGM	19
6.3.2	Utilisation de la méthode hydraulique en ajout à la méthode HGM	19
6.4	Cônes alluviaux	19
6.5	Milieus humides	19
7	Trajectoire géomorphologique de la rivière Mastigouche	20
7.1	Stabilité verticale du chenal	20
7.2	Impact des activités forestières.....	20
7.2.1	Tendance historique	20
7.2.2	Impacts potentiels d'une déforestation sur le bassin versant.....	21
8	Bilan des aléas fluviaux sur la rivière Mastigouche et risques associés	21
9	Conclusion	23
	Références	24
	Annexe 1 – Description des tronçons homogènes	25
	Annexe 2 – Analyse hydrologique.....	27
	Annexe 3 – cartes des aléas fluviaux et de l'espace de liberté.....	29

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Carte de situation du secteur d'étude	1
Figure 2 : Exemple de cartes produites. A) Carte des aléas fluviaux. B) Cartes de l'espace de liberté.....	3
Figure 3 : Tronçons homogènes sur la rivière Mastigouche	5
Figure 4 : Axe principal des méandres et corridor de mobilité	Error! Bookmark not defined.
Figure 5 : Terrasse en processus d'érosion	7
Figure 6 : Exemples de sections non confinée (B), semi-confinée (A) et confinée (C).....	7
Figure 7 : Position du chenal sur les différentes années de photographies aériennes pour deux sections de la rivière Mastigouche. A) Section stable, peu de mobilité historique observée B) Section dynamique, où l'emplacement du chenal sur les photographies les plus anciennes peut diverger de manière importante par rapport à son emplacement actuel	9
Figure 8 : Extrapolation de l'érosion historique sur 50 ans	10
Figure 9 : Exemple de méandre à risque d'avulsion sur la rivière Mastigouche et prise en compte de l'érosion naturelle probable sur un secteur stabilisé.....	11
Figure 10 : Espace M_{plaine} obtenu par la méthode actuelle (« Meander belt width ») et anciens chenaux de la rivière Mastigouche au niveau de son delta.	12
Figure 11 : Résultats des simulations d'avulsion, forcées manuellement (A) et par bruitage aléatoire du MNE (B). M_{plaine} résultant de ces simulations (C).	13
Figure 12 : Exemples d'indicateurs morphologiques pour trois types de modelés de la plaine alluviale de la rivière Matane. Ér : érosion ; Sed : sédimentation ; St : stable. Le trait pointillé indique une limite en transition. D'après Demers et al. 2014	14
Figure 13 : Formes associées à des processus dynamiques pouvant servir à la délimitation des zones inondables de récurrence élevée : les chenaux de débordements, jets de berges, courants de circulation et talus d'érosion. D'après Demers et al. 2017.....	15
Figure 14 : Exemple de terrasses alluviales sur la rivière Thompson près de Cache Creek, Colombie Britannique (Trenhaile 2009).....	16
Figure 15 : Section transversale sur la rivière Mastigouche, obtenue par les données LiDAR, montrant l'élévation relative d'un bras mort par rapport au chenal actuel et à sa plaine alluviale.	17

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Critères pour le découpage en tronçons homogènes	4
Tableau 2 : Photographies aériennes utilisées.....	8
Tableau 3 : Débits de crues sur la rivière Mastigouche (en aval du tronçon 1 du rapport de détermination des cotes de crues du CEHQ)	18

1 LE CONCEPT D'ESPACE DE LIBERTÉ

Le concept d'espace de liberté des cours d'eau au Québec a été développé par Biron et al. (2013a; 2014) qui le définissent comme suit :

« L'espace de liberté des cours d'eau est un cadre de gestion intégrée qui se base sur l'hydrogéomorphologie des rivières. [...] L'espace de liberté vise à identifier les espaces d'inondabilité et de mobilité du cours d'eau et à le laisser évoluer dans ces espaces plutôt que de le contraindre à évoluer dans un corridor fluvial façonné par les interventions anthropiques. »

Bien que le terme « Espace de liberté » soit originellement employé par Piégay et al. (2005) pour désigner l'espace de mobilité des rivières, c'est-à-dire la portion du territoire où le chenal de la rivière peut potentiellement se déplacer, ce terme est utilisé au Québec pour désigner non seulement l'espace de mobilité, mais également l'espace d'inondabilité (portion du territoire potentiellement inondé par les crues de la rivière) ainsi que les milieux humides riverains.

2 LE CAS DE LA RIVIÈRE MASTIGOUCHE : PROBLÉMATIQUE ET ORIGINE DU PROJET

Le projet de cartographie de l'espace de liberté de la rivière est né d'une initiative d'AGIR Maskinongé, avec l'appui de la municipalité de Mandeville. Il découle du constat réalisé sur les risques liés à la mobilité de la rivière Mastigouche, le long de laquelle l'érosion des berges et les glissements de terrain menacent des routes et des terrains privés. Le site d'étude choisi correspond aux 17 km constituant l'extrémité aval de la rivière Mastigouche, du double point de confluence entre la rivière Mastigouche, la rivière Mastigouche-Nord et la rivière Branche-à-gauche, jusqu'au lac Maskinongé. Il s'agit de la zone la plus développée le long de la rivière Mastigouche, et cette zone est intégralement comprise sur le territoire de la municipalité de Mandeville. La figure 1 situe le tronçon d'étude.

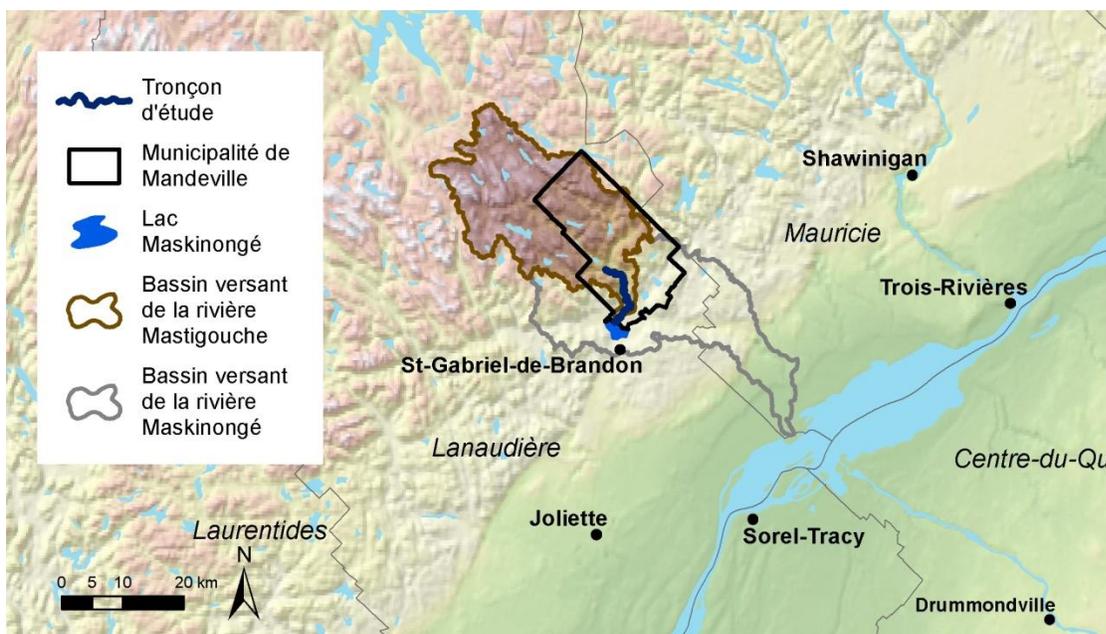


Figure 1 : Carte de situation du secteur d'étude

Les problématiques liées à la mobilité du cours d'eau, plus qu'à l'inondabilité, sont donc à l'origine du projet. Cependant, le secteur d'étude est également connu pour les risques d'inondations. Un rapport du Ministère de l'Environnement, du Développement Durable et de la Lutte aux Changements Climatiques (MDDELCC, 2003) a d'ailleurs été rédigé, concernant une partie de la zone d'étude, afin d'établir les cotes de crues de récurrence 20 ans et 100 ans.

Par ailleurs, l'intégrité écologique du territoire est un souci à cœur d'AGIR Maskinongé. Le secteur d'étude est connu comme habitat de la tortue des bois, une espèce portant le statut vulnérable d'après le Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs (MFFP, 2018). Il s'agit également d'une zone comportant de nombreux milieux humides.

Enfin, il est à souligner que le projet s'inscrit dans un processus d'adaptation aux changements climatiques. La municipalité de Mandeville et AGIR Maskinongé souhaite en effet mieux identifier les risques liés aux aléas fluviaux dans un contexte de changements climatiques.

3 OBJECTIFS DU PROJET

L'objectif principal du projet est de réaliser une cartographie de l'espace de liberté de la rivière Mastigouche sur le tronçon d'étude. L'étude de Biron et al. (2013a) décrit la méthodologie requise pour cartographier l'espace de liberté. Toutefois, cette méthodologie employée dans ce projet a été modifiée pour les deux raisons suivantes :

- La cartographie de l'espace de liberté des cours d'eau requiert dans sa version actuelle des travaux de terrains relativement importants. Lors de la conception de la méthodologie originelle, seule une partie des rivières à l'étude était couverte par des données LiDAR (données d'élévation à haute résolution et de haute précision permettant de produire un Modèle Numérique d'Élévation (MNE)). Ces données étant disponibles pour la section à l'étude de la rivière Mastigouche, il a été décidé de travailler à identifier comment les données LiDAR peuvent être utilisées pour minimiser les efforts de terrain.
- La méthodologie de cartographie de l'espace de liberté est relativement récente et a été appliquée sur un nombre encore limité de rivières. Chaque nouvelle application de la méthodologie sur un nouveau territoire d'étude permet de mettre en évidence certaines situations particulières pour lesquelles la méthodologie doit être adaptée.

Le projet a donc pour but de répondre à des questions d'intérêts pour AGIR Maskinongé et la municipalité de Mandeville, en cartographiant les aléas fluviaux et l'espace de liberté sur la rivière Mastigouche, mais également de répondre à des questions liées à recherche scientifique concernant l'application de la méthodologie de cartographie de l'espace de liberté. Le présent document aborde ces deux aspects conjointement.

4 LA CARTOGRAPHIE DE L'ESPACE DE LIBERTÉ

La méthode de cartographie de l'espace de liberté comporte deux étapes :

- Une évaluation des espaces d'inondabilité et de mobilité. Ce travail, auquel s'ajoute la cartographie des milieux humides, permet de produire une carte des aléas fluviaux.
- Les différents éléments de la carte des aléas fluviaux sont combinés pour produire une carte simplifiée de l'espace de liberté

La figure 2 illustre les deux cartes résultantes pour une même zone.

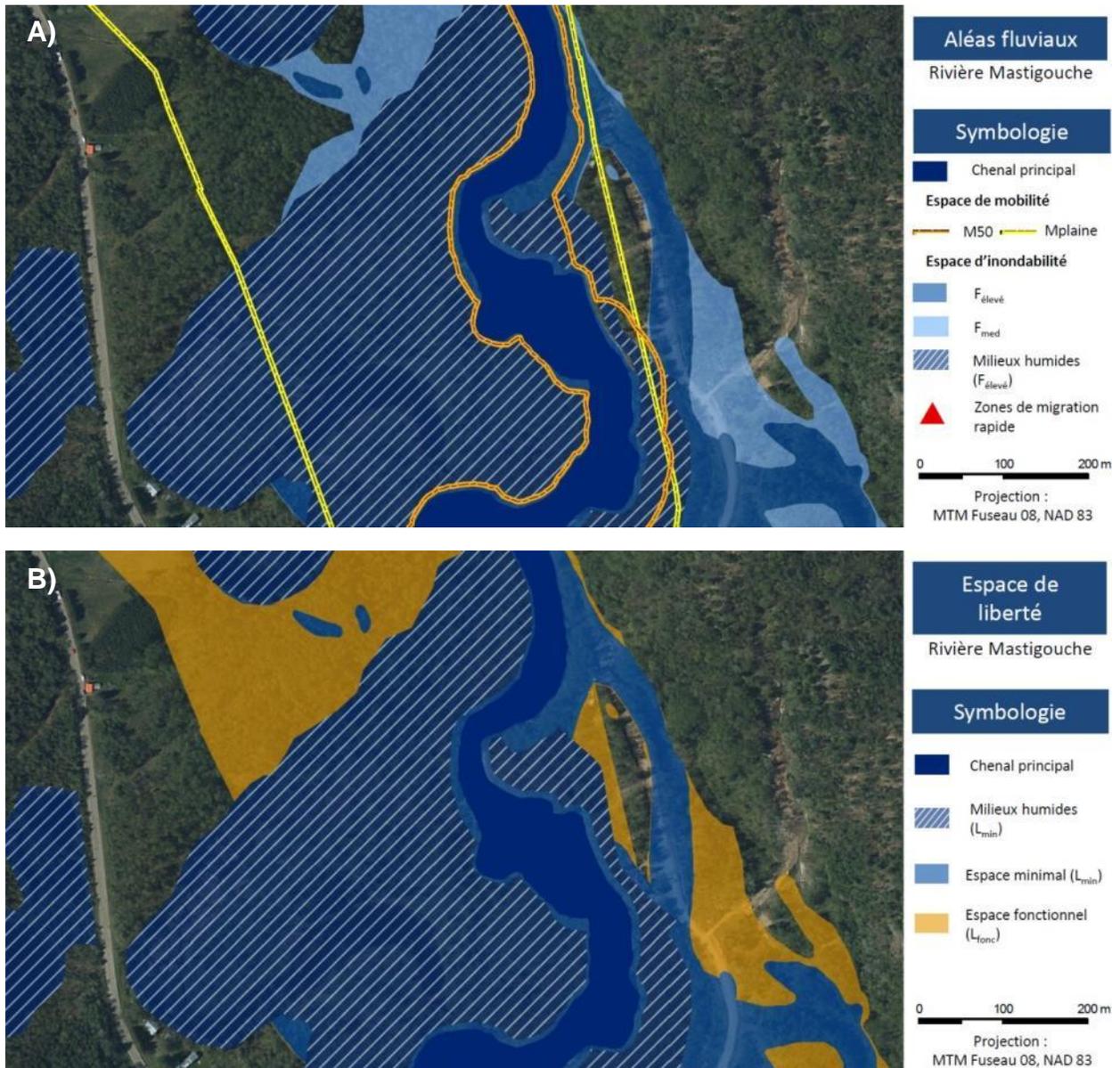


Figure 2 : Exemple de cartes produites. A) Carte des aléas fluviaux. B) Cartes de l'espace de liberté

Tel que présenté à la figure 2, deux niveaux de mobilité sont déterminés et cartographiés :

- M_{50} : Il s'agit de l'espace possiblement occupé par le chenal de la rivière dans les 50 prochaines années. La migration latérale des méandres, par érosion des berges, est le principal processus menant au déplacement du chenal dans le temps. Les risques d'avulsion, c'est-à-dire de changement soudain de position du lit de la rivière, sont également considérés. À noter que la cartographie produite considère l'emplacement probable du chenal de la rivière en l'absence d'intervention humaine. Les ouvrages de stabilisation des berges, existants ou à venir, peuvent modifier cet espace.

- M_{plaine} : Il s'agit de l'espace requis pour la conservation de l'ensemble des processus fluviaux dans la plaine alluviale, où la rivière peut potentiellement migrer à long terme.

En ce qui concerne l'inondabilité, trois niveaux sont définis :

- $F_{\text{élevé}}$: Il s'agit des zones à fort risque d'inondation. Cet espace est parfois associé à la zone de grand courant selon la définition de la PPRLPI, ce qui correspond à la zone inondable de récurrence 0-20 ans, mais il est important de noter que la cartographie hydrogéomorphologique n'est pas directement associée à une récurrence de crue.
- F_{med} : Il s'agit des zones à risque d'inondation modéré. Cet espace est parfois associé à la zone de faible courant de la PPRLPI, ce qui correspond à la zone inondable de récurrence 20-100 ans, avec encore là des limites liées à l'impossibilité d'associer directement la cartographie hydrogéomorphologique à une récurrence.
- F_{faible} , ou zone d'inondabilité potentielle : Il s'agit des zones pour lesquels le risque d'inondation est faible ou incertain. Ce niveau d'inondabilité n'a pas été cartographié sur la rivière Mastigouche.

La correspondance entre les espaces d'inondabilité et les récurrences de crues (20 ans et 100 ans) est fournie ici à titre indicatif et demeure très approximative.

Les espaces d'inondabilité, de mobilité, et les milieux humides sont ensuite fusionnés pour réaliser la carte de l'espace de liberté. Cette carte comporte deux espaces :

- L_{min} , espace de liberté minimal : Il s'agit de l'espace minimal pour que les processus hydrogéomorphologiques et écologiques puissent opérer. Cet espace est issu de l'union des espaces M_{50} et $F_{\text{élevé}}$, auquel s'ajoutent les milieux humides riverains.
- L_{fonc} , espace de liberté fonctionnel : Il s'agit de l'ensemble de l'espace de liberté dans sa définition généralement acceptée, c'est-à-dire le corridor nécessaire au maintien des processus fluviaux essentiels. Cet espace est issu de l'union des espaces M_{plaine} et F_{med} .

5 ÉVALUATION DE L'ESPACE MOBILITÉ

5.1 Détermination de l'espace M_{plaine}

La détermination de l'espace M_{plaine} commence par la détermination de tronçons homogènes. Les tronçons homogènes sont des portions de rivières pour lesquelles les conditions d'écoulement sont considérées comme relativement constantes. Les critères listés au tableau 1 ont été utilisés sur la rivière Mastigouche pour déterminer les tronçons homogènes.

Tableau 1 : Critères pour le découpage en tronçons homogènes

Critère pour le découpage en tronçon	Source de données
Variations de pente	LiDAR (Biron et al. 2013b)
Confluence avec les tributaires principaux	LiDAR
Changements de configuration en plan du chenal	Photographies aériennes de 2008
Changements dans la taille de sédiments du lit et des berges	Observations de terrain
Changements dans la morphologie du cours d'eau (largeur, vitesse de courant, présence de seuils et mouilles, présence de bancs, incision)	Observations de terrain

Au final, 7 tronçons ont été déterminés pour la rivière Mastigouche. Ces tronçons sont présentés à la figure 3. Une description plus complète des caractéristiques des différents tronçons est présentée à l'annexe 1.

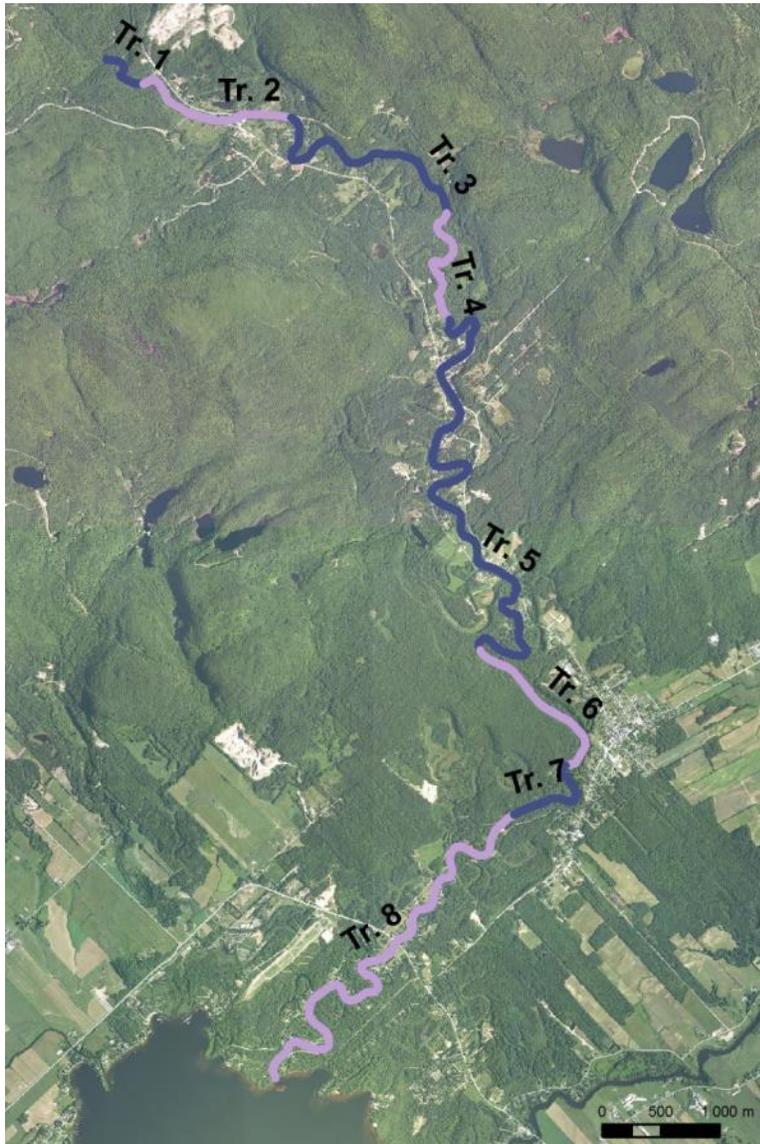


Figure 3 : Tronçons homogènes sur la rivière Mastigouche

Une fois les tronçons homogènes établis, l'axe principal des méandres est tracé. L'axe principal des méandres suit l'axe de la vallée et passe au milieu des méandres (figure 4). Le corridor de mobilité est ensuite déterminé. Il s'agit d'une bande, centrée sur l'axe principal des méandres, et de largeur suffisante pour englober les boucles de méandres (figure 4) (« Meander belt width »; Parish Geomorphic, 2004). Cette largeur est déterminée pour chaque tronçon homogène.

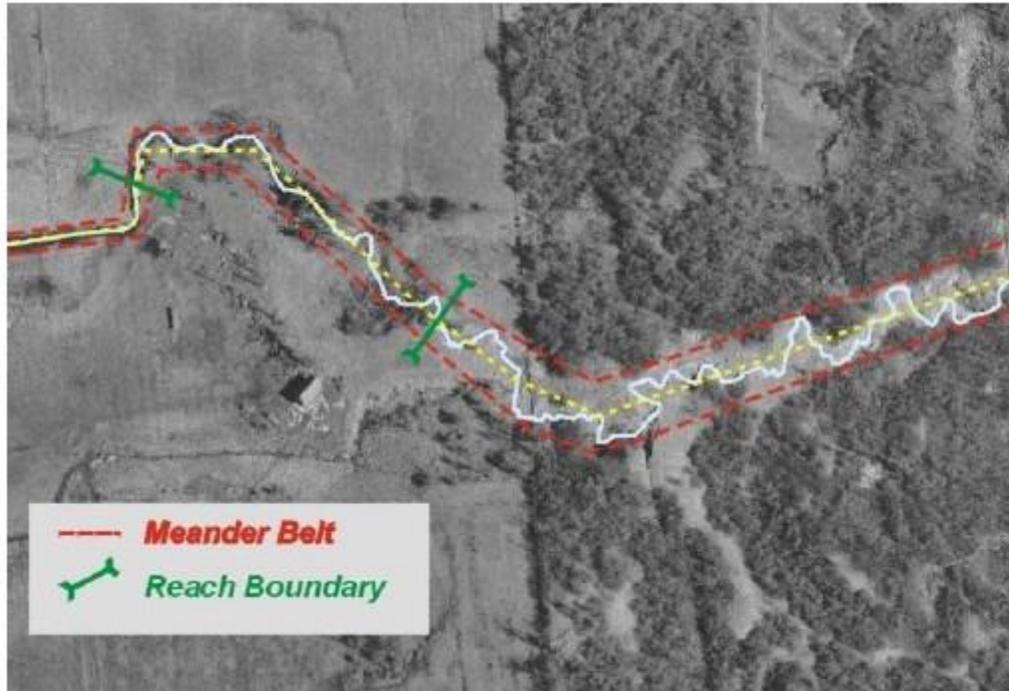


Figure 4 : Axe principal des méandres et corridor de mobilité

Le corridor de mobilité obtenue ainsi correspond à l'espace sur lequel les méandres peuvent migrer, à long terme. L'hypothèse est donc faite ici que les sédiments présents dans ce corridor peuvent être érodés par la rivière. Ce n'est cependant pas toujours le cas. Il est donc nécessaire de déterminer si les sédiments présents dans le corridor de mobilité peuvent potentiellement être érodés. Les sédiments constituant la plaine inondable sont toujours considérés comme érodables. Pour ce qui est des dépôts de sédiments plus élevés que la plaine inondable, des observations de terrain et l'étude des données LiDAR permettent de déterminer s'ils peuvent être érodés. Les dépôts non érodables sont retranchés du corridor de mobilité pour obtenir le résultat final, l'espace M_{plaine} .

Trois cas sont possibles :

- Rivière confinée : des dépôts non érodables confinent la rivière de part et d'autre, sur les deux rives. La mobilité de la rivière est alors limitée à sa plaine inondable actuelle.
- Rivière semi-confinée : des dépôts non érodables confinent la rivière sur une seule berge.
- Rivière non confinée : La rivière est libre de développer des méandres, sans contraintes topographiques.

À noter que ce qui est évalué ici est le confinement naturel de la rivière, et non le confinement résultant d'enrochement et/ou de talus de route. Le processus cherche en effet à évaluer la zone de mobilité naturelle de la rivière en dehors des interventions humaines. Dans les faits, les contraintes anthropiques peuvent venir réduire cet espace de mobilité.

Sur la rivière Mastigouche, de nombreuses terrasses sont constituées d'argile surmontée d'une couche de sable. Malgré les hauteurs parfois importantes de ces terrasses, la mobilité passée et actuelle de la rivière montre que ces terrasses peuvent être dans certains cas érodées (figure 5), bien que ce ne soit pas toujours le cas. Il est bien souvent difficile de statuer du caractère

érodable ou non d'une terrasse, et des imprécisions dans la cartographie de Mplaine peuvent résulter des choix effectués.

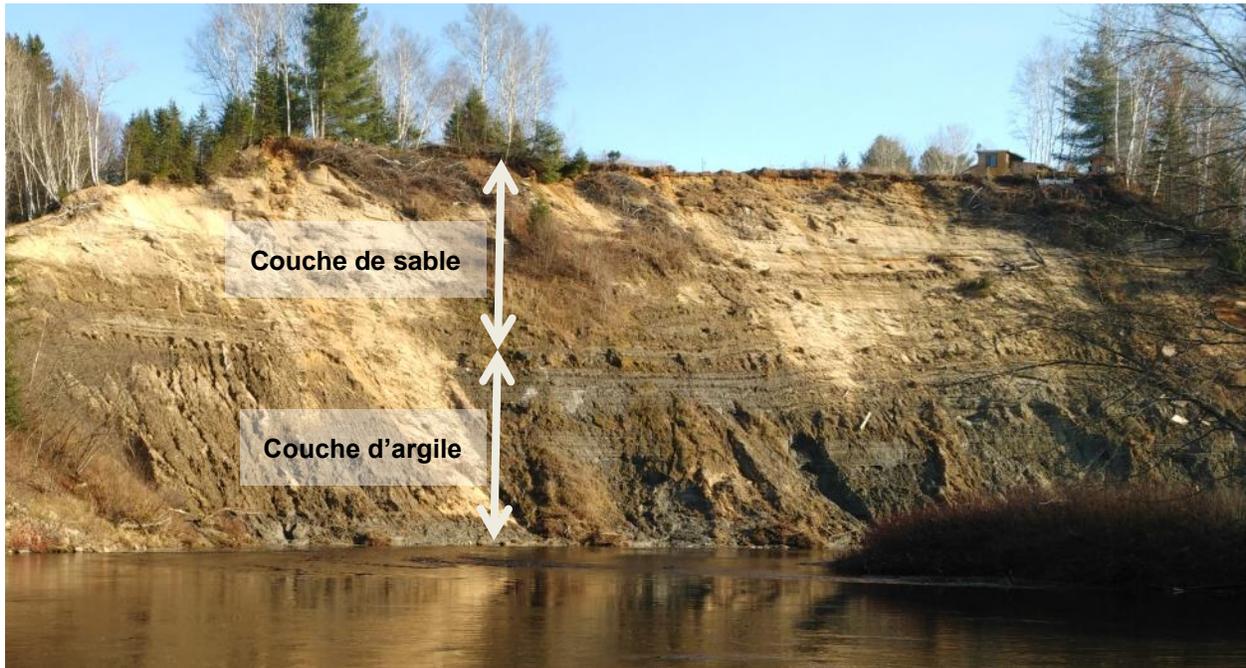


Figure 5 : Terrasse en processus d'érosion

La figure 6 montre des résultats de l'analyse de l'érodabilité des dépôts le long de la rivière Mastigouche.

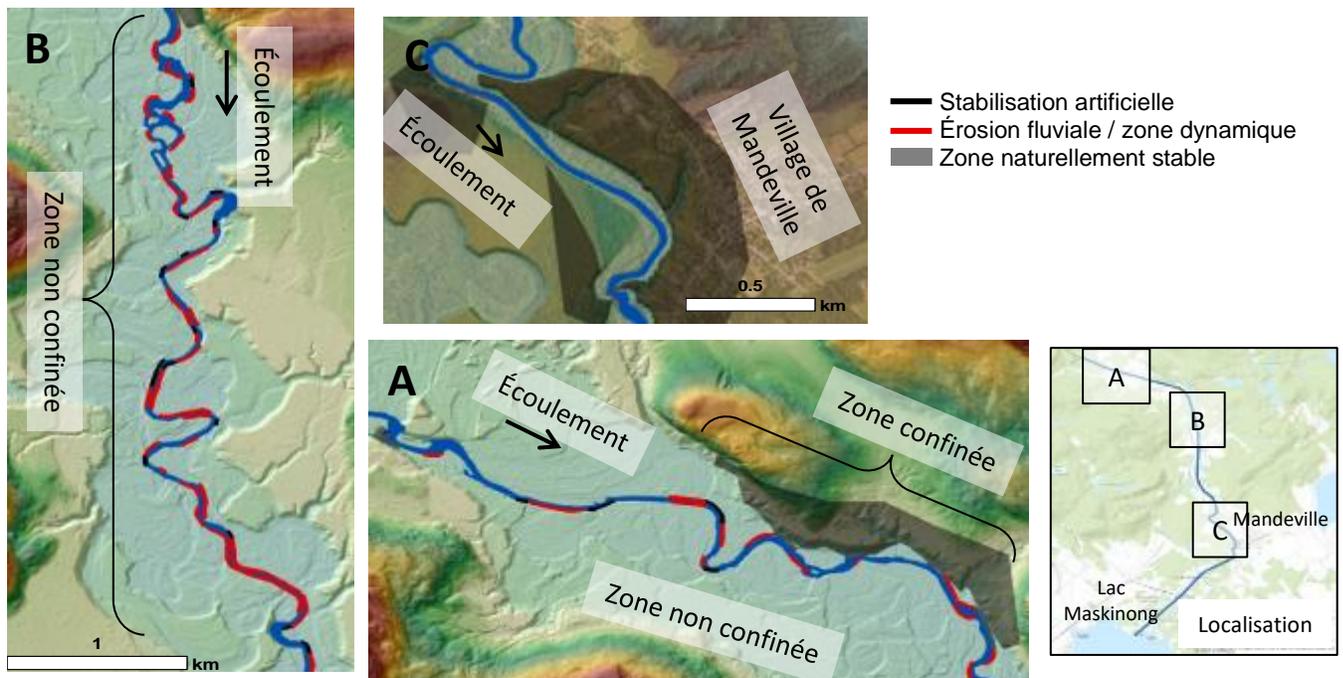


Figure 6 : Exemples de sections non confinée (B), semi-confinée (A) et confinée (C)

5.2 Détermination de l'espace M₅₀

L'espace M₅₀ comprend :

- les zones érodées sur les 50 prochaines années si les tendances historiques observées perdurent, ainsi que les zones à risque d'avulsion ;
- les zones à risque d'avulsion ;
- les zones probablement érodées en l'absence d'enrochements et autres structures anthropiques limitant l'érosion.
- les zones à fort dynamisme

5.2.1 Détermination des zones probables d'érosion sur 50 ans

L'érosion des berges est évaluée à partir de photographies aériennes historiques qui doivent être numérisées, géoréférencées, et sur lesquelles la position du chenal est relevée. Ce travail a été effectué sur la rivière Mastigouche avec les photographies détaillées au tableau 2.

Tableau 2 : Photographies aériennes utilisées

Année	Échelle d'origine	Source	Support d'origine
1952 - 1954	1:15,000	Carthothèque UQÀM	Papier
1965 - 1966	1:15, 840	Carthothèque UQÀM	Papier
1975	1:15,000	Carthothèque UQÀM	Papier
1979 - 1982	1:20,000 et 1:15,000	Carthothèque UQÀM	Papier
1992	1:40,000	Carthothèque UQÀM	papier
2008	1m/pixel	DOQ (Digital Orthophoto Quad), AGIR Maskinongé	Numérique
2017	1m/pixel	DOQ (Digital Orthophoto Quad), AGIR Maskinongé	Numérique

La figure 7 montre le résultat de ce travail pour deux sections de la rivière Mastigouche.

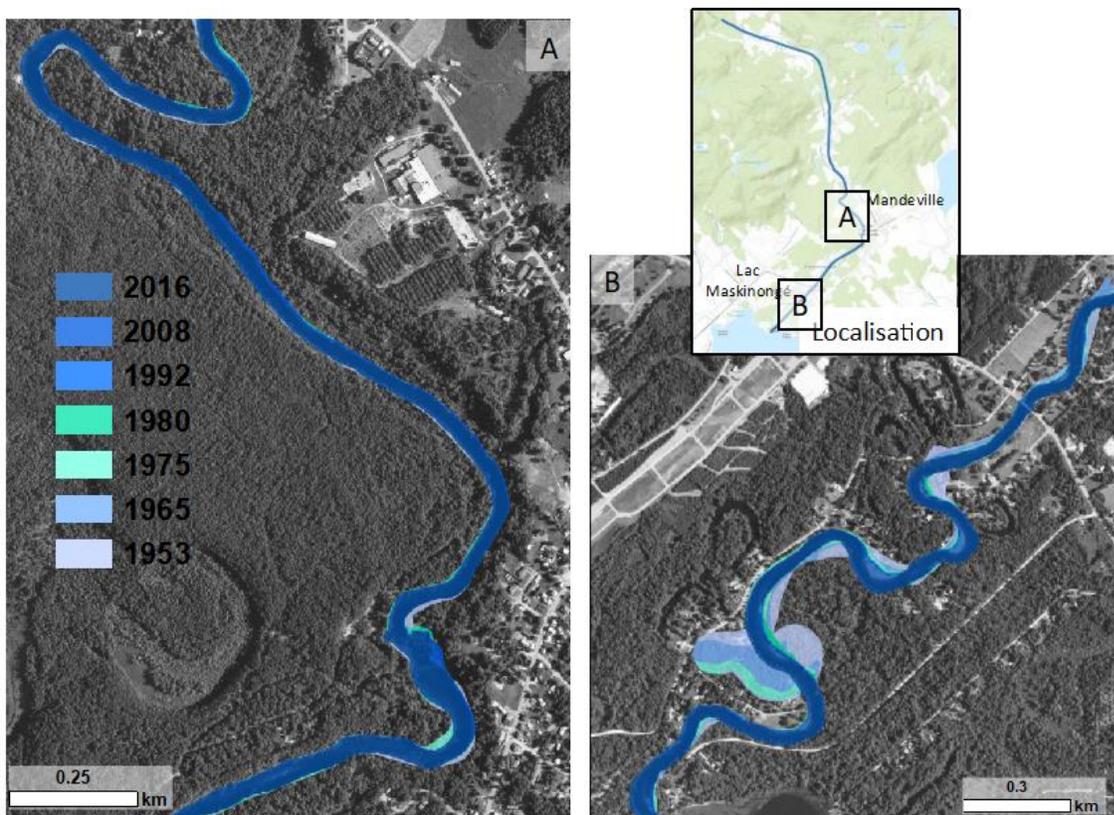


Figure 7 : Position du chenal sur les différentes années de photographies aériennes pour deux sections de la rivière Mastigouche. A) Section stable, peu de mobilité historique observée B) Section dynamique, où l'emplacement du chenal sur les photographies les plus anciennes peut diverger de manière importante par rapport à son emplacement actuel

Des transects sont ensuite placés environ tous les 5m (figure 8). La position du centre du chenal, pour les différentes années, est interpolée linéairement puis extrapolée sur 50 ans (figure 8). Seules les extrapolations pour lesquelles l'érosion suit une progression relativement linéaire ($R^2 > 0.5$), et pour lesquelles au moins 5 m d'érosion sont prévus, sont conservées.

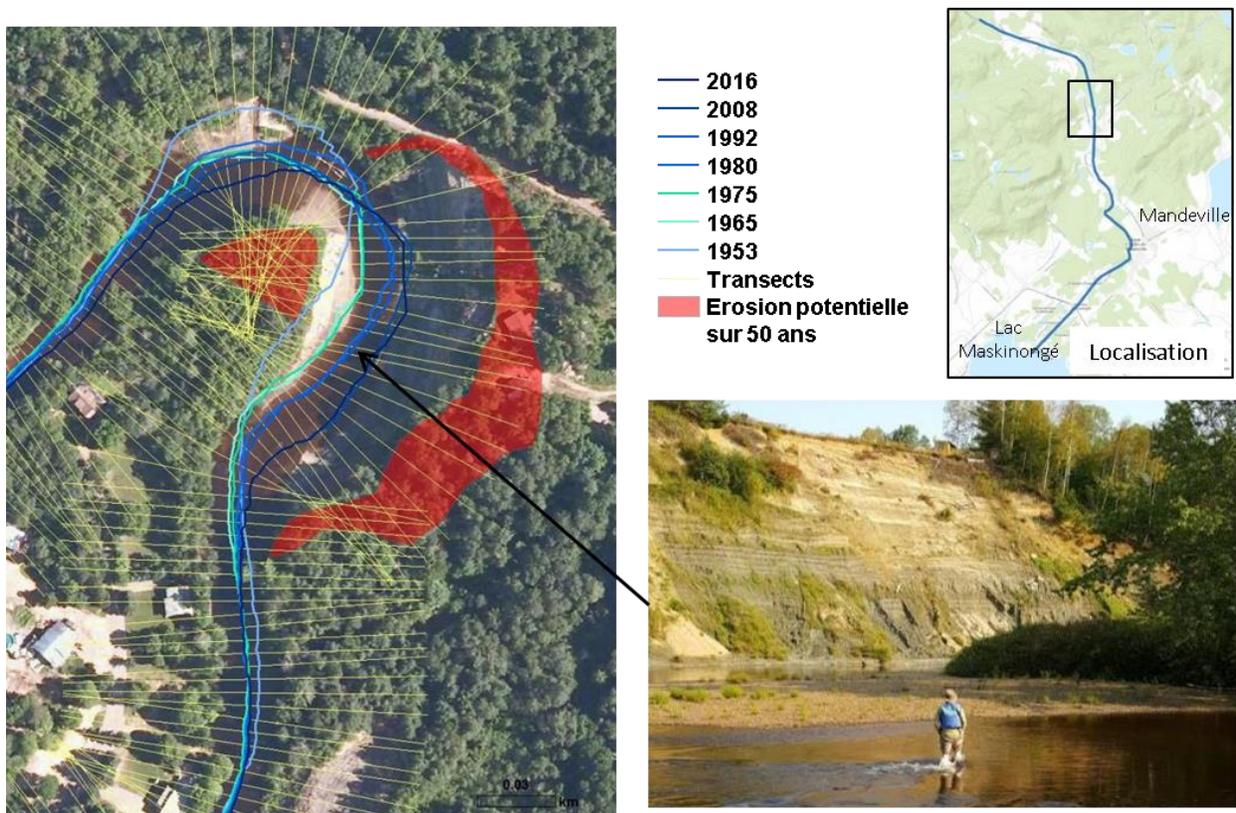


Figure 8 : Extrapolation de l'érosion historique sur 50 ans

5.2.2 Détermination des zones probables d'avulsion

Les zones probables d'avulsion sont déterminées à partir de la position du chenal. Les méandres pour lesquels la largeur de la bande de terre restante à l'intérieur du méandre (après extrapolation de l'érosion sur 50 ans) est inférieure à 4 fois la largeur du chenal sont considérés à risque d'avulsion (figure 9).

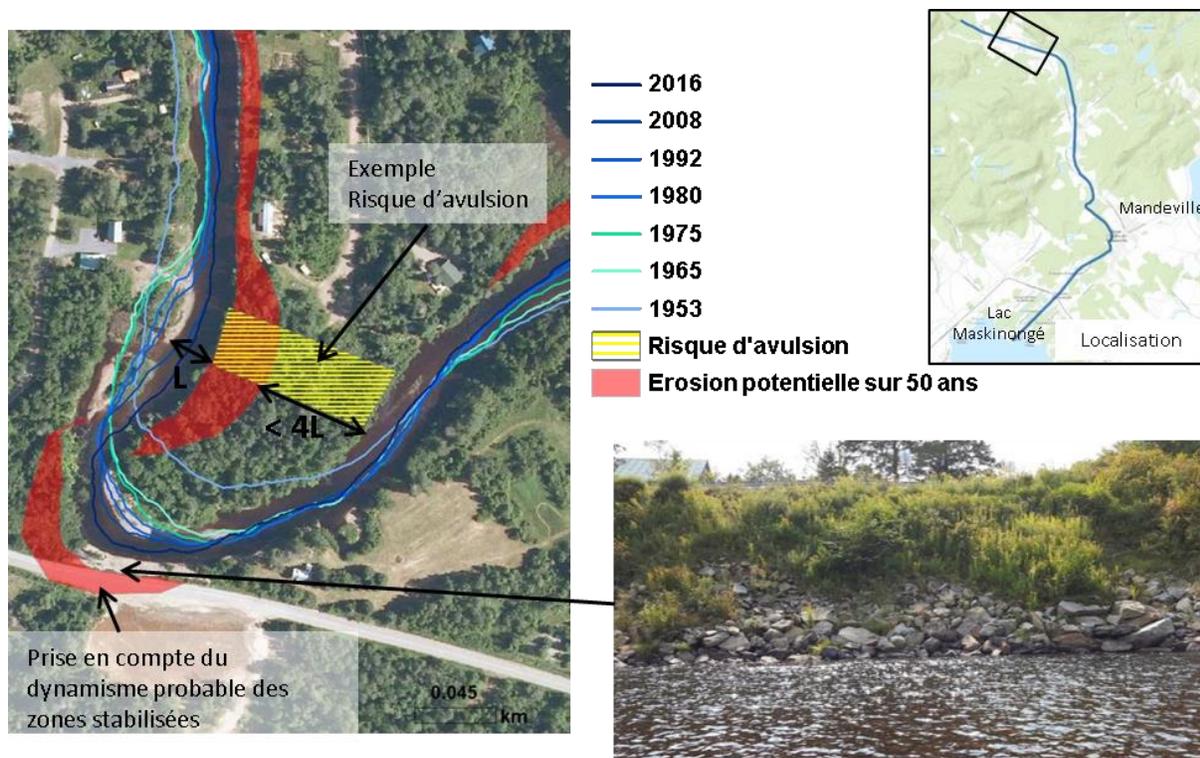


Figure 9 : Exemple de méandre à risque d'avulsion sur la rivière Mastigouche et prise en compte de l'érosion naturelle probable sur un secteur stabilisé.

Il est à noter que l'avulsion d'un méandre vient considérablement modifier l'écoulement aux alentours de la section où se produit l'avulsion. Par conséquent, l'érosion des berges évaluée précédemment en serait fortement modifiée. En particulier, une instabilité plus grande est en général observée autour de l'avulsion, alors que l'érosion sur la berge externe du méandre coupée s'arrête.

5.2.3 Évaluation de l'érosion en absence d'enrochement

Le but de l'exercice de cartographie de l'espace de liberté est d'évaluer les aléas fluviaux naturels, c'est-à-dire en absence d'intervention humaine. L'érosion historique observée peut cependant être inférieure à l'érosion qui aurait eu lieu naturellement en raison d'enrochement la limitant. Pour cette raison, les zones d'enrochement ont été répertoriées lors de visites de terrain. L'hypothèse est ensuite posée que si un enrochement a été installé à cet endroit, il s'agit d'un secteur où une érosion sévère avait lieu. Le 90^{ième} percentile des taux d'érosion linéaire mesurés précédemment, pour l'ensemble des mesures faites sur le tronçon homogène, est alors extrapolé linéairement sur 50 ans pour évaluer l'érosion naturelle (figure 9)

5.2.4 Identification des zones à fort dynamisme

Cette procédure de la méthodologie de cartographie de l'espace de liberté permet d'identifier les tronçons homogènes pour lesquels le dynamisme de la rivière, et donc l'érosion des berges, est trop intense pour que les techniques décrites précédemment puissent être appliquées. Dans ce cas, l'ensemble de l'espace M_{plaine} est alors considéré comme à risque d'érosion à court terme et est reclassé en M_{50} . L'identification de ces tronçons est effectuée en calculant le taux de renouvellement de l'espace M_{plaine} . Le taux de renouvellement correspond à une mesure du temps nécessaire à la rivière pour éroder l'ensemble de l'espace M_{plaine} . Sur la rivière

Mastigouche, aucun tronçon n'a été jugé assez dynamique (taux de renouvellement inférieur à 200 ans).

5.3 Le delta de la rivière Mastigouche : un cas particulier

L'extrémité aval de la rivière Mastigouche constitue un delta. Ce type de forme correspond à une zone d'accumulation de sédiments, alors que la rivière perd de la puissance au fur et à mesure qu'elle se rapproche du lac Maskinongé, soit son niveau de base. L'accumulation de sédiments dans le chenal principal peut mener à une avulsion du chenal. Contrairement aux avulsions déclenchées par le pincement d'un méandre suite à l'érosion de ses berges, qui restent relativement locales, l'avulsion résultant de l'accumulation de sédiments dans une zone deltaïque peut modifier l'emplacement du chenal sur une longue distance, changeant l'emplacement où la rivière rejoint le lac Maskinongé.

Ce type de situation n'a jusqu'alors pas été étudié dans les projets de cartographie de l'espace de liberté. Une méthodologie a donc dû être développée pour inclure les risques d'avulsion en milieu deltaïque. Ces risques demeurant faibles, mais pouvant affecter un large territoire, il convient de les inclure dans l'espace de mobilité M_{plaine} . L'observation des photographies aériennes et des données LiDAR révèle d'ailleurs que, sur le delta de la rivière Mastigouche, de nombreuses cicatrices d'anciens tracés du cours d'eau sont visibles et situées en dehors de l'espace M_{plaine} basé uniquement sur les caractéristiques des méandres (« Meander belt width ») (figure 10). La cartographie de l'espace M_{plaine} selon cette méthode n'est donc pas appropriée pour cette situation.

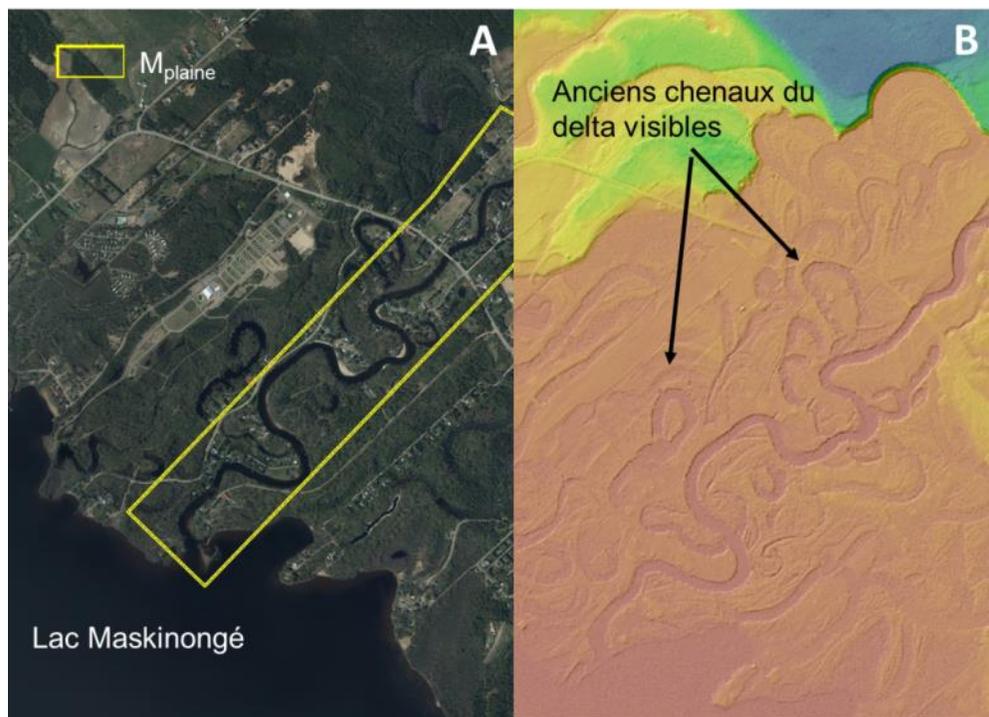


Figure 10 : Espace M_{plaine} obtenu par la méthode actuelle (« Meander belt width ») et anciens chenaux de la rivière Mastigouche au niveau de son delta.

Deux approches ont été utilisées :

- Simulations d'avulsions forcées dans le chenal

Cette méthode consiste à simuler le parcours de l'eau, à partir des données LiDAR, si le chenal est subitement bloqué, grâce à des traitements réalisés avec un système d'information géographique (ArcGIS). 21 simulations ont été réalisées en bloquant l'écoulement dans le chenal à différents points.

- Simulations d'avulsions aléatoires

Cette méthode est une généralisation de la méthode précédente. Plutôt que de bloquer manuellement l'écoulement dans le chenal, un bruit est ajouté sur un modèle numérique d'élévation afin de modifier aléatoirement l'écoulement. Cette méthode est inspirée de la méthodologie EXZECO développée par Pons et al. (2010). Elle a l'avantage d'être entièrement automatisable et peut donc être répétée de nombreuses fois. 500 itérations ont été effectuées, avec un bruit de 0 à 3 mètres dans le chenal pour créer une avulsion, et un bruit de 0 à 1 mètre dans la plaine alluviale pour permettre le passage de l'eau selon différents parcours.

Les résultats des deux méthodes sont présentés à la figure 11. Il peut être constaté sur cette figure que les deux méthodes produisent des résultats similaires. L'enveloppe globale des différents parcours simulés a ensuite été utilisée pour déterminer l'espace M_{plaine} en zone deltaïque (figure 11).

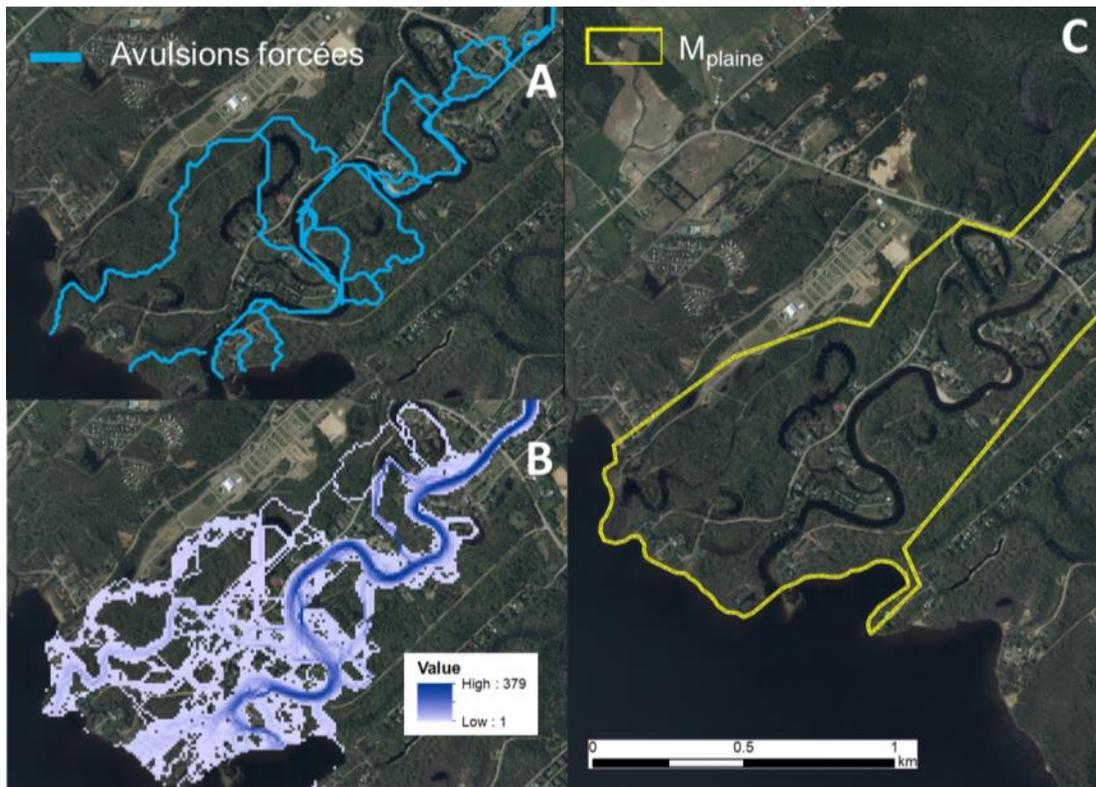


Figure 11 : Résultats des simulations d'avulsion, forcées manuellement (A) et par bruitage aléatoire du MNE (B). M_{plaine} résultant de ces simulations (C).

6 ÉVALUATION DE L'ESPACE D'INONDABILITÉ

6.1 La méthode hydrogéomorphologique

La cartographie des aléas d'inondation dans le cadre d'une cartographie de l'espace de liberté se fait par la méthode hydrogéomorphologique (HGM). Cette méthode consiste à observer sur le terrain ou par des données de télédétection les formes du terrain (appelés modelés) et d'autres indices pour déterminer l'étendue de la plaine inondable. L'idée sous-jacente est que les inondations ayant lieu sur un territoire laissent des traces visibles (figure 12). À l'inverse, l'absence d'inondation sur un territoire peut également être observée, en particulier par l'étude du sol. Les travaux de Demers et al. (2014, 2017) peuvent être consultés pour plus de détails sur la méthodologie de cartographie des zones inondables par la méthode HGM au Québec.

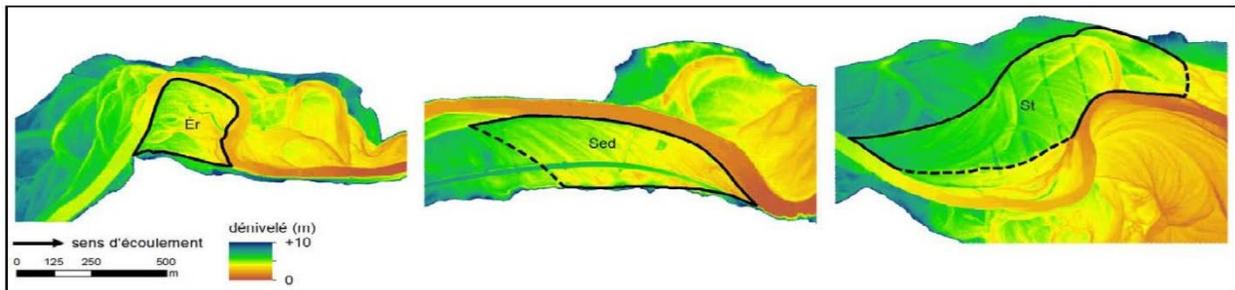


Figure 12 : Exemples d'indicateurs morphologiques pour trois types de modelés de la plaine alluviale de la rivière Matane. Ér : érosion ; Sed : sédimentation ; St : stable. Le trait pointillé indique une limite en transition. D'après Demers et al. 2014

Une étude approfondie des modelés permet non seulement d'en connaître le caractère inondable, mais fournit également des renseignements sur la fréquence des inondations. Comme illustré à la figure 13, certains modelés comme les jets de berges, les courants de recirculation, la présence de talus d'érosion marqué ou de chenaux de débordement sont des signes d'inondations fréquentes. Il est donc ainsi possible par la méthode HGM de distinguer les espaces $F_{\text{élevé}}$ et F_{med} . Le troisième espace d'inondabilité, l'espace d'inondabilité potentielle F_{faible} , est formé des modelés stables, c'est-à-dire les modelés issus des processus d'inondation (faisant partie de la plaine alluviale), mais pour lesquels il y a absence de trace d'inondations récentes.

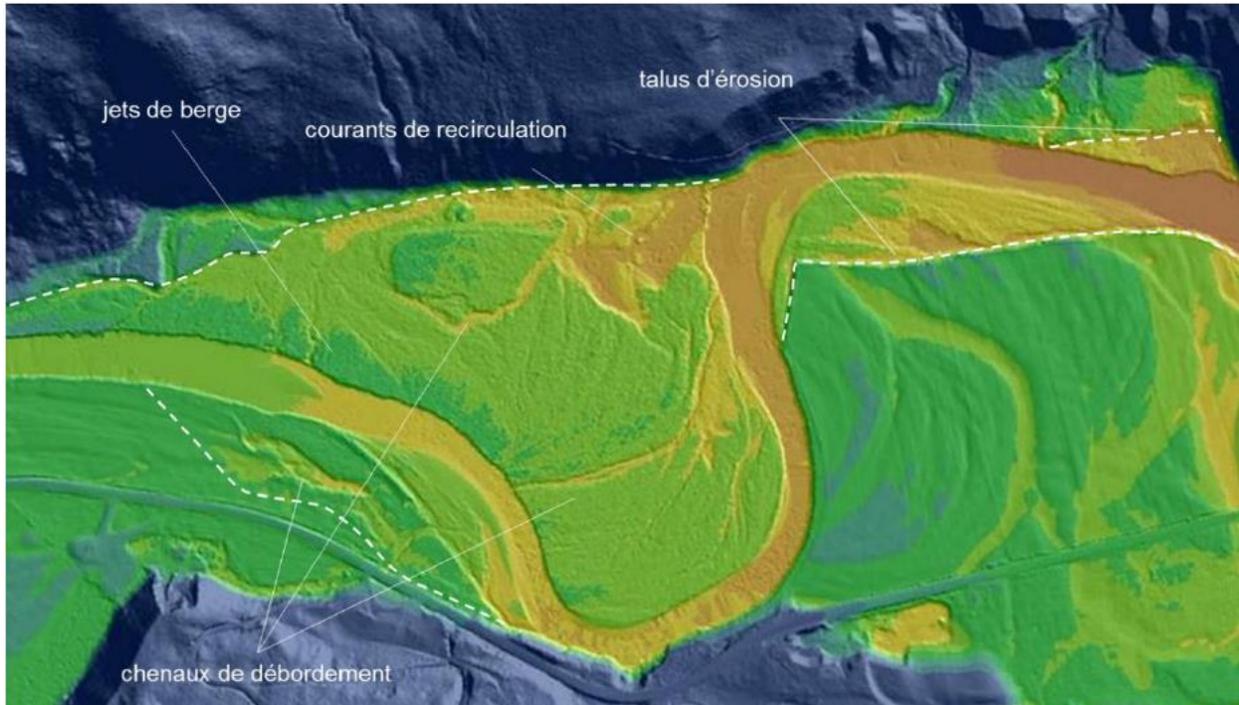


Figure 13 : Formes associées à des processus dynamiques pouvant servir à la délimitation des zones inondables de récurrence élevée : les chenaux de débordements, jets de berges, courants de circulation et talus d'érosion. D'après Demers et al. 2017

L'étude des modelés à partir des données LiDAR a permis, pour la rivière Mastigouche, de déterminer l'espace d'inondabilité $F_{\text{élevé}}$. Cependant la présence importante de terrasses alluviales n'a pas permis de cartographier les espaces F_{med} et F_{faible} selon les méthodes habituelles. Les terrasses alluviales sont des vestiges de conditions hydrauliques passées : suite aux retraits des glaciers après la dernière glaciation (il y a environ 10 000 ans), la mer de Champlain s'est formée sur les actuelles Basses-Terres du Saint-Laurent, englobant même le lac Maskinongé et remontant partiellement dans l'actuelle vallée de la rivière Mastigouche. Avec le rebond isostatique (remontée de la croûte terrestre après la glaciation, menant au retrait de la mer de Champlain), la rivière Mastigouche s'est incisée dans ses propres dépôts alluviaux, créant des terrasses alluviales, comme illustrées à la figure 14. Les terrasses alluviales sont donc d'anciennes plaines inondables abandonnées (elles ne sont plus inondées).



Figure 14 : Exemple de terrasses alluviales sur la rivière Thompson près de Cache Creek, Colombie Britannique (Trenhaile 2009).

Les terrasses alluviales rendent la cartographie des zones inondables par la méthode HGM plus complexe. En effet, des indices et formes habituellement trouvés dans la plaine alluviale active peuvent demeurer sur les terrasses alluviales. La figure 15 montre par exemple un bras mort, habituellement caractéristique d'une zone inondable, situé à environ 5m en surplomb de l'actuelle plaine alluviale de la rivière Mastigouche.

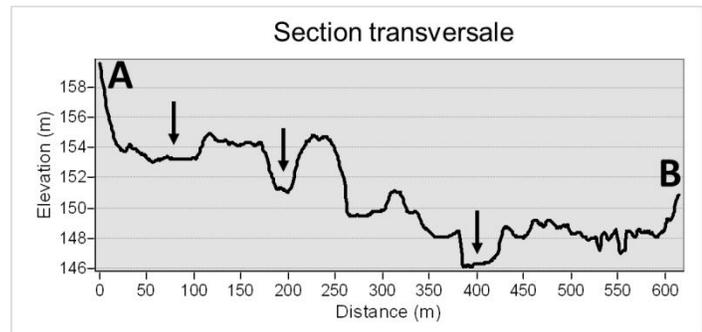
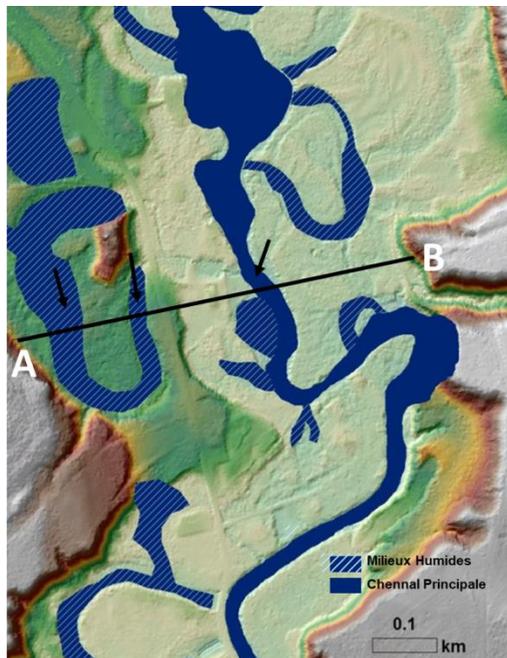


Figure 15 : Section transversale sur la rivière Mastigouche, obtenue par les données LiDAR, montrant l'élévation relative d'un bras mort par rapport au chenal actuel et à sa plaine alluviale.

Les terrasses alluviales ont déjà été observées sur la rivière Matane, notamment, qui a fait l'objet d'une cartographie de l'espace de liberté (Biron et al. 2013a; 2014, Demers et al. 2014, 2017). Sur la rivière Matane, les terrasses alluviales sont cependant moins marquées que sur la rivière Mastigouche, et ont été classifiées comme des modelés stables inclus dans l'espace F_{faible} . Dans le cas de la rivière Mastigouche, la différence d'élévation observée sur la terrasse alluviale illustrée à la figure 15 permet de statuer sans ambiguïté sur le caractère non inondable de cette terrasse. Des cas moins évidents sont cependant présents sur la rivière Mastigouche, avec des terrasses moins élevées et des situations de transition entre les terrasses alluviales et la plaine alluviale. Il est donc difficile de toujours distinguer les terrasses alluviales non inondables, celles potentiellement inondables pouvant être incluses dans un espace F_{faible} , et la plaine alluviale à inclure dans un espace F_{med} . De plus, comme cela a été effectué pour la rivière Matane, des analyses pédologiques sont nécessaires pour séparer les modelés stables (à inclure dans F_{faible}) des modelés de la plaine alluviale fonctionnelle de sédimentation ou d'érosion (à inclure dans F_{med}) (Demers et al. 2014). Cependant, ces techniques demandent des campagnes de terrain intensives. Dans le cas présent, il a été décidé de guider la classification des modelés obtenus par la cartographie HGM comme faisant partie ou non de la plaine alluviale fonctionnelle par une modélisation hydraulique des inondations.

6.2 La méthode hydraulique

La modélisation hydraulique est la méthode traditionnellement utilisée pour la définition des zones inondables (zones de grand courant et de faible courant selon la PPRLPI). Il s'agit dans un premier temps d'obtenir des débits de récurrences données (Q_{20} ou Q_{100} , débits de récurrence 20 ans et 100 ans, le plus souvent) par une analyse hydrologique. Ensuite, un modèle hydraulique permet de transformer le débit utilisé en cotes de crues et/ou en une carte des zones inondées. Le modèle hydraulique est dans la plupart des cas un logiciel informatique (HEC-RAS étant le plus utilisé en Amérique du Nord). Les cartes de zones inondables et les cotes de crues associées disponibles sur le site web du Centre d'Expertise Hydrique du Québec (MDDELCC 2018) pour le site d'étude ont été réalisées par une modélisation hydraulique (CEHQ 2003).

6.2.1 Analyse hydrologique

L'analyse hydrologique est l'étape permettant de calculer les débits de crues. Une telle analyse est disponible dans le rapport de détermination des cotes de crues (CEHQ 2003). Ce type d'analyse étant basé sur les débits enregistrés aux stations de jaugeage, il est pertinent cependant de mettre à jour la banque de données afin d'utiliser les valeurs de débits des stations de jaugeage enregistrées depuis 2003 et ainsi réduire les erreurs. Le tableau 3 montre les résultats de cette nouvelle analyse ainsi que les résultats de l'analyse du CEHQ (2003). Les détails de l'analyse effectuée et des divergences avec les données du CEHQ (2003) sont fournis à l'annexe 2.

Tableau 3 : Débits de crues sur la rivière Mastigouche (en aval du tronçon 1 du rapport de détermination des cotes de crues du CEHQ)

	Q ₂₀ (m ³ /s)	Q ₁₀₀ (m ³ /s)	Q ₅₀₀ (m ³ /s)
CEHQ 2003	107.5	123.8	N.D.
Nouvelle analyse	165.6	176.6	183.2
Intervalle de confiance à 95%	148.2 - 196.5	156.6 - 214.4	161.5 - 225.5

Deux constats principaux peuvent être tirés du tableau 3 :

- Les débits calculés par le CEHQ (2003) sont nettement inférieurs à ceux calculés par les nouvelles analyses. Les vérifications effectuées (disponibles en annexe 2) montrent que la différence provient très probablement d'une sous-estimation des débits calculés par le CEHQ. Par conséquent, **les cartes de zones inondables et les cotes de crues actuellement en vigueur sur le territoire de la municipalité de Mandeville sous-estiment probablement les crues**. À noter cependant que l'influence du débit sur les cotes de crues est de plus en plus faible au fur et à mesure que l'on se rapproche du lac Maskinongé, où des données précises de niveaux existent depuis 1972. Les cotes de crues et la cartographie réalisées par le CEHQ (2003) pour la portion aval de la rivière (tronçon 3), proche du lac, sont donc vraisemblablement fiables.
- Il existe une forte incertitude sur les débits de crues calculés. Cela est dû au faible nombre d'années de données pour les débits à la station de jaugeage sur la rivière Mastigouche (22 années).

6.2.2 Modélisation hydraulique

Les techniques de modélisation hydraulique traditionnelles nécessitent l'utilisation de données de bathymétrie (profils transversaux du lit de la rivière). Or, ces données ne sont pas disponibles pour la rivière Mastigouche et leur acquisition nécessiterait des travaux de terrain coûteux. Des techniques sont cependant actuellement en développement pour adapter les techniques de modélisation hydrauliques traditionnelles aux cas où les données de bathymétrie sont manquantes, et pour estimer les incertitudes associées aux approximations effectuées dans ces cas. La zone d'étude de la rivière Mastigouche a donc servi de zone de test pour l'utilisation de ces techniques de modélisation des crues en absence de bathymétrie. Les détails de la procédure sont décrits dans l'article scientifique de Choné et al. (2018). Les tests réalisés montrent que, après calibration du modèle (paramétrage du modèle pour reproduire des cotes d'inondation mesurées lors d'une crue historique), les cotes de crues peuvent être estimées avec des erreurs inférieures à 5 cm. Cette faible erreur permet donc de conclure que la

méthodologie d'estimation des cotes en absence de données de bathymétrie est une méthode fiable.

6.3 Utilisation conjointe des méthodes HGM et hydraulique

La méthode hydraulique développée possède de nombreuses limites et incertitudes. En particulier, l'incertitude sur les débits est très grande (tableau 3). De plus, la calibration du modèle est approximative, car réalisée sur une portion seulement du territoire couvert. À cela s'ajoutent les erreurs (même faibles) liées à l'absence de bathymétrie, ainsi que les limites habituelles des modèles hydrauliques, notamment l'absence de prise en compte des embâcles de glace et l'hypothèse de débits actuels et futurs identiques aux observations passées (absence de prise en compte des changements climatiques). Bien que les résultats obtenus par simulation hydraulique comportent une incertitude assez grande, ils ont été utilisés dans le cas de la cartographie des espaces d'inondabilité de la rivière Mastigouche de deux façons.

6.3.1 Utilisation de la méthode hydraulique en support à la méthode HGM

Des simulations ont été effectuées avec la méthode hydraulique avec un débit de récurrence 100 ans. Les modelés distingués par la méthode HGM inclus, même partiellement, dans l'espace délimité par la méthode hydraulique ont été inclus dans l'espace F_{med} . Les résultats des simulations hydrauliques servent donc ici de guide pour choisir d'inclure ou d'exclure les terrasses alluviales de la zone F_{med} . Certaines terrasses étant trop hautes pour être incluses dans un espace d'inondabilité, il n'a pas été possible dans le cas de la rivière Mastigouche d'identifier un espace d'inondabilité potentiel F_{faible} .

6.3.2 Utilisation de la méthode hydraulique en ajout à la méthode HGM

Comme spécifié par Demers et al. (2017), les résultats de simulations hydrauliques peuvent être utilisés pour produire une cartographie des espaces d'inondabilité, même dans le cas où une cartographie est également réalisée par la méthode HGM. Deux simulations hydrauliques ont été utilisées :

- avec un débit de récurrence 20 ans

Les zones couvertes par les résultats de simulation ont été ajoutées à l'espace d'inondabilité $F_{élevé}$.

- avec la borne supérieure de l'intervalle de confiance du débit de récurrence 100 ans

Les zones couvertes par les résultats de simulation ont été ajoutées à l'espace d'inondabilité F_{med} . Devant l'incertitude liée aux débits de simulation, et puisque la méthodologie HGM n'a pas permis de distinguer une zone F_{faible} , il a été choisi d'utiliser la borne supérieure de l'intervalle de confiance du débit de récurrence 100 ans, plutôt que le débit de récurrence 100 ans (voir tableau 3). Il s'agit d'un choix conservateur, c'est-à-dire préférant inclure à tort des surfaces dans la zone F_{med} plutôt que de prendre le risque d'exclure à tort des surfaces possiblement inondables de la zone F_{med} .

6.4 Cônes alluviaux

La méthodologie HGM inclut également l'identification des cônes alluviaux, à inclure dans l'espace d'inondabilité $F_{élevé}$. L'étude des données LiDAR n'a cependant pas permis d'identifier des cônes alluviaux le long du tronçon d'étude sur la rivière Mastigouche.

6.5 Milieux humides

Les données fournies par AGIR Maskinongé ont été utilisées pour la cartographie des milieux humides. Un travail de photo-interprétation a également été effectué pour compléter ces données.

7 TRAJECTOIRE GÉOMORPHOLOGIQUE DE LA RIVIÈRE MASTIGOUCHE

Dû aux contraintes budgétaires et temporelles du projet, une analyse complète de la trajectoire géomorphologique de la rivière Mastigouche n'a pas été complétée. Il en est de même de l'analyse de l'impact des activités forestières sur le bassin versant de ce cours d'eau. Cependant, l'analyse des photographies aériennes historiques et les travaux de terrains effectués pour la cartographie de l'espace de mobilité ont permis de faire quelques constats sur ce sujet.

7.1 Stabilité verticale du chenal

Comme discuté auparavant, la présence de terrasses alluviales indique que la rivière s'est incisée dans ses propres dépôts au fil du temps. La présence d'un delta alluvial sur l'extrémité aval de la rivière laisse croire que ce processus est parvenu à sa fin, et que la rivière a atteint un profil longitudinal en équilibre avec le niveau actuel du lac Maskinongé, à tout le moins pour la partie aval de la rivière (tronçon 8). Le delta est en effet une zone de dépôt de sédiments. Cependant, les rapides observés au tronçon 7, proche du village de Mandeville, constituent un bris dans ce profil en équilibre, et la stabilité verticale de ces rapides peut être remise en question. En effet, la destruction du barrage sur ce tronçon est relativement récente (fin des années 50 ou début des années 60) et des ajustements morphologiques peuvent encore avoir lieu sur ce tronçon. Si la rivière peut éroder son lit au niveau du rapide, il en résulterait une dégradation (une incision) du lit en amont (tronçons 5 et 6). Les observations de terrain laissent croire que ce processus est actuellement en place (hauteur importante des berges, lit profond et faible présence de bancs de sable ou de gravier). Il pourrait en résulter une diminution des risques d'inondation et de mobilité du chenal sur les tronçons 5 et 6, mais une augmentation des risques de glissement de terrain.

À l'inverse, les observations effectuées sur le tronçon 4 semblent indiquer une aggradation du lit (un dépôt de sédiment). De nombreux bancs de sable sont en effet présents sur ce tronçon et la hauteur des berges est plus faible. Les multiples chenaux sont également un signe possible d'aggradation, ou tout du moins d'un transport important de sédiment. L'étude du profil longitudinal de la rivière montre par ailleurs qu'il s'agit d'une zone où la pente devient subitement plus faible que pour les tronçons en amont, ce qui favorise l'aggradation dans le chenal. Cette dynamique sédimentaire peut augmenter les risques d'inondations sur ce tronçon, ainsi que les risques d'avulsions.

Plus en amont (tronçons 1, 2 et 3), il n'a pas été observé d'indices montrant une tendance claire vers une aggradation ou une dégradation du chenal.

7.2 Impact des activités forestières

7.2.1 Tendances historiques

L'analyse des photographies historiques montre que le territoire constituant la vallée de la Mastigouche, sur la section d'étude, a subi une reforestation importante durant les 60 dernières années. De nombreuses terres agricoles ont en effet été abandonnées. Ce changement d'utilisation du sol sur le bassin versant a deux impacts potentiels sur la dynamique du cours d'eau : une réduction de l'apport en sédiment, et une diminution du temps de réponse hydrologique.

- Réduction de l'apport en sédiment

La forêt offre une meilleure protection des terres contre l'érosion de surface, comparée à des cultures ou des pâturages. La reforestation du bassin versant peut donc se traduire par une diminution des sédiments dans le chenal. L'observation des photographies aériennes laisse d'ailleurs croire que la quantité de bancs a diminué sur la rivière Mastigouche, surtout dans la partie aval (tronçon 8). Cette diminution de l'apport en sédiment pourrait également être à l'origine des observations effectuées sur les tronçons 5 et 6 (hauteur importante des berges, lit profond et faible présence de bancs de sable ou de gravier) et associées précédemment à une incision au niveau des rapides au tronçon 7.

- Diminution du temps de réponse hydrologique

La reforestation d'une parcelle de terre a un important effet hydrologique. L'augmentation de l'évapotranspiration et la diminution du ruissellement viennent limiter l'apport en eau dans le cours d'eau lors d'un événement de pluie intense. Il en résulte une diminution possible du pic de crue et un étalement de la crue. Les inondations peuvent donc être moins sévères qu'autrefois.

7.2.2 Impacts potentiels d'une déforestation sur le bassin versant

Des travaux de foresterie effectués en amont de la zone d'étude, sur le bassin versant de la rivière Mastigouche, pourraient avoir les effets inverses de ceux cités précédemment concernant la reforestation du territoire. Une augmentation du ruissellement, et donc de l'intensité des pics de crues, pourrait donc théoriquement être la conséquence d'activités forestières. L'augmentation des sédiments disponibles dans le cours d'eau pourrait également en modifier la dynamique, et donc augmenter les risques d'érosion des berges et d'inondation. Cependant, de nombreux autres paramètres peuvent venir mitiger ces effets théoriques, et d'autres activités anthropiques, voire d'autres événements naturels, peuvent avoir des effets semblables. Il est donc impossible à l'heure actuelle de statuer sur les effets réels d'une coupe forestière sur la rivière Mastigouche sans une étude plus approfondie sur le sujet.

8 BILAN DES ALÉAS FLUVIAUX SUR LA RIVIÈRE MASTIGOUCHE ET RISQUES ASSOCIÉS

La carte des aléas fluviaux, en annexe 3, permet de visualiser les zones potentiellement affectées par la mobilité du chenal. La carte de l'espace de liberté, en annexe 3, permet une visualisation plus synthétique. L'identification des infrastructures (routes principalement) et des bâtiments sur ces cartes permet donc d'évaluer les risques associés aux aléas fluviaux. Les infrastructures et bâtiment situés dans, ou à proximité immédiate, de l'espace de liberté minimal L_{\min} sont considérés comme à risque. Les infrastructures et bâtiments situés dans l'espace de liberté fonctionnelle L_{fonc} sont *potentiellement* à risque, c'est-à-dire que le niveau de risque est soit existant, mais relativement faible, soit indéterminé (les avulsions, par exemple, sont des événements rares, mais aux conséquences importantes — il est donc difficile d'évaluer le risque lié aux avulsions). Les choix réalisés pour la cartographie de l'espace de liberté fonctionnel L_{fonc} sont conservateurs, dans le sens que les zones pour lesquelles les aléas étaient incertains ont été incluses.

Les principaux risques fluviaux sont détaillés ci-dessous, tronçon par tronçon.

Tronçon 1 : Il s'agit d'un tronçon avec des méandres de faible amplitude, mais vraisemblablement assez dynamiques. Des ajustements morphologiques sont possiblement encore en cours suite à la démolition d'un barrage présent sur ce tronçon jusqu'aux années 1950. Une érosion importante peut avoir lieu dans les méandres. L'érosion touche

principalement des terres forestières, mais des habitations situées sur le rang Mastigouche pourraient être menacées.

Le confinement limite fortement les inondations pour ce secteur, qui ne représente pas un risque.

Tronçon 2 : Ce tronçon étant confiné entre le rang Mastigouche / rang 3 Peterborough Nord sur la rive gauche et le chemin de la Branche à Gauche sur la rive droite, peu d'érosion a été historiquement observée. Cependant, ce secteur ne semble contraint que par les aménagements anthropiques, et non par la morphologie du territoire. Ce tronçon est donc globalement considéré comme dynamique et une érosion importante pourrait y avoir lieu. Les habitations situées le long du rang Mastigouche pourraient être menacées.

Les inondations sont confinées pour la partie amont de ce tronçon, mais peuvent toucher les habitations situées entre la rivière et le rang Mastigouche en amont du pont. En aval du pont, le risque d'inondation concerne un territoire plus large et englobe les habitations le long du rang 3 Peterborough Nord ainsi que, avec un risque moindre, les habitations le long du rang Mastigouche en aval du pont.

Tronçon 3 : Le tronçon 3 est un tronçon fortement dynamique. Une érosion importante est à prévoir le long de ce tronçon. La boucle de méandre arrivant au bord du rang Mastigouche est particulièrement problématique, et l'érosion menace le rang Mastigouche, mais pourrait également atteindre certaines habitations dans le secteur des deux côtés de la rivière. Ces mêmes habitations sont également en zones inondables. En dehors de cette boucle de méandre, le territoire affecté par les inondations ou l'érosion des berges est peu développé.

Tronçon 4 : Il s'agit d'un tronçon également très dynamique. Comme ce tronçon se caractérise par la présence de chenaux multiples, d'un chenal complexe avec une présence de bois mort, des risques d'avulsion (changement soudain de l'emplacement du lit principal de la rivière) et de modification des zones inondables et du dynamisme par la création d'embâcles de bois sont possibles. Un embâcle de bois important est d'ailleurs présent. Le territoire est cependant peu développé, limitant les risques dans le secteur, mais les habitations présentes peuvent être fortement à risque.

Tronçon 5 : Ce tronçon est probablement moins dynamique que les précédents, mais les risques d'érosion sont toujours présents. S'agissant d'un tronçon avec des méandres de plus grande amplitude, l'érosion est particulièrement importante sur les berges externes de ces méandres. La terrasse alluviale en érosion active au début du tronçon va très probablement continuer à s'éroder et pourrait menacer à nouveau la maison située en arrière, malgré sa relocalisation récente. Les méandres étant comprimés entre le rang de la rivière et le rang Mastigouche, l'érosion des berges des méandres est problématique pour ces deux chemins. Certaines habitations situées sur les côtés externes des méandres pourraient également être affectées par des problèmes d'érosion. De plus, ce tronçon est également un secteur avec une plus grande densité d'habitation que les secteurs précédents, et de nombreuses habitations sont situées en zone inondable, tout comme l'est le camping.

Tronçon 6 : Il s'agit du tronçon longeant le village de Mandeville. Ce tronçon est fortement confiné dans des dépôts alluviaux (rive gauche) et des affleurements rocheux (rive droite), limitant à la fois l'érosion et les inondations. Bien que des glissements de terrain soient présents dans cette zone le long de la rivière, sur la rive gauche, il est peu probable qu'une migration de chenal ait lieu dans ce secteur, l'analyse des photographies historiques montrant une faible mobilité du chenal pour ce tronçon.

Tronçon 7 : Ce tronçon est assez similaire au tronçon précédent et peu de risques d'inondation et d'érosion sont présents. Des ajustements morphologiques (incluant une érosion des berges) peuvent cependant avoir lieu au niveau des rapides et à leurs alentours. Le méandre en aval des rapides est également une zone où l'érosion peut progresser le long de la berge externe.

Tronçon 8 : Il s'agit d'un tronçon aux méandres bien formés, de sinuosité importante. La migration des méandres, bien que progressant possiblement plus lentement que dans les tronçons amont de par la faible énergie de la rivière sur ce tronçon, y est toujours présente. Les berges externes des méandres vont donc probablement s'éroder. Sur ce secteur, les risques d'avulsion majeure sont présents en raison de la nature deltaïque du tronçon. La très faible élévation des terrains proche du lac Maskinongé et le développement important font de ce secteur une zone à risques très importants d'inondation.

9 CONCLUSION

L'application des méthodologies existantes de cartographie de l'espace de liberté s'est heurtée à deux spécificités de cette zone d'étude : la présence d'un delta et la présence de terrasses alluviales déconnectées des processus d'inondation actuels, mais portant encore les traces de processus fluviaux passés. Les méthodes utilisées pour adapter la cartographie de l'espace de liberté à ces situations contribuent à renforcer les connaissances sur l'applicabilité du concept d'espace de liberté.

Le résultat du processus de cartographie montre que la rivière Mastigouche est une rivière assez dynamique, avec des méandres érodant parfois de hautes terrasses alluviales, et des inondations touchant un large territoire. Ce projet, par les analyses réalisées et les cartes produites, permet de mieux identifier les conflits entre le développement du territoire et l'espace requis par la rivière. De nombreux bâtiments, ainsi que des routes, se situent dans l'espace de liberté minimal et sont donc à risque. La sous-estimation des cotes de crues, calculées par le CEHQ (2003), et utilisées à des fins de zonages pour l'aménagement du territoire, n'a certes pas aidé à la situation. Une réflexion s'impose sur l'aménagement du territoire dans cet espace de liberté, afin de trouver un équilibre réaliste assurant la sécurité des biens et des personnes et l'intégrité écologique de la rivière.

RÉFÉRENCES

- Biron, P.M., Buffin-Bélanger, T., Larocque, M., Demers, S., Olsen, T., Ouellet, M.-A., Choné, G., Cloutier, C.-A., Needleman, M. 2013a. Espace de liberté: un cadre de gestion intégrée pour la conservation des cours d'eau dans un contexte de changements climatiques, 125 p.
- Biron, P.M., Buffin-Bélanger, T., Demers, S., Olsen, T. 2013b. Improvement of streams hydrogeomorphological assessment using LiDAR DEMs. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38, 15, 1808-1821.
- Biron, P.M., Buffin-Bélanger, T., Larocque, M., Choné, G., Cloutier, C.-A., Ouellet, M.-A., Demers, S., Olsen, T., Desjarlais, C., Eyquem, J. 2014 Freedom space for rivers: a sustainable management approach to enhance river resilience. *Environmental Management*, 54, 5, 1056-1073.
- CEHQ. 2003. Programme de détermination des cotes de crues – Rivière Mastigouche – Municipalité de Mandeville. Centre d'Expertise Hydrique du Québec. [En ligne] [http://www.cehq.gouv.qc.ca/zones-inond/cartes-rapports/Mastigouche_a_Mandeville_PDCC_14-011_\(rapport\).pdf](http://www.cehq.gouv.qc.ca/zones-inond/cartes-rapports/Mastigouche_a_Mandeville_PDCC_14-011_(rapport).pdf)
- Choné, G., Biron, P.M., Buffin-Bélanger, T. 2018. Flood hazard mapping techniques with LiDAR in the absence of river bathymetry data. *Proceedings of River Flow 2018*, ninth international conference on fluvial hydraulics.
- Demers, S., Olsen, T., Buffin-Bélanger, T., Marchand, J.P., Biron, P.M., 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*, 8, 1, 67-88
- Demers, S., Massé, S., Besnard, C., Buffin-Bélanger, T. 2017. La représentation cartographique des processus hydrogéomorphologiques : cinq initiatives pour une meilleure gestion des aléas fluviaux au Québec. *Laboratoire de géomorphologie fluviale, Université du Québec à Rimouski. Rapport remis au ministère de la Sécurité Publique.*
- MDDELCC. 2018. Zones inondables - Rapports techniques et cartographie en eau libre. [En ligne] <https://www.cehq.gouv.qc.ca/zones-inond/rapports-carto.htm>
- MFFP. 2018. Tortue des bois – Fiche descriptive. [En ligne] <http://www3.mffp.gouv.qc.ca/faune/especes/menacees/fiche.asp?noEsp=71>
- Parish Geomorphic. 2004. Belt Width Delineation Procedures. Report 98-023 submitted to the Toronto and Region Conservation Authority. [En ligne] <http://sustainabletechnologies.ca/wp/wp-content/uploads/2013/01/Belt-Width-Delineation-Procedures.pdf>.
- Piégay, H., Darby, S.E., Mosselman, E., Surian, N.. 2005. A review of techniques available for delimiting the erodible river corridor: a sustainable approach to managing bank erosion. *River Research and Applications*, vol. 21, no 7, p. 773-789.
- Pons, F., Delgado, J.-L., Guero, P., Berthier, E., Kerloc'h, B., Piney, S., Felts, D. 2010. Une contribution à l'évaluation de l'aléa inondation par ruissellement et crues soudaines. *SimHydro 2010 : Hydraulic modeling and uncertainty*, 2-4 June 2010, Sophia Antipolis.
- Trenhaile, A. S. 2009: *Geomorphology: a Canadian Perspective*. Oxford University Press, Toronto (4th edition), 584 pp.

ANNEXE 1 – DESCRIPTION DES TRONÇONS HOMOGÈNES

Les tronçons sont numérotés de l'amont vers l'aval. La carte présentant la position globale des tronçons sur la zone d'étude est présentée à la figure 3 du rapport.

Tronçon 1

Le premier tronçon de la section d'étude est un court tronçon d'environ 500 m. Il commence à la confluence des rivières Mastigouche, la Branche-à-gauche et Mastigouche Nord. Son lit est constitué de galets grossiers (« cobble ») et est caractérisé par une pente forte, avec une alternance de seuils et mouilles, mais également un important contrôle lithologique, et un développement de méandres de faible amplitude. Le cours d'eau y est confiné sur la rive droite par mur de vallée, avec présence d'affleurements rocheux. Une terrasse alluviale est présente sur la rive gauche. Ce tronçon a été fortement modifié suite à la destruction d'un barrage visible sur les photos aériennes des années 1950.

Tronçon 2

Le tronçon 2 ressemble fortement au tronçon 1 pour les caractéristiques de son lit (forte pente, lit de galets). Il possède cependant une sinuosité plus faible et une largeur plein-bord plus faible. Sa plaine alluviale est également plus étendue que le tronçon 1. La mobilité naturelle de ce tronçon est limitée par la présence importante d'enrochements et de routes des deux côtés de la rivière.

Tronçon 3

Alors que la pente décroît par rapport aux précédents tronçons, la sinuosité augmente pour ce tronçon. La largeur plein-bord est identique par rapport au tronçon précédent. Le courant y demeure rapide, avec toutefois une augmentation des zones de plus faible vitesse et des mouilles profondes. Les sédiments alluviaux demeurent grossiers, avec du gravier et des galets, mais également la présence de blocs. Le tronçon est semi-confiné, avec la berge gauche en appuie sur le mur de vallée. Quelques débris ligneux y sont présents.

Tronçon 4

Le tronçon 4 est un tronçon non confiné. La pente est identique au tronçon précédent. La principale caractéristique de ce tronçon est son style anastomosé, avec de multiples chenaux entourant des bancs végétalisés. La largeur plein-bord y est nettement plus grande qu'aux tronçons précédents. Le lit est constitué principalement de gravier. La morphologie du chenal est plus complexe, avec une alternance marquée de seuils et de mouilles, et une présence importante de débris ligneux formant parfois des embâcles.

Tronçon 5

Le tronçon 5 demeure non confiné. Une sinuosité plus importante d'y développe avec des méandres bien développés et de grande amplitude. La largeur plein-bord est plus faible qu'au tronçon précédent. De nombreux enrochements sont présents sur ce tronçon, en particulier sur les berges externes des méandres. La pente continue de diminuer, ainsi que la taille des

sédiments alluviaux, avec un lit constitué de gravier et de sable grossier. Une importante portion de ce tronçon est constituée d'un lit plat avec un faible courant, ainsi que de profondes mouilles dans les méandres.

Tronçon 6

Le tronçon 6, longeant le noyau villageois de Mandeville, montre un changement important de morphologie : la sinuosité y est très faible, des affleurements rocheux sont présents sur la berge droite, et une haute terrasse alluviale constitue la berge gauche. La pente et la vitesse du courant sont très faibles, avec un lit de gravier fin et de sable, parfois colmaté par des sédiments fins, dû à un effet de refoulement provoqué par le rapide situé sur le tronçon en aval.

Tronçon 7

Ce court tronçon est situé proche du noyau villageois de Mandeville. Il est semi-confiné, avec une faible largeur plein-bord. Il se caractérise principalement par la présence de pentes fortes associées avec des zones de rapides et la présence de blocs. Le principal rapide, créant un effet de refoulement sur le tronçon amont, est lié à la présence d'un barrage détruit entre 1955 et 1960.

Tronçon 8

Le tronçon 8 est un tronçon non confiné, avec de grands méandres dynamiques et une augmentation de la largeur plein-bord. Il s'agit d'un delta, la rivière se jetant dans le lac Maskinongé à la fin de ce tronçon. La pente y est très faible, avec un lit de sable, une faible vitesse de courant et une absence de seuils.

ANNEXE 2 – ANALYSE HYDROLOGIQUE

L'analyse hydrologique permet de déterminer un débit pour une récurrence donnée (20 ans ou 100 ans, la plupart du temps).

Le rapport du CEHQ (2003) a utilisé les débits d'un bassin versant voisin (rivière Du Loup, station 052805). Ce choix est justifié par le fait que la station sur la rivière Mastigouche (station 052606) a été mise en service en 1995. Le nombre d'années de données disponibles sur la station de la rivière Mastigouche était alors trop faible pour réaliser une analyse hydrologique. Avec 22 années de données, cette analyse peut maintenant être menée.

L'analyse effectuée utilise la loi log-Pearson type III. Les résultats de cette analyse pour la station 052606 sont présentés au tableau 1.

Tableau 1 – Résultat de l'analyse hydrologique à la station 052606 (205 km² d'aire drainée) sur la rivière Mastigouche

Récurrence	20 ans	100 ans	500 ans
Débit (m ³ /s)	54.5	58.1	60.3
Intervalle de confiance à 95% (m ³ /s)	48.8 – 64.7	51.6 – 70.6	53.2 – 74.2

Ces analyses sont basées sur des débits journaliers. Il est d'usage d'utiliser en modélisation hydraulique des débits de pointe (valeur instantanée maximale des crues). Le rapport entre ces deux débits est le facteur de points. Le facteur de pointe des crues maximales annuelles a été calculé pour les 20 dernières années de données pour la station 052606. La valeur moyenne du facteur de pointe sur ces 20 années est de 1.087. Les valeurs obtenues au tableau 1 doivent donc être multipliées par ce facteur de pointe.

Enfin, les débits obtenus pour la station 052606 doivent être transférés sur la zone d'étude. Une relation de proportionnalité entre les débits et l'aire drainée est utilisée. Le résultat final est présenté au tableau 2, et comparé avec les débits présentés dans le rapport du CEHQ (2003).

Tableau 2 - Débits instantanés de crues sur la rivière Mastigouche (en aval du tronçon 1 du rapport du CEHQ)

Récurrence	20 ans	100 ans	500 ans
Débit (m ³ /s)	165.6	176.6	183.2
Intervalle de confiance à 95% (m ³ /s)	148.2 - 196.5	156.6 - 214.4	161.5 - 225.5
Débit CEHQ 2003 (m ³ /s)	107.5	123.8	N.D.

Une différence importante peut être constatée entre les débits calculés à partir de la station 052606 sur la rivière Mastigouche et les débits évalués dans le rapport du CEHQ. Le rapport du CEHQ fait mention de 4 mesures de débit prises entre 1999 et 2002 au tronçon 1, qui peuvent être comparées avec les estimations réalisées (figure 1). Cette comparaison révèle une nette

sous-estimation des débits estimés par le CEHQ, alors que l'estimé à partir de la station en amont sur la rivière Mastigouche est nettement plus proche des valeurs mesurées.

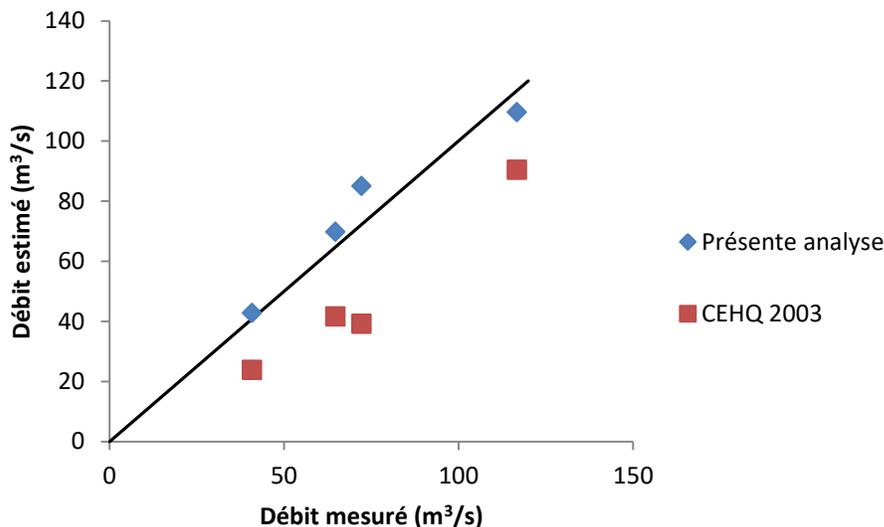


Figure 1 : Comparaison des débits mesurés pour 4 crues sur la rivière Mastigouche avec les évaluations faites par la méthode du CEHQ et celle de la présente étude.

La comparaison des données journalières, telle qu'effectuée à la figure 1, peut ne pas être tout à fait exacte lorsque l'on compare des bassins différents. Cependant, la sous-estimation des débits de crue par le CEHQ est confirmée par l'étude de la crue du 20 avril 2002. Cette crue a un débit mesuré de 116.7 m³/s en aval du tronçon 1 du rapport du CEHQ (point le plus à droite sur la figure 1). Si l'on compare ce débit avec les débits de crue évaluée par le CEHQ, il s'agit d'une crue importante, supérieure au débit de récurrence 20 ans (107.5 m³/s). Or, les graphiques des crues maximales annuelles des stations 052606 et 052805 montrent que cette crue n'était pas exceptionnelle, ni pour la rivière Mastigouche, ni pour la rivière du Loup (figure 2). Cela montre donc que les débits de récurrence 20 ans et 100 ans calculés par le CEHQ sont sous-estimés.

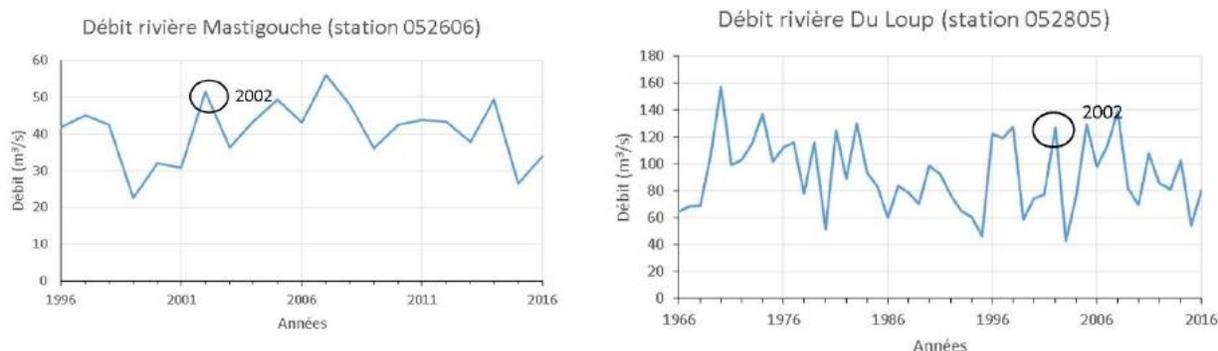


Figure 2 : Débits maximums annuels pour les stations des rivières Mastigouche et Du Loup.

ANNEXE 3 – CARTES DES ALÉAS FLUVIAUX ET DE L'ESPACE DE LIBERTÉ

L'annexe 3 des cartes des aléas fluviaux et de l'espace de liberté fait l'objet d'un document pdf distinct.