



Université du Québec
à Chicoutimi

DÉPARTEMENT DES SCIENCES FONDAMENTALES

ACQUISITIONS DE CONNAISSANCES SUR LA DYNAMIQUE
SÉDIMENTAIRE DE LA RIVIÈRE-À-MARS POUR LA PÉRENNITÉ DE
LA RESSOURCE SAUMON

Devis de recherche

Présenté au comité *ad hoc* par

Janie Vin-Deslauriers

Comme exigence partielle du cours

Séminaire 1

1MRR820

17 mai 2021

Table des matières

Liste des figures.....	2
1. Problématique.....	3
La Rivière-à-Mars.....	4
2. Objectifs.....	6
3. Méthodologie.....	7
3.1 Site d'étude.....	7
3.2 Analyse de la trajectoire hydrogéomorphologique historique (sous-objectif 1).....	9
3.3 Analyse de la dynamique sédimentaire (sous-objectif 2).....	10
3.3.1 Suivi des profils transversaux.....	10
3.3.2 Transpondeurs passifs et actifs.....	11
3.2 Espace de mobilité (sous-objectif 3).....	15
4. Résultats escomptés.....	16
4.1 Trajectoire hydrogéomorphologique historique.....	16
4.2 Suivi des profils transversaux.....	18
4.3 Suivi des transpondeurs passifs et actifs.....	19
4.4 Espace de mobilité.....	20
.....	20
5. Échéancier.....	21
Références.....	22

Liste des figures

FIGURE 1 : COMPARAISON DU MÊME TRONÇON : À GAUCHE, AVANT LA CRUE (1991) AVEC LE TRACÉ DU CHENAL LORS DE LA CRUE EN ROUGE; À DROITE, PENDANT LA CRUE (1996) AVEC LE TRACÉ DU CHENAL AVANT LE DÉBORDEMENT. DANS LA FIGURE DE DROITE, LES FLÈCHES INDIQUENT LE NOMBRE DE MÈTRES D'ÉLARGISSEMENT DE CHAQUE CÔTÉ DU CHENAL.	6
FIGURE 2 CARTE PRÉSENTANT LE SITE D'ÉTUDE SUR LES 12 DERNIERS KILOMÈTRES DE LA RIVIÈRE-À-MARS À SAGUENAY DANS L'ARRONDISSEMENT DE LA BAIE.....	8
FIGURE 3 EXEMPLE DE GRAPHIQUE METTANT EN PARALLÈLE LES RÉPONSES DU SYSTÈME FLUVIAL ET LA DYNAMIQUE DES VARIABLES DE CONTRÔLE (ADAPTÉE DE DUFOUR ET PIÉGAY 2009).	10
FIGURE 4 : CARTE DES PROFILS TRANSVERSAUX SUR LA RIVIÈRE-À-MARS.....	11
FIGURE 5 : PRISE DE MESURES BATHYMÉTRIQUES AVEC LE SYSTÈME DGPS LEICA.	11
FIGURE 6 : SITES D'INJECTIONS DES TRANSPONDEURS PASSIFS ET ACTIFS.	13
FIGURE 7 : RÉCOLTE ET PERÇAGE DES GALETS POUR LES TRANSPONDEURS PASSIFS À GAUCHE; TRANSPONDEURS PASSIFS ET ACTIFS EN HAUT À DROITE; MOULAGE DES GALETS POUR LES TRANSPONDEURS ACTIFS EN BAS À DROITE.....	14
FIGURE 8 : RECHERCHE DES TRANSPONDEURS PASSIFS AVEC L'ANTENNE LÉONIE DANS LA RIVIÈRE-À-MARS.....	14
FIGURE 9 TRAJECTOIRE HISTORIQUE DE LA RIVIÈRE-À-MARS ENTRE 1964 ET 2018. LES ENCADRÉS EN ROUGE MARQUENT LES CHANGEMENTS LES PLUS NOTABLES DANS LE TRACÉ.	17
FIGURE 10 TAUX D'ÉROSION SUR 43 TRONÇONS DE 250M DE L'AVAL VERS L'AMONT, PAR PÉRIODE, ET LE TRACÉ EN POINTILLÉ ROUGE MONTRE LA MOYENNE.	17
FIGURE 11 : EXEMPLE D'UN GRAPHIQUE REPRÉSENTANT UN PROFIL TRANSVERSAL INTERANNUEL POUR 2019 ET 2020 DANS LA RIVIÈRE-À-MARS.	18
FIGURE 12 EXEMPLE D'ÉTUDE MONTRANT LE SUIVI DE TRANSPONDEURS PASSIFS RÉALISÉE SUR LE BUËCH, EN FRANCE. LES POINTS VERTS INDIQUENT L'ENDROIT OÙ LES TRANSPONDEURS ONT ÉTÉ INJECTÉS, ET LES POINTS EN ROUGES INDIQUENT L'ENDROIT OÙ ILS ONT ÉTÉ RETROUVÉS APRÈS LE PASSAGE D'UNE CRUE (CASSEL ET AL. 2020).	19
FIGURE 13 EXEMPLE D'UN ESPACE DE MOBILITÉ SUR LA RIVIÈRE-À-MARS RÉALISÉ À PARTIR DE L'AMPLITUDE DES MÉANDRES (M _{PLAINE}) (ORGANISME DE BASSIN VERSANT DU SAGUENAY 2014)...	20

1. Problématique

Au Québec et comme partout ailleurs, les cours d'eau ont toujours été d'une importance fondamentale dans l'occupation du territoire par l'homme. D'abord comme voie de circulation à travers les terres et comme source alimentaire, ensuite pour le transport de marchandises et le flottage du bois, comme ressource énergétique pour les moulins à scie et les barrages hydroélectriques, pour les loisirs tels que la pêche et ce n'est que quelques exemples, les rivières nous ont rendu de nombreux services et demeurent essentielles. Cependant, l'augmentation de l'utilisation anthropique des terres près des cours d'eau et de leurs bassins versants donne lieu à de multiples problématiques sur différentes échelles.

Pour commencer, l'utilisation du sol à l'intérieur d'un bassin versant peut avoir un impact notable sur les cours d'eau et leurs écosystèmes. Par exemple, un sol mis à nu par l'agriculture ou par une récolte forestière sera plus sujet à l'érosion que lorsqu'il est sous couvert forestier (Piégay *et al.* 2003). De même, la capacité d'absorption du sol et de rétention de l'eau diminuera significativement et augmentera ainsi le risque de crue majeure et d'inondation. Ensuite, plusieurs interventions encore largement pratiquées au sein des cours d'eau, telles que la linéarisation, l'enrochement, le nettoyage et le dragage, génèrent un déséquilibre dans la dynamique des processus fluviaux causant ainsi plusieurs effets dommageables, spécialement sur l'écosystème fluvial (Nilsson et Berggren 2000). Ces pratiques se trouvent souvent induites par une perception négative ou menaçante de certains phénomènes naturels dont on veut prévenir les effets, tels que l'érosion des berges (Florsheim *et al.* 2008) et les inondations. Elles sont également réalisées lorsque certains éléments naturels ont une incidence sur l'écoulement dit « normal » des eaux, telles que le nettoyage du bois mort en rivière et le démantèlement des barrages de castors (*Loi sur les compétences municipales* 2005, art. 104-106). D'ailleurs, l'élimination quasi systématique des barrages de castors, basée sur une perception non fondée, c'est-à-dire qu'ils empêcheraient la migration du saumon, demeure largement pratiquée (Beechie *et al.* 2010).

La propension de l'homme à considérer les rivières comme des éléments statiques dans le paysage, même dans une optique de restauration, a également contribué à leur

déséquilibre (Biron 2017; Johnson *et al.* 2020). En effet, plusieurs méthodes de restauration de l'habitat du poisson sont réalisées sans s'intéresser aux divers processus HGM naturels, et perturbent les écosystèmes fluviaux (Nilsson et Berggren 2000). Au Québec, l'application de ces méthodes perdure lors de la mise en œuvre de projets de restauration pour différentes espèces, telles que le saumon atlantique et l'omble de fontaine, tandis qu'elles tendent à être délaissées ailleurs dans le monde (Biron *et al.* 2018). La mise en place de seuils, de déflecteurs ainsi que la construction de frayères sont de bons exemples de formes statiques encore utilisées qui ne considèrent pas le dynamisme du cours d'eau et les processus à l'échelle du bassin versant, diminuant ainsi leur durabilité (Beechie *et al.* 2010). La restauration des processus HGM est actuellement l'approche préconisée et soutenue par un consensus scientifique mondial quant à son efficacité (Biron *et al.* 2018).

La littérature scientifique montre bien que les méthodes les mieux adaptées et les plus durables, tant sur un plan biologique que physique, sont celles fondées sur la restauration des processus hydrogéomorphologiques (HGM) à l'échelle du bassin versant (Wohl *et al.* 2005; Beechie *et al.* 2010; Johnson *et al.* 2020). L'érosion des berges, le transport sédimentaire et les débordements dans la plaine alluviale lors de crues font partie des processus HGM essentiels aux écosystèmes fluviaux et riverains, et peuvent contribuer à diminuer les risques pour la sécurité civile (Florsheim *et al.* 2008).

La Rivière-à-Mars

Au Saguenay, le déluge de 1996 a grandement affecté les rivières à bien des points de vue, spécialement sur le plan hydrogéomorphologique. La Rivière-à-Mars fut touchée de façon particulièrement intense, ayant vu ses débits décupler et son lit s'élargir à plus de 150 mètres dans certains endroits (Environnement Québec 2003) (Figure 1). Cette crue exceptionnelle a emporté des infrastructures urbaines, notamment une partie du système d'aqueduc et le réseau électrique, des tronçons de route, des ponts, le sol et la végétation. Elle a également fortement ébranlé l'esprit des riverains, dont certains ont vu leur maison emportée par les eaux (Bureau de reconstruction et de relance de la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean 1997). Devant l'urgence d'agir et l'insécurité de la population, d'importants travaux de reconstruction se sont rapidement déployés, particulièrement pour

la restauration des rivières (Environnement Québec 2003). Ainsi, la stabilisation des berges par des enrochements massifs figure comme l'ouvrage le plus considérable, suivi du dragage, du nettoyage et du remblayage des lits de rivières, dont celui de la Rivière-à-Mars. D'autres travaux tels que la construction de seuils, la reconstruction de ponts, de lignes ferroviaires, du barrage Roméo Tremblay et de la passe migratoire ont également eu lieu à la Rivière-à-Mars (Bureau de reconstruction et de relance de la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean 1997). Les travaux post-déluge ont alors canalisé et enroché la rivière sur plusieurs tronçons, lui enlevant tout espace de mobilité ainsi que la possibilité de retrouver un équilibre naturel. Ainsi, depuis 25 ans, cette rivière tend à se réajuster par divers processus non désirés qui affectent certaines infrastructures riveraines et son écosystème, spécialement celui du saumon atlantique (*Salmo salar*) et de l'omble de fontaine anadrome (*Salvelinus fontinalis*).

L'enrochement massif des berges de la Rivière-à-Mars donne lieu à une déconnexion des marges fluviales, causant une diminution de l'apport en sédiments essentiels aux processus HGM (Piégay *et al.* 2005). Les seuils artificiels et le barrage Roméo Tremblay contribuent également au déficit sédimentaire par endroit, et génèrent des surplus ailleurs (AECOM 2019). Dans plusieurs secteurs, on observe notamment une incision du lit, c'est-à-dire une érosion verticale qui contribue à concentrer l'écoulement dans un chenal moins large et augmente la puissance spécifique du cours d'eau. On observe également une perte de géodiversité sur de longs tronçons ainsi que des berges accueillant très peu de végétation due à un sol compacté ou enroché. Ces phénomènes altèrent particulièrement l'habitat faunique des salmonidés. L'organisme Contact Nature investit régulièrement des sommes importantes pour des travaux de restauration en rivière, dans le but de permettre au saumon de franchir certains obstacles et de faciliter la reproduction. Les méthodes utilisées jusqu'à maintenant étaient davantage axées sur la création de formes statiques, telles que l'aménagement de frayères, sans étudier et restaurer les processus en amont. Cependant, ces méthodes ont démontré une pérennité précaire engendrant des coûts annuels élevés pour l'organisme.

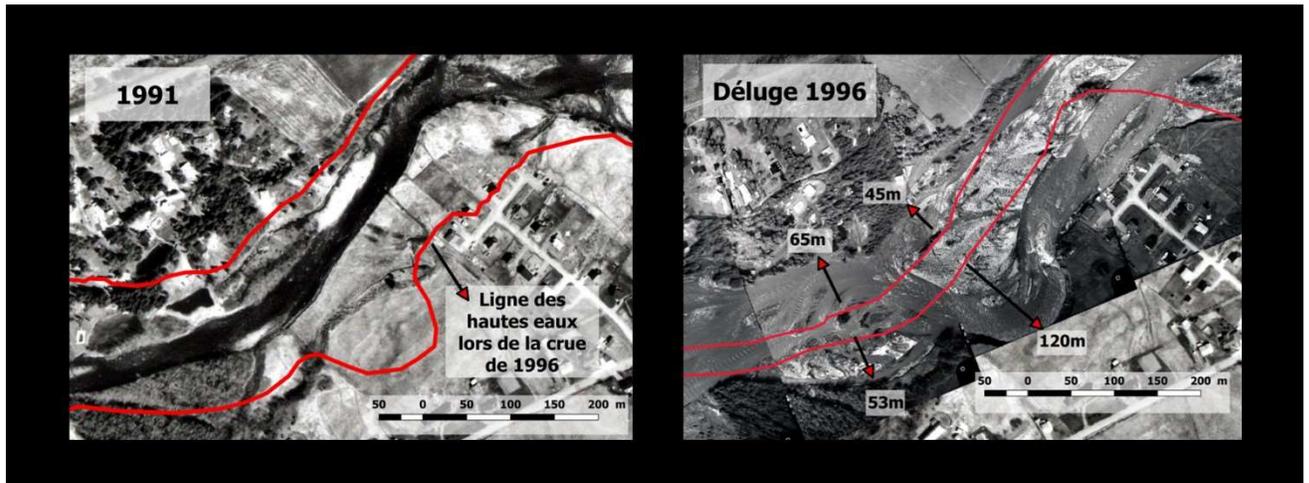


Figure 1 : Comparaison du même tronçon : À gauche, avant la crue (1991) avec le tracé du chenal lors de la crue en rouge; à droite, pendant la crue (1996) avec le tracé du chenal avant le débordement. Dans la figure de droite, les flèches indiquent le nombre de mètres d'élargissement de chaque côté du chenal.

2. Objectifs

Le présent projet s'inscrit dans une vaste stratégie novatrice qui commence à prendre place au Québec, c'est-à-dire la restauration des cours d'eau par processus hydrogéomorphologiques. Étant donné que la Rivière-à-Mars fut grandement bouleversée, d'abord par les inondations de 1996 et ensuite par les travaux de réaménagement, elle offre un terrain d'étude unique et privilégié par son accessibilité. La restauration des processus de cette rivière fortement anthropisée dans le tronçon à l'étude et ayant subi une crue majeure pourrait devenir un modèle au Québec, si les objectifs à long terme sont atteints. Concrètement, l'objectif ultime, dont ce projet de maîtrise n'est que la première étape, est de rétablir et conserver l'habitat du saumon atlantique de manière durable. La démarche envisagée et jugée la plus indiquée dans un contexte de développement durable est de restaurer les processus HGM de la Rivière-à-Mars en la libérant de ses enrochements (Florsheim *et al.* 2008), et en lui redonnant un espace de mobilité minimal (Biron *et al.* 2013). Bien sûr, aucune action ne pourrait être entreprise sans tenir compte de la sécurité

civile. La recharge sédimentaire visant à recréer des processus d'érosion (Beal *et al.* 2012; Brousse *et al.* 2020) à des endroits où le démantèlement d'enrochement ne serait pas sécuritaire pourrait donc être envisageable. Cependant, il est important de mentionner que ceci est le contexte dans lequel le projet de recherche en maîtrise évolue, figurant ainsi comme une première étape à l'intérieur d'un projet plus vaste.

L'objectif de recherche, dans le cadre de la Maîtrise en ressources renouvelables, est de caractériser la dynamique HGM sur les douze derniers kilomètres de la Rivière-à-Mars. Cela permettra d'établir un diagnostic exact sur chaque tronçon et de déterminer la méthode la mieux adaptée pour la restauration des processus HGM. Cet objectif se décline en trois sous-objectifs :

1. L'analyse de la trajectoire HGM historique par imageries aéroportées depuis 1964;
2. L'analyse de la dynamique sédimentaire par une approche morphologique (transects interannuels), et par la technologie RFID (transpondeurs passifs et actifs) afin de déterminer les distances de déplacement et le mouvement de la couche active.
3. L'analyse des zones offrant la possibilité de redonner un espace de mobilité à la rivière, en considérant les risques pour la sécurité civile.

3. Méthodologie

3.1 Site d'étude

La Rivière-à-Mars se situe au Saguenay-Lac-Saint-Jean, à Saguenay, dans l'arrondissement de La Baie (Figure 2). Le site d'étude porte sur ses douze derniers kilomètres, du barrage des murailles jusqu'à son embouchure dans la Baie des Ha! Ha!, soit la portion la plus anthropisée. De sa source, la rivière s'écoule sur environ 95 km et draine un bassin versant de 664 km² (Organisme de bassin versant du Saguenay 2014). La majeure partie du bassin versant est sous couvert forestier et très peu anthropisée, mais la portion à l'étude traverse des terres à usages récréatives, privées, urbanisées et industrielles. Une importante part du secteur sur laquelle se déroule le projet est généralement bordée de

zones arbustives et herbacées où de nombreux sentiers de VTT longent la rivière la rendant ainsi facilement accessible. Deux routes sont situées de part et d'autre dans la plaine alluviale menant à des terrains privés, des terres agricoles, des campings et des zones de villégiature. C'est à partir de la passe migratoire et du barrage Roméo Tremblay que la rivière traverse une zone urbanisée sur environ trois kilomètres, comprenant des secteurs industriels tels que les terrains de Rio Tinto Alcan.

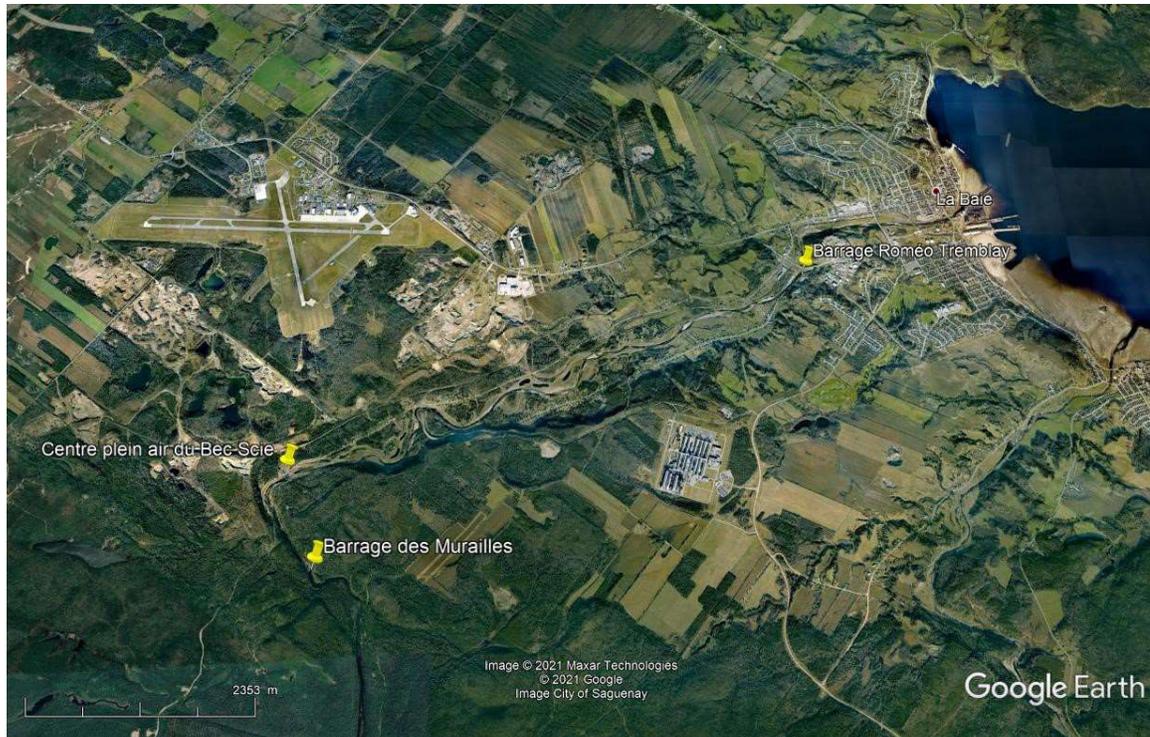


Figure 2 Carte présentant le site d'étude sur les 12 derniers kilomètres de la Rivière-à-Mars à Saguenay dans l'arrondissement de La Baie.

Le bassin versant de la Rivière-à-Mars s'étend en grande partie dans la Réserve faunique des Laurentides sur un territoire escarpé. La géomorphologie du territoire à l'étude est d'origine glaciaire, présentant des affleurements rocheux à certains endroits. Le sol est composé majoritairement de dépôts alluviaux récents, de dépôts fluvio-glaciaires et d'argile marine (Organisme de bassin versant du Saguenay 2014). Le lit de la rivière s'écoule sur des sédiments grossiers de tailles variés, formant un pavage dans la majeure partie du tronçon à l'étude. Cependant, il est également possible d'observer des affleurements de roche mère et des plaques d'argile marine à certains endroits. Le régime hydrologique de la rivière est directement affecté par les précipitations et indique un débit

annuel moyen de $11\text{m}^3/\text{s}$ (Organisme de bassin versant du Saguenay 2014) comportant des périodes de crues pouvant dépasser $150\text{m}^3/\text{s}$ et d'étiages atteignant $1\text{m}^3/\text{s}$ (MELCC 2021).

3.2 Analyse de la trajectoire hydrogéomorphologique historique (sous-objectif 1)

L'étude de la trajectoire HGM historique consiste à faire l'analyse de l'évolution des ajustements morphologique d'un cours d'eau selon différentes époques, à partir de photographies aériennes, d'orthophotographies et de cartes historiques. Cette méthode permet de mieux comprendre le comportement du cours d'eau et ainsi projeter ses ajustements dans l'avenir (Dufour et Piégay 2009). Cette partie de l'étude se fait entièrement à partir d'analyses géomatiques et à partir d'un système d'information géographique (SIG).

La trajectoire historique de la Rivière-à-Mars est réalisée à partir de photographies aériennes et d'orthophotographies datant de 1964 jusqu'à aujourd'hui et se fait à l'aide de logiciels de cartographie tels qu'ArcGIS et QGIS. La première étape consiste à effectuer le tracé du lit mineur à un intervalle d'environ 10 ans, selon les photographies ou orthophotographies aériennes disponibles. Grâce à ces tracés, il sera possible d'observer les modifications dans le style fluvial, notamment avant, pendant et après les inondations de 1996. La dynamique HGM pourra également être étudiée sous plusieurs aspects : d'abord par la comparaison des superficies érodées; ensuite, en mesurant et en comparant la largeur du chenal au niveau plein-bord à chaque année et aux mêmes endroits; et enfin, en analysant la superficie et le mouvement des bancs d'accumulation en prenant compte des niveaux d'eau lors de l'acquisition des images aériennes. Les indices de sinuosité et de tressage seront également considérés. L'évolution de chacune de ses composantes morphologiques se verra comparée dans un graphique sur une même échelle de temps, en parallèle avec la dynamique des variables de contrôle (Figure 3) (Dufour et Piégay 2009). À titre d'exemple, l'historique des débits morphogènes et différents événements ponctuels tels que la stabilisation par enrochements sont des variables de contrôle qui seront analysées en parallèle avec le taux d'érosion annuel et l'indice de sinuosité. Ces

données permettront de comprendre la dynamique du cours d'eau et ainsi de planifier son fonctionnement futur, c'est-à-dire son évolution morphologique.

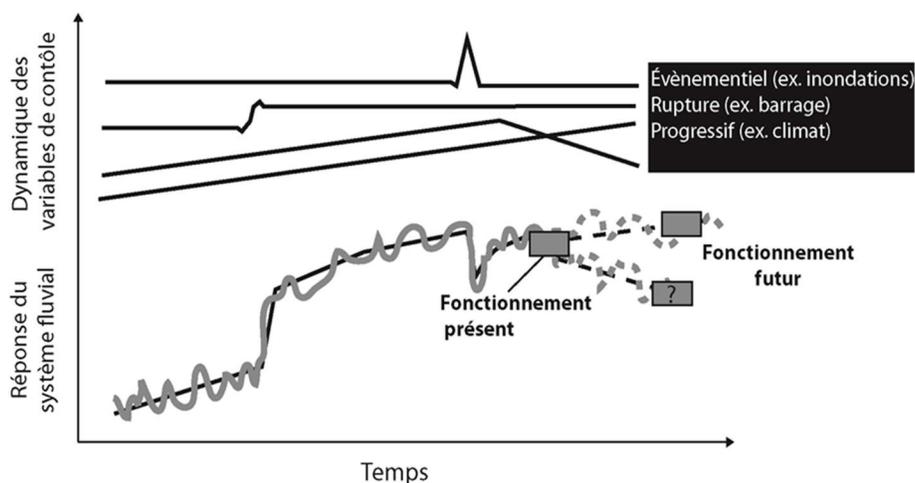


Figure 3 Exemple de graphique mettant en parallèle les réponses du système fluvial et la dynamique des variables de contrôle (adaptée de Dufour et Piégay 2009).

3.3 Analyse de la dynamique sédimentaire (sous-objectif 2)

3.3.1 Suivi des profils transversaux

Au total, trois campagnes de terrain (2019-2020-2021) seront réalisées pour l'acquisition de mesures *in situ* par l'implantation d'un suivi morphologique sur 64 profils transversaux (transects) répartis sur l'entièreté du site à l'étude selon les possibilités qu'offre le terrain (figure 4). Les transects sont effectués à l'aide d'un système DGPS *Leica* qui permet d'obtenir la bathymétrie et la topographie, point par point, sur une ligne transversale à la rivière (figure 5). Les données sont ensuite traitées dans un logiciel de cartographie à partir duquel il est possible d'analyser et de comparer les profils où le lit de la rivière est en érosion ou en aggradation, et ainsi observer l'évolution morphologique sur l'ensemble du cours d'eau.

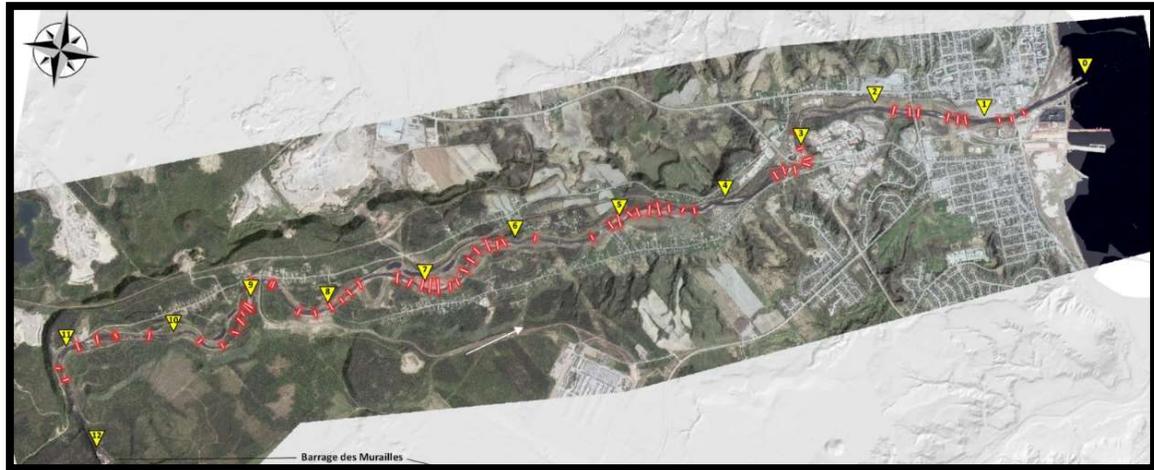


Figure 4 : Carte des profils transversaux sur la Rivière-à-Mars.



Figure 5 : Prise de mesures bathymétriques avec le système DGPS Leica.

3.3.2 Transpondeurs passifs et actifs

La technologie par transpondeurs passifs et actifs (RFID) est déployée sur trois sites afin de suivre les distances de déplacement et pour estimer les taux de transport (Hassan et Roy 2016) (figure 6). Les transpondeurs passifs (figure 7) sont des micro-capteurs émettant une radiofréquence qui s'activent avec une antenne de détection mobile et ne requièrent aucune source d'énergie (Cassel *et al.* 2017a). Cela représente un avantage notable pour ce type de traceurs, car leur durée de vie dépasse 50 ans et permet un suivi à long terme (Graff *et al.* 2018). Ils sont cryptés d'un code unique qui permet de les identifier individuellement et de déterminer ainsi leur mouvement (Lamarre *et al.* 2005). Cette méthode offre la possibilité d'estimer les distances de déplacement, la taille granulométrique mobilisée et le

seuil de mobilité des différentes particules selon l'intensité des crues. Cette technologie a déjà fait ses preuves dans plusieurs études s'intéressant au transport de charge de fond dans les rivières à lit graveleux (Lamarre *et al.* 2005; Arnaud 2012; Chapuis 2012; Chaput-Desrochers 2013; Cassel *et al.* 2017a; Brousse *et al.* 2020). À l'automne 2019, des transpondeurs passifs ont été installés dans des galets de différentes tailles granulométriques et récoltés à même le site d'étude (figure 7). Ensuite, plus de 800 galets répartis sur les 12 kilomètres à l'étude ont été mis en place afin d'en faire le suivi, et chaque galet muni d'un transpondeur est positionné au DGPS lors de son insertion en rivière. Un suivi sera réalisé en période estivale (ou après chaque crue potentiellement mobilisatrice) dans des conditions de faibles débits, à l'aide d'une antenne de télédétection *Léonie (Aquantis)*, afin de retrouver les différents galets et localiser leur nouvelle position (figure 8).

Les transpondeurs actifs (figure 7) sont également des émetteurs de radiofréquences, mais ce qui les distingue des transpondeurs passifs, c'est qu'une radiofréquence est émise en continu, à un intervalle de temps prédéterminé (Lamarre *et al.* 2005). Cette technologie plus coûteuse demande davantage d'énergie impliquant l'utilisation de batteries, ce qui augmente alors sa taille et diminue sa durée de vie. Cependant, elle présente des avantages notables par son fort taux de recouvrement et sa facilité à les détecter en rivière jusqu'à une distance de 40 à 80 mètres (Cassel *et al.* 2017b). Les traceurs actifs sont détectés à l'aide d'une antenne connectée à un ordinateur muni d'un programme qui permet la lecture des signaux émis par les transpondeurs (Cassel *et al.* 2017b). C'est donc plus de 70 transpondeurs actifs qui ont été placés dans les sites aval et médian afin d'augmenter les taux de succès des suivis annuels (figure 6). De ce nombre, quelques-uns ont également été placés de manière à former des colonnes d'érosion sur les bancs d'accumulation, dans l'objectif d'évaluer le taux de mobilité de la couche active. Avant l'installation, ces traceurs doivent être insérés dans des galets de différentes granulométries moulés en laboratoire (figure 7). Leur positionnement avec un DGPS en rivière se fait de la même manière et en même temps que les transpondeurs passifs.



Figure 6 : Sites d'injections des transpondeurs passifs et actifs.



Figure 7 : Récolte et perçage des galets pour les transpondeurs passifs à gauche; transpondeurs passifs et actifs en haut à droite; moulage des galets pour les transpondeurs actifs en bas à droite.



Figure 8 : Recherche des transpondeurs passifs avec l'antenne Léonie dans la Rivière-à-Mars.

3.2 Espace de mobilité (sous-objectif 3)

L'espace de liberté est une méthode de gestion durable des cours d'eau qui leur donne l'espace nécessaire pour assurer plusieurs services écologiques, tout en diminuant les risques pour la sécurité civile, présentant ainsi des avantages économiques (Biron *et al.* 2013). Dans le cadre de ce projet, seule l'analyse de l'espace de mobilité sera réalisée et permettra de cibler les secteurs propices au démantèlement d'encrochements. Cette étape sera réalisée à partir des données récoltées de l'analyse de la trajectoire historique telles que l'évolution du taux d'érosion, de la largeur du chenal, de l'indice de sinuosité et du nombre de chenaux. Deux types d'espaces de mobilités pourront ensuite être définis, soit le M_{50} et le M_{Plaine} . Le M_{50} est l'espace où le risque d'érosion est le plus élevé et dont on suppose la migration future du chenal dans une perspective de 50 ans (Biron *et al.* 2013). Tandis que le M_{Plaine} , plus large que le M_{50} , est la délimitation d'un corridor basé sur l'amplitude des méandres en considérant la migration du cours d'eau à long terme (Piégay *et al.* 2005; Biron *et al.* 2013). Étant donné le nombre d'infrastructures de part et d'autre de la Rivière-à-Mars, la détermination de l'espace de mobilité se réalisera afin d'intégrer les risques liés à la sécurité civile.

Cependant, la Rivière-à-Mars propose un contexte historique particulier qui devra être pris en considération lors du choix de l'espace de mobilité. Avant le Déluge de 1996, elle se présentait sous un style divagant, et circulait à travers des zones forestières offrant des berges naturelles que les événements de 1996 ont complètement arrachées. Le réaménagement total de la plaine alluviale a eu comme effet de compacter le sol déjà lessivé par la crue, fournissant ainsi peu d'opportunité à l'implantation de la végétation. De plus, l'encrochement de plus de 14.9 kilomètres de berges effectué lors des travaux post-Déluge limite les processus d'érosion latérale, ce qui viendra interférer dans le calcul du taux d'érosion annuel. Par conséquent, il y aura une moyenne annuelle des différentes variables morphologiques calculée avant le Déluge, puis après, sans considérer les données de l'année 1996 vu l'intensité exceptionnelle de la crue.

4. Résultats escomptés

4.1 Trajectoire hydrogéomorphologique historique

Quelques résultats préliminaires de l'analyse de la trajectoire historique peuvent déjà montrer un changement notable entre la période avant et après les inondations de 1996. La figure 9 présente huit tracés du lit mineur de la Rivière-à-Mars à différentes époques de 1963 à aujourd'hui, et illustre bien ces changements. Les indices des variables morphologiques, tels que le taux d'érosion annuel, seront calculés à partir de ces tracés et analysés à l'aide d'un histogramme. Nous nous attendons à y observer, par exemple, une diminution de l'érosion suite à l'enrochement des berges réalisé après le Déluge, ainsi qu'une baisse de l'indice de sinuosité déjà visible sur la figure 9. Un histogramme montrant l'évolution des taux d'érosion sur 43 tronçons selon différentes périodes a déjà été réalisé (figure 10) et bien qu'il doive être bonifié, on y observe que la période 1994-1996 présente une moyenne nettement au-dessus des autres, et devra alors être traitée indépendamment. On peut également noter une variation plus marquée du taux d'érosion sur certains tronçons avant et après 1994-1996, ce qui indique que l'analyse de la trajectoire pourra être divisée en secteurs présentant des caractéristiques morphologiques similaires. Enfin, on s'attend à ce que le Déluge de 1996 ait laissé une empreinte majeure sur chacune des variables morphologiques, ainsi, il sera intéressant de mesurer les modifications du chenal à partir de 1996 jusqu'à aujourd'hui afin de caractériser les ajustements en cours.

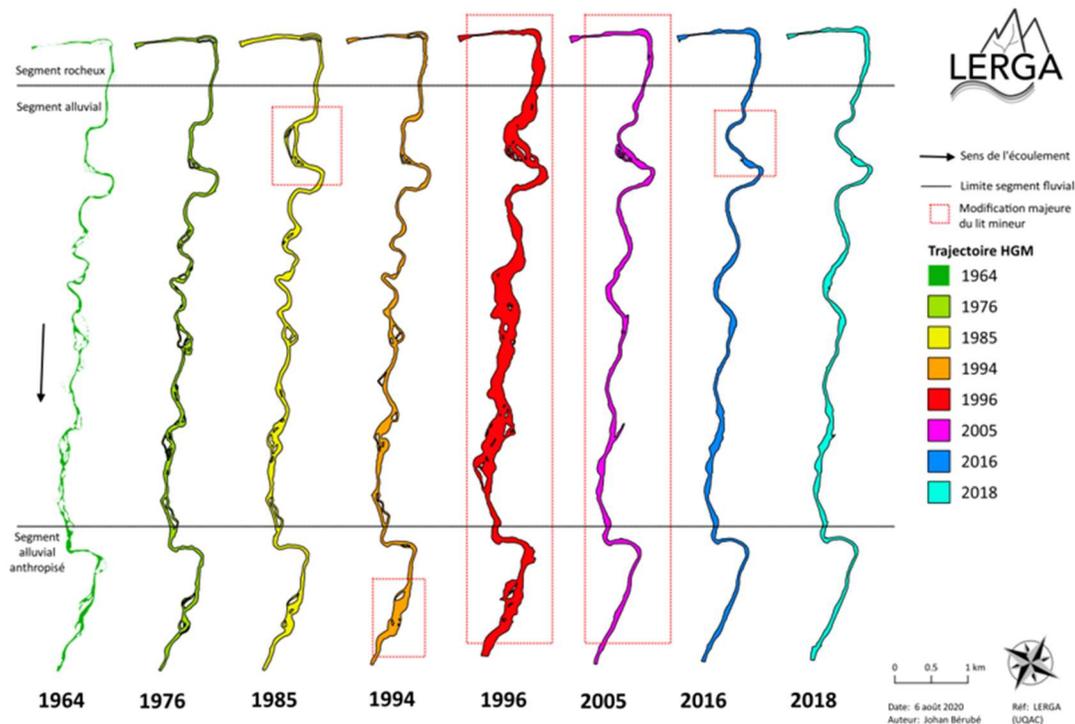


Figure 9 Trajectoire historique de la Rivière-à-Mars entre 1964 et 2018. Les encadrés en rouge marquent les changements les plus notables dans le tracé.

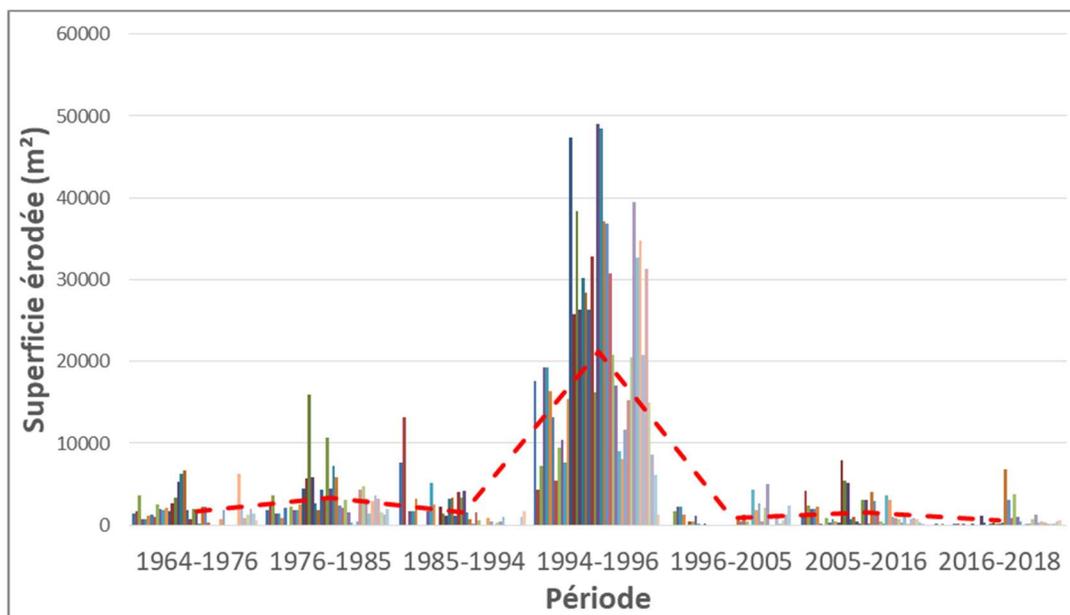


Figure 10 Taux d'érosion sur 43 tronçons de 250m de l'aval vers l'amont, par période, et le tracé en pointillé rouge montre la moyenne.

4.2 Suivi des profils transversaux

L'analyse des profils transversaux montrera l'évolution morphologique du lit de la rivière. Les données récoltées sur le terrain, c'est-à-dire la mesure point par point de la bathymétrie et de la topographie grâce à un DGPS, seront analysées afin de comparer l'altitude de chacun des profils (figure 11). Il sera alors possible d'identifier, à l'aide d'un graphique, les secteurs en aggradations et ceux en érosions ou en incision. À titre d'exemple, la figure 11 présente le profil d'un secteur en aggradation si l'on compare les données prises en 2019 et 2020. Ainsi, avec les 64 profils répartis sur les 12 kilomètres à l'étude, nous serons en mesure de dresser un portrait détaillé du lit de la Rivière-à-Mars sur 3 années consécutives.

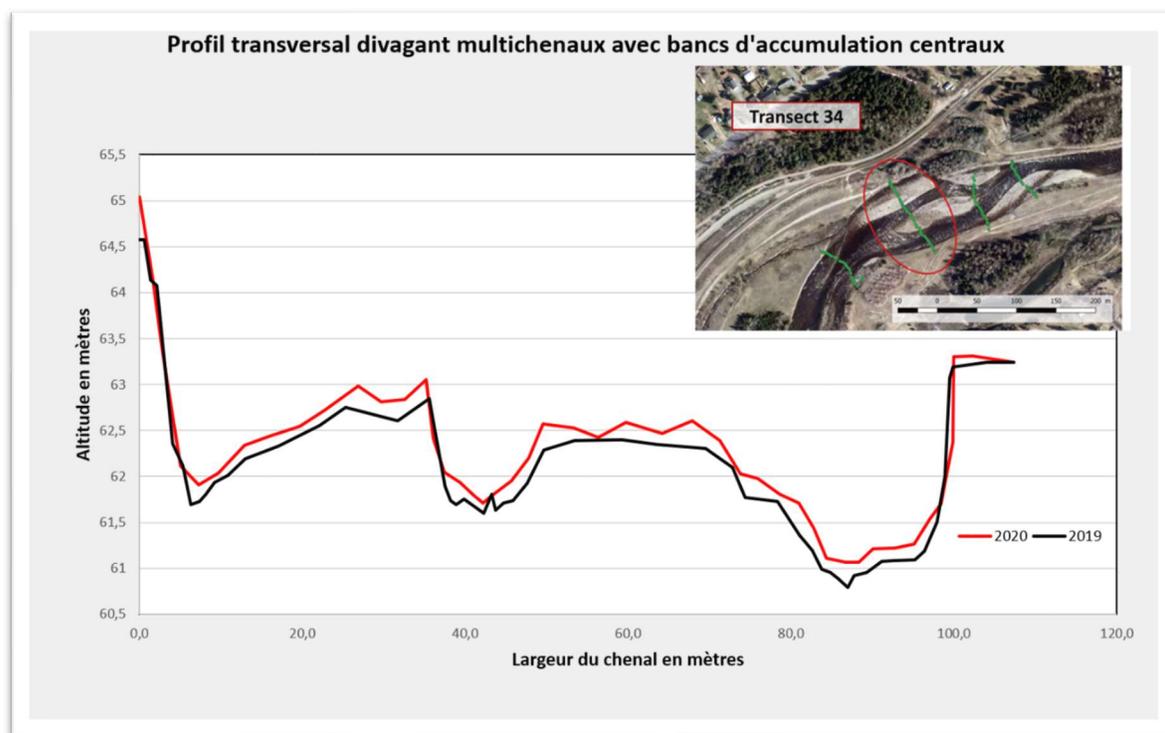


Figure 11 : Exemple d'un graphique représentant un profil transversal interannuel pour 2019 et 2020 dans la Rivière-à-Mars.

4.3 Suivi des transpondeurs passifs et actifs

L'analyse des données récoltées à l'aide des transpondeurs passifs et actifs nous indiquera les taux de transport, les distances de déplacement et les seuils de mobilité (Cassel *et al.* 2020). À titre d'exemple, la figure 12 présente un suivi de transpondeurs passifs dans une rivière en France. La distance parcourue de chacun des traceurs peut être mesurée à partir d'un logiciel de cartographie. Dans l'étude de la Rivière-à-Mars, nous nous attendons, par exemple, à observer une rétention des sédiments dans certains secteurs tels qu'en amont du barrage Roméo Tremblay. Nous pourrions également analyser la différence entre les taux de transport après la crue de 2020 ($115 \text{ m}^3/\text{s}$) et la crue de 2021 ($42 \text{ m}^3/\text{s}$ en date du 8 mai 2021) (MELCC 2021), étant donné l'écart notable par rapport à l'intensité des débits. Ces données pourront nous renseigner sur les distances de déplacement selon différents débits.

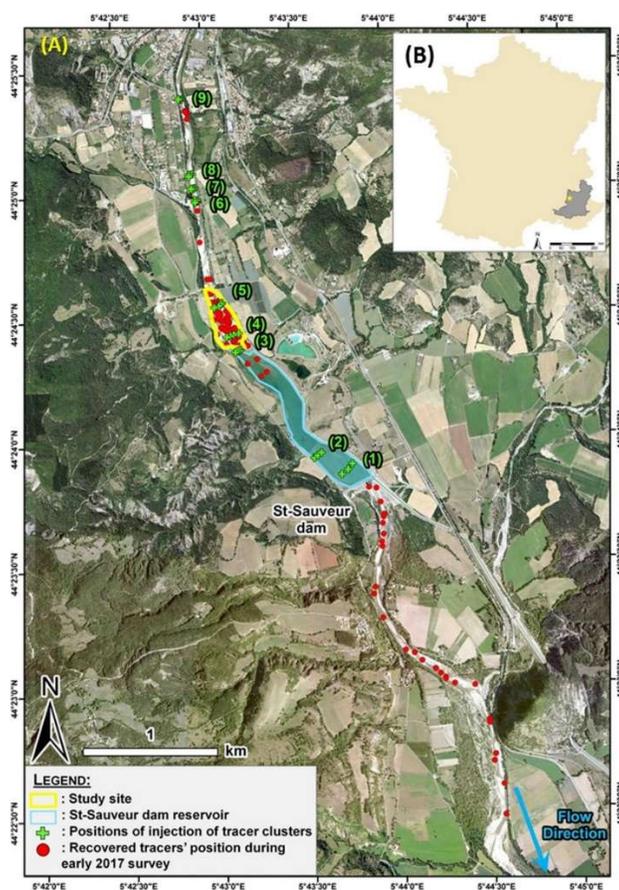


Figure 12 Exemple d'étude montrant le suivi de transpondeurs passifs réalisée sur le Buëch, en France. Les points verts indiquent l'endroit où les transpondeurs ont été injectés, et les points en rouges indiquent l'endroit où ils ont été retrouvés après le passage d'une crue (Cassel *et al.* 2020).

4.4 Espace de mobilité

La détermination de l'espace de mobilité sera réalisée à partir des résultats obtenus lors de l'analyse de la trajectoire et des trois campagnes de terrains et permettra de cartographier les secteurs où des enrochements pourront être enlevés. À titre d'exemple, l'Organisme de bassin versant du Saguenay a effectué une étude sur la Rivière-à-Mars en 2014, et il est ainsi possible d'avoir un aperçu du corridor de mobilité basé sur l'amplitude des méandres (M_{Plaine}) (figure 13) (Organisme de bassin versant du Saguenay 2014).

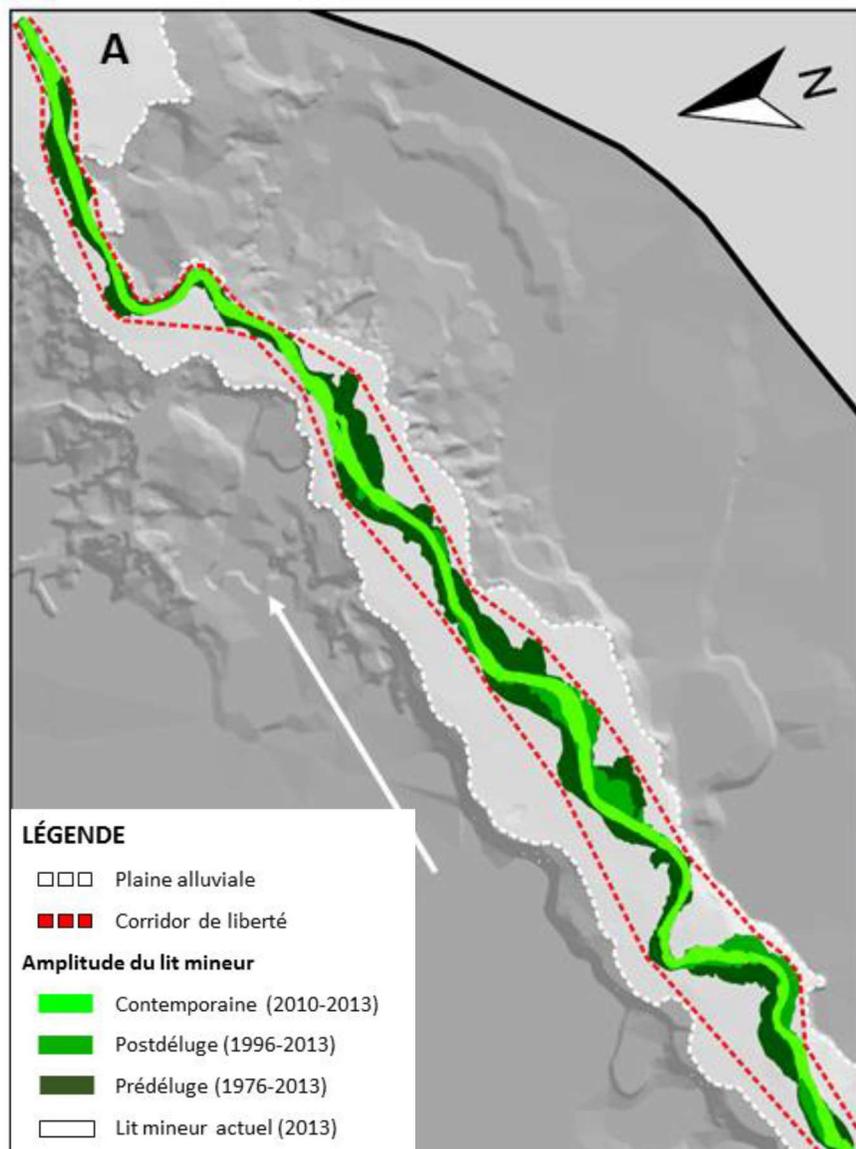
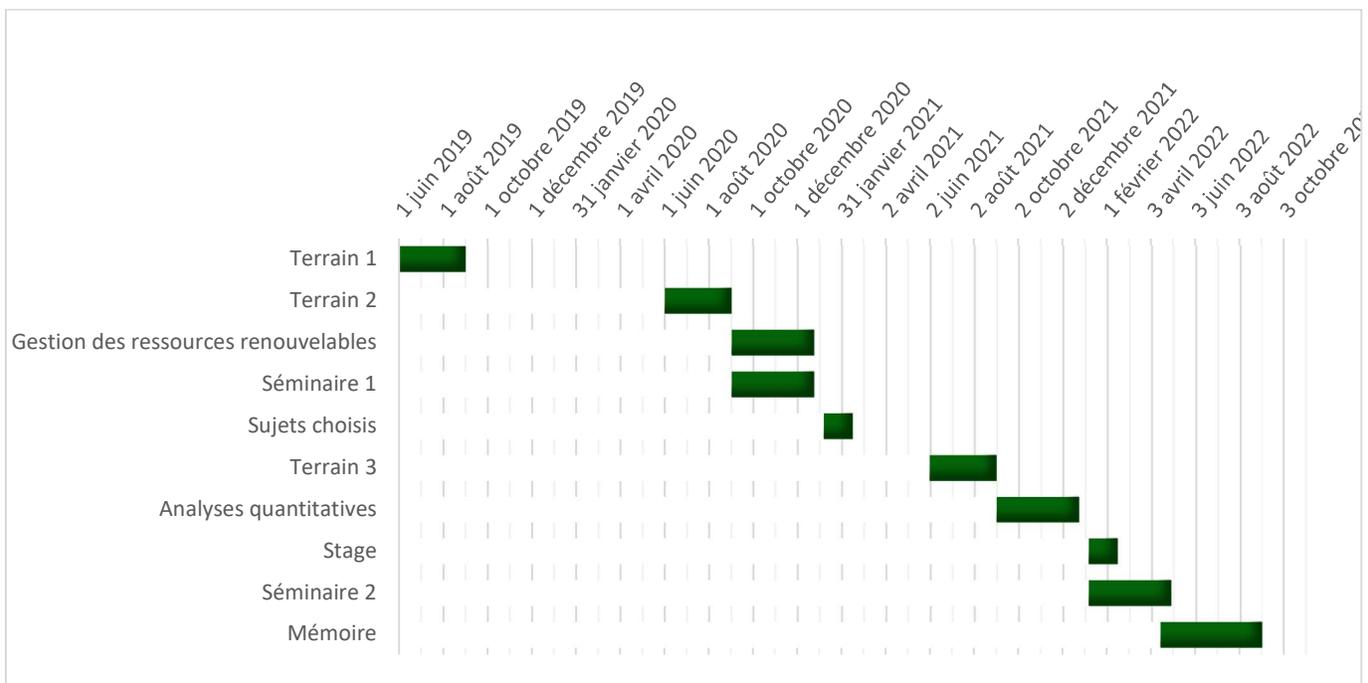


Figure 13 Exemple d'un espace de mobilité sur la Rivière-à-Mars réalisé à partir de l'amplitude des méandres (M_{Plaine}) (Organisme de bassin versant du Saguenay 2014).

5. Échéancier

Tâches	Début	Fin
Terrain 1	1 juin 2019	1 septembre 2019
Terrain 2	1 juin 2020	1 septembre 2020
Gestion des ressources renouvelables	1 septembre 2020	24 décembre 2020
Séminaire 1	1 septembre 2020	24 décembre 2020
Sujets choisis	6 janvier 2021	15 février 2021
Terrain 3	1 juin 2021	1 septembre 2021
Analyses quantitatives	1 septembre 2021	24 décembre 2021
Stage	6 janvier 2022	15 février 2022
Séminaire 2	6 janvier 2022	30 avril 2022
Mémoire	15 avril 2022	2 septembre 2022



Références

AECOM. 2019. Réaménagement de la passe migratoire, de la fosse 9 et approvisionnement en eau des étang de la rivière à Mars, Étude Hydrogéomorphologique. Contact Nature Rivière-à-Mars, Ville Saguenay, 75 p.

Arnaud F. 2012. Approches géomorphologiques historique et expérimentale pour la restauration de la dynamique sédimentaire d'un tronçon fluvial aménagé: le cas du Vieux Rhin entre Kembs et Breisach (France, Allemagne). Thèse de doctorat, Université de Lyon, Lyon, 280 p.

Beal D, Arnaud F, Piegay H, Rollet A et Schmitt L. Suivi géomorphologique d'une expérience de recharge sédimentaire: le cas du Vieux Rhin entre Kembs et Breisach (France, Allemagne). Dans : Colloque IS Rivers, Lyon, 2012. p. 26-28.

Beechie TJ, Sear DA, Olden JD, Pess GR, Buffington JM, Moir H, Roni P et Pollock MM. 2010. Process-based Principles for Restoring River Ecosystems. *BioScience*, Vol. 60 : p. 209-222.

Biron P. 2017. La restauration de l'habitat du poisson en rivière: une recension des écrits. Rapport scientifique présenté à la Fondation de la faune du Québec, Université Concordia, Montréal, 70 p.

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. Montréal, 125 p.

Biron PM, Buffin-Bélanger T et Massé S. 2018. The need for river management and stream restoration practices to integrate hydrogeomorphology. *The Canadian Geographer/Le Géographe canadien*, Vol. 62 : p. 288-295.

Brousse G, Arnaud-Fassetta G, Liébault F, Bertrand M, Melun G, Loire R, Malavoi JR, Fantino G et Borgniet L. 2020. Channel response to sediment replenishment in a large gravel-bed river: The case of the Saint-Sauveur dam in the Buëch River (Southern Alps, France). *River research and applications*, Vol. 36 : p. 880-893.

Bureau de reconstruction et de relance de la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean. 1997. Les pluies diluviennes au Saguenay-Lac-Saint-Jean; Bilan un an après. Gouvernement du Québec, Ministère du Conseil exécutif, Jonquière, 67 p.

- Cassel M, Piégay H et Lavé J. 2017a. Effects of transport and insertion of radio frequency identification (RFID) transponders on resistance and shape of natural and synthetic pebbles: applications for riverine and coastal bedload tracking. *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 42 : p. 399-413.
- Cassel M, Dépret T et Piégay H. 2017b. Assessment of a new solution for tracking pebbles in rivers based on active RFID. *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 42 : p. 1938-1951.
- Cassel M, Piégay H, Fantino G, Lejot J, Bultingaire L, Michel K et Perret F. 2020. Comparison of ground-based and UAV a-UHF artificial tracer mobility monitoring methods on a braided river. *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 45 : p. 1123-1140.
- Chapuis M. 2012. Mobilité des sédiments fluviaux grossiers dans les systèmes fortement anthropisés: éléments pour la gestion de la basse vallée de la Durance. Thèse de doctorat, Aix-Marseille Université, Aix-en-Provence, 243 p.
- Chaput-Desrochers L. 2013. Caractéristiques des structures turbulentes de l'écoulement et du transport en charge de fond en rivière à lit de graviers lors de la montée d'une crue. Mémoire de maîtrise, Université de Montréal, Montréal, 121 p.
- Dufour S et Piégay H. 2009. From the myth of a lost paradise to targeted river restoration: forget natural references and focus on human benefits. *River research and applications*, Vol. 25 : p. 568-581.
- Environnement Québec. 2003. Programme de stabilisation des berges et des lits des lacs et cours d'eau; Sommaire du bilan des interventions à la suite des pluies diluviennes des 19 et 20 juillet 1996. Gouvernement du Québec, [Québec], 25 p.
- Florsheim JL, Mount JF et Chin A. 2008. Bank Erosion as a Desirable Attribute of Rivers. *BioScience*, Vol. 58 : p. 519-529.
- Graff K, Viel V, Carlier B, Lissak C, Madelin M, Arnaud-Fassetta G et Fort M. 2018. Traçage sédimentaire d'une lave torrentielle dans le bassin de la Peyronnelle (Queyras, Alpes françaises du Sud). *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, Vol. 24 : p. 43-57.
- Hassan MA et Roy AG. 2016. Coarse particle tracing in fluvial geomorphology. *Tools in fluvial geomorphology* : p. 306-323.

Johnson MF, Thorne CR, Castro JM, Kondolf GM, Mazzacano CS, Rood SB et Westbrook C. 2020. Biomic river restoration: A new focus for river management. *River research and applications*, Vol. 36 : p. 3-12.

Lamarre H, MacVicar B et Roy AG. 2005. Using passive integrated transponder (PIT) tags to investigate sediment transport in gravel-bed rivers. *Journal of Sedimentary Research*, Vol. 75 : p. 736-741.

Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC). 2021. Suivi hydrologique de différentes stations hydrométriques, Station: 060704, À MARS - à la fosse 80 dans la zec de la rivière à Mars. Gouvernement du QUÉBEC, Québec.

Nilsson C et Berggren K. 2000. Alterations of riparian ecosystems caused by river regulation: Dam operations have caused global-scale ecological changes in riparian ecosystems. How to protect river environments and human needs of rivers remains one of the most important questions of our time. *BioScience*, Vol. 50 : p. 783-792.

Organisme de bassin versant du Saguenay. 2014. Suivi hydrogéomorphologique de la rivière à Mars, Ville de Saguenay arrondissement de La Baie (Québec). Ville de Saguenay, 56 p.

Piégay H, Pautou G et Ruffinoni C. 2003. Les Forêts riveraines des cours d'eau: écologie, fonctions et gestion. *Forêt privée française*, 463p.

Piégay H, Darby S, Mosselman E et 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 : p. 773-789.

QUÉBEC. *Loi sur les compétences municipale*, L.Q.R. 2005, C-47.1, art. 104-106.

Wohl E, Angermeier PL, Bledsoe B, Kondolf GM, MacDonnell L, Merritt DM, Palmer MA, Poff NL et Tarboton D. 2005. River restoration. *Water Resources Research*, Vol. 41 : 12 p.