
Portrait hydrogéomorphologique d'un bassin versant agricole et processus de re-méandrisation des cours d'eau

Le cas de la Baie de Lavallière au Québec



Clément Roux

candidat au master MEGA-IME du Département de l'Université de Lyon 1
2012

Stage de fin de maîtrise codirigé par :

Pascale Biron : responsable du laboratoire de Géomorphologie Fluviale
à l'Université de Concordia à Montréal

Aubert Michaud : Chercheur en Physique en conservation des sols et de
l'eau à l'Institut de Recherche et de Développement en
Agroenvironnement (IRDA) à Québec

Delphine Doppler : Maître de conférence à l'Université Lyon 1 et
responsable des stages du master pro MEGA-IME

À des fins de citations :

ROUX, C. (2012). Portrait hydrogéomorphologique d'un bassin versant agricole et processus de re-méandrisation : Le cas de la Baie de Lavallière au Québec. Department of Fluvial Geomorphology of Concordia University, Institut de Recherche et de Développement en Agroenvironnement (IRDA) et Département de Mécanique de l'Université de Lyon 1. Montréal. 50p + annexes

Table des matières

Table des matières	i
Remerciements	iii
Introduction	1
I- Mise en contexte	2
1. Problématiques de la gestion des cours d'eau en milieu agricole	2
1/ 1. Historique de l'anthropisation des cours d'eau	2
1/ 2. Impact des activités anthropiques sur la qualité des cours d'eau	3
2. Mécanismes de l'évolution des rivières	5
2/ 1. Équilibre dynamique des cours d'eau	6
2/ 2. Réponses des cours d'eau aux modifications géomorphologiques	7
3. La Baie de Lavallière, un problème séculaire	9
3/ 1. La problématique de la Baie de Lavallière	9
3/ 2. Des acteurs aux intérêts divergents	12
3/ 3. L'intégration des scientifiques et leurs rôles dans le projet	13
4. Objectifs de l'étude	13
II- Méthodologie	15
1. Le site d'étude, le bassin versant de la Petite rivière Pot-au-Beurre	15
1/ 1. Échelle globale de la Baie de Lavallière	15
1/ 2. Historique de la région	16
1/ 3. Le site d'étude	16
1/ 4. Le bassin versant témoin de la Petite rivière Bellevue	18
2. Méthode mise en œuvre	19
2/ 1. D'un point de vue générale	19
2/ 2. Trois approches distinctes	20
3. Les systèmes d'Informations Géographiques (SIG) au service du diagnostic hydrogéomorphologique	21
3/ 1. La technologie LiDAR	21
3/ 2. Les Systèmes d'Informations Géographiques	22
3/ 3. Les types de données utilisées par les SIG	22
3/ 4. SIG et l'étude hydrogéomorphologique	23
4. Données	23
4/ 1. Portrait des données historiques acquises	23
4/ 2. Stations de jaugeage et données hydrométriques	24
4/ 3. Portrait des données LiDAR	24
5. Prétraitement des données	25

5/ 1. Prétraitement des orthophotos _____	25
5/ 2. Prétraitement des données hydrométriques _____	27
5/ 3. Prétraitement des données LiDAR _____	27
III- Résultats et analyses _____	31
1. Évolution historique du lit des cours d'eau _____	31
1/ 1. Évolution de la proportion de zones méandreuses _____	31
1/ 2. Détermination de la vitesse de migration des berges _____	32
1/ 3. Impact du dragage sur la régression de fond _____	33
2. Portrait hydrogéomorphologique _____	34
2/ 1. Profils d'élévation _____	34
2/ 2. Analyse de la pente des cours d'eau _____	37
2/ 3. La puissance hydraulique à l'échelle de la Baie _____	38
3. Re-méandrisation et paramètres influençant la mobilité _____	41
3/ 1. Calage du modèle numérique _____	41
3/ 2. Configuration prédite par RVR Meander _____	43
3/ 3. Évolution de l'amplitude des méandres _____	45
3/ 4. Paramètres influençant la mobilité du lit _____	47
Liste des figures _____	51
Liste des tableaux _____	53
Bibliographie _____	54
Annexe 1 _____	57
Annexe 2 _____	59
Annexe 3 _____	61

Remerciements

Ce travail de fin d'étude n'aurait pas pu être réalisé sans la confiance que m'a accordée ma responsable de mémoire, Pascale Biron. Je la remercie de m'avoir transmis sa passion de la géomorphologie fluviale et de m'avoir donné l'opportunité, et surtout l'envie, de poursuivre ma spécialisation dans ce domaine. Sa disponibilité, son écoute et ses connaissances m'auront été d'une aide très précieuse.

Mon intégration au sein du laboratoire de Concordia a été facilitée par la sympathie des membres de son équipe. L'ampleur de la tâche accomplie n'aurait pu être assumée sans aide extérieure. La contribution de ma collègue, Fernanda Paulo de Oliveira, a été inestimable. Merci pour le temps qu'elle a accordé à mon projet, la patience et la pugnacité dont elle a fait preuve et pour m'avoir permis de pratiquer enfin mon anglais ! Merci aussi à Guérolé Choné, pour ses généreux conseils.

Comme le dit André Roy, le père de l'hydrogéomorphologie québécoise, l'étude en laboratoire est indissociable d'un travail et d'une observation sur le terrain. L'implication de mon coresponsable de mémoire, Aubert Michaud, dans la création d'une dynamique de concertation entre les différents acteurs de la Baie de Lavallière a été pour moi extrêmement appréciable. Merci à lui de m'avoir intégré à ce projet où la composante sociale est essentielle ainsi qu'aux exploitants agricoles qui nous ont permis d'appréhender concrètement les problèmes auxquels ils font face. Merci également à Isabelle Beaudin, de l'Institut de Recherche et de Développement en Agroenvironnement, pour son appui technique, même dans les tous derniers instants du projet.

Le projet de gestion intégrée de la Baie de Lavallière est un travail de tous les instants de la part des différents gestionnaires. Un grand merci à Jeffrey Lafleur de la MRC Pierre de Saurel, pour son soutien et sa gentillesse. Merci également à Jean Labbé, du MAPAQ, pour sa connaissance de la région et sa bonne humeur. Je pense aussi à l'association de conservation des milieux humides, Canards Illimités, et plus particulièrement à Pierre Dulude, pour le temps qu'il m'a accordé, et l'occasion qu'il m'a donnée de visiter Québec sous le soleil printanier. Merci à tous pour leur patiente collaboration !

Je remercie également toute l'équipe du Département de Mécanique de l'Université Claude Bernard Lyon 1 qui, par son enseignement, me permet aujourd'hui d'entreprendre ce dont j'ai envie.

À titre plus personnel, merci à Margaux, pour sa présence à mes côtés qui a fait que le temps passé au Québec restera un souvenir inoubliable. Je pense aussi à mes proches et à ma famille, dont le soutien au quotidien m'a permis de profiter au maximum de cette formidable expérience de vie.

Enfin, merci au Québec, aux québécois et aux québécoises, pour leur naturel et leur gentillesse!

Introduction

Depuis des millénaires, l'homme interagit avec son environnement, l'utilise et dépend directement de lui pour subvenir à ses besoins les plus élémentaires. La découverte de l'agriculture changera à jamais la relation qu'entretient l'Homme avec la terre et elle marque également le début d'un processus d'anthropisation de l'environnement. Pour répondre à des besoins alimentaires croissant et à un désir de confort assuré, la plupart des fleuves, rivières et cours d'eau ont subi des aménagements afin d'accroître la superficie agricole et le rendement des terres. Aujourd'hui, à l'heure de la question écologique et de l'impact de l'Homme sur son environnement, des modèles de gestion intégrée des cours d'eau en milieu agricole sont instaurés et permettent d'encadrer les pratiques et les interventions.

Au Québec, le cas du bassin versant de la Baie de Lavallière est éloquent. Il comporte une zone humide, très riche écosystème aquatique, extrêmement marquée par l'activité humaine au début du siècle dernier. Avec près de 55% de terres cultivées, cette région est aussi un vaste territoire agricole. La cohabitation entre ces deux milieux n'est pas chose aisée et l'impact de l'Homme sur la qualité environnementale du site, au travers de ces interventions passées et de ces pratiques actuelles, est préoccupante. Plusieurs états des lieux ont déjà été dressés et tous s'accordent sur le fait que, malgré des travaux de réhabilitation dans les années 1980, la zone humide continue à se dégrader. Une importante accumulation de sédiments provenant des terres agricoles situées en amont y est observée et, de manière générale, la richesse et la diversité faunique et végétale du milieu se détériorent. D'un autre côté, les exploitants agricoles constatent des phénomènes d'érosion et de décrochement de berges importants, qui occasionnent des pertes de superficie cultivable.

Cet enjeu territorial a fait et fait toujours l'objet de concertations entre les nombreux acteurs locaux. Dans le cadre d'un Observatoire de la qualité de l'eau de surface en bassins versants agricoles, l'Institut de Recherche et de Développement en Agroenvironnement (IRDA) a révélé une contribution importante d'un des sous-bassins versants dans la dégradation générale de la qualité du réseau hydrique de la Baie de Lavallière. Ce sous-bassin de la Petite rivière Pot-au-Beurre, le bassin d'intervention, présente un taux de matière en suspension deux fois supérieur au sous-bassin voisin et témoin de la Petite rivière Bellevue.

Ainsi, c'est dans ce contexte à la fois environnemental, social et économique, que l'IRDA a fait appel à l'expertise du Département de Géomorphologie Fluviale de l'Université de Concordia. Dans la présente étude, nous tenterons de dresser un portrait hydrogéomorphologique de l'ensemble des sous-bassins qui composent la Baie de Lavallière. Un accent particulier sera mis sur les cas des sous-bassins des petites rivières Pot-au-Beurre et Bellevue, afin de répondre aux questions : Pourquoi la charge sédimentaire du bassin d'intervention est-elle si élevée ? D'où provient cet excédant ? Ce sous-bassin est-il un cas isolé dans la Baie de Lavallière ? L'ampleur de la mobilité des cours d'eau peut-elle être appréhendée ? Peut-on cartographier l'érosion des berges et ainsi cibler les secteurs d'action prioritaires ?

Trois approches distinctes ont été mise en œuvre pour apporter des éléments de réponses à ces questions : une approche historique, une phase d'analyse des données hydrogéomorphologiques qui s'apparente à l'étude de la situation actuelle et enfin, une approche numérique sur le devenir des cours d'eau. Le présent rapport s'articule autour de trois axes majeurs. Dans un premier temps, nous replacerons l'étude dans son contexte théorique et pratique. Puis, nous décrirons les données utilisées et les méthodes employées pour parvenir à nos résultats. Enfin, nous présenterons conjointement les résultats et leurs analyses.

I- Mise en contexte

Cette première section a pour but de replacer la présente étude dans les contextes de la dynamique fluviale et de l'interaction entre l'homme et les cours d'eau. C'est dans cette optique là, que la question de la gestion des cours d'eau en milieu agricole sera abordée. Dans un second temps, nous rappellerons des éléments importants de dynamique fluviale. La problématique de la Baie de Lavallière fera l'objet d'une dernière partie.

1. Problématiques de la gestion des cours d'eau en milieu agricole

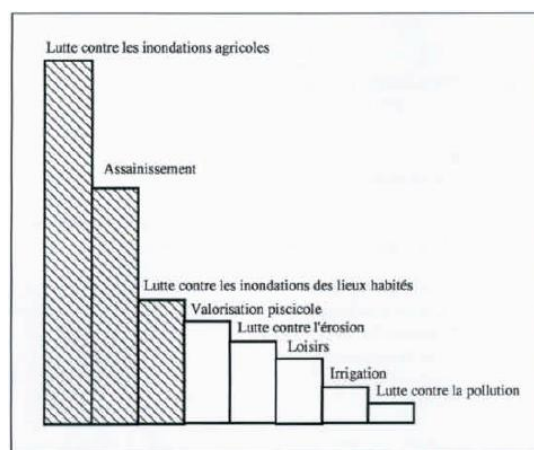
1/ 1. Historique de l'anthropisation des cours d'eau

L'intervention humaine dans les systèmes fluviaux est une pratique très ancienne. L'utilisation des cours d'eau à des fins agricoles en est sans doute l'exemple le plus ancien. Les premières traces d'irrigation remontent au VII^{ème} millénaire av. J.-C., dans la vallée du Tigre, près des Monts Zagros en Irak. Le VI^{ème} millénaire av. J.-C. voit l'apparition des premiers puits [Viollet, 2004] et le IV^{ème}, celle du premier barrage connu, à Jawa, en Jordanie [Le Delliou, 2003]. L'anthropisation des cours d'eau désigne les modifications directes appliquées à un système fluvial. L'Histoire retiendra Yu le Grand, empereur chinois, qui modifia le tracé et la pente du Fleuve Jaune vers la fin du III^{ème} millénaire av. J.-C. pour lutter contre des inondations récurrentes [Viollet, 2004]. Avec l'avènement de l'industrie et la mécanisation de la machinerie à la fin du 18^{ème} siècle, l'Homme a pu intervenir massivement sur les cours d'eau. Par exemple, on compte aujourd'hui 447 barrages de retenue en France, près de 6000 au Québec et 90000 en Chine.

La linéarisation des cours d'eau est aussi une intervention humaine qui a été jusqu'à récemment, une pratique très répandue. Elle fait partie des 6 objectifs visés lors de travaux d'aménagements des cours d'eau qui sont décrit par Wasson *et al.* (1995) :

- contrôle local des crues
- assainissement des terres
- contrôles de l'érosion des berges
- contrôle de l'érosion du fond
- amélioration piscicole¹
- loisirs

Par linéarisation², on désigne tous les ouvrages visant à améliorer l'évacuation des eaux lors d'inondations. Elle se traduit généralement par un



▨ Objectifs impliquant des aménagements de type chenalisation

Figure 1 Principaux objectifs des aménagements de cours d'eau.
Source : Wasson *et al.*, 1995

¹ Bassins de re-naturalisation, augmentation de la surface ombragée, blocs artificiels offrant une zone de repos, etc.

² D'autres termes peuvent être employés dans la littérature tels que chenalisation ou redressement.

surdimensionnement des canaux, une élimination des sinuosités du tracé et une diminution de la rugosité du lit. Ces travaux interviennent dans les principaux aménagements de cours d'eau (Figure 1).

Aux États-Unis, 320 000 km de cours d'eau ont été linéarisés en 150 ans tandis qu'en Angleterre et au Pays de Galle, se sont entre 12% et 41% des rivières qui sont concernées, selon la région. Quant au Québec, il a également subi une campagne de linéarisation massive au cours du XXème siècle. Au total, ce sont près 30 000 km de cours d'eau qui ont été linéarisés [Warwrzyniak, 2009].

1/2. Impact des activités anthropiques sur la qualité des cours d'eau

Limitation des bandes riveraines

La notion de bande riveraine fait partie de la gestion intégrée des cours d'eau. Elle consiste à préserver les premiers mètres aux abords d'un chenal. Il est généralement conseillé d'implanter une végétation aquatique au niveau de la ligne d'eau, une zone herbacée sur le talus et enfin, un bande arbustive sur le terrain. La Figure 2 montre la différence entre une bande riveraine idéale en bordure de champs et une bande riveraine mal entretenue.

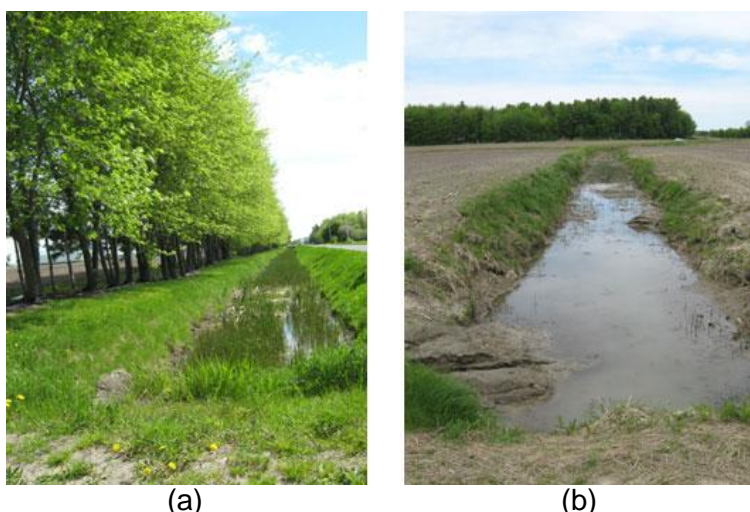


Figure 2 Bande riveraine idéale (a) et bande riveraine mal entretenue (b).
Source : Municipalité Régionale de Comté (MRC) Pierre de Saurel

Elle constitue un véritable rempart contre les dégradations et est un foyer d'habitation privilégié pour un grand nombre d'espèces fauniques et végétales. Les rôles de la bande riveraine sont multiples :

- elle augmente la rétention des sédiments en diminuant la vitesse de l'écoulement de surface et en favorisant l'infiltration de l'eau dans le sol
- elle réduit la contamination du cours d'eau en absorbant une partie des engrais agricoles et des pesticides.
- elle stabilise les berges en structurant le sol grâce à son système racinaire et en réduisant la vitesse de l'écoulement grâce aux végétaux émergés.
- elle améliore la biodiversité en offrant un habitat privilégié à la faune terrestre et aquatique.

[CCSE³, 2007]

³ Centre de Conservation des Sols et de l'Eau de l'Est du Canada

Malheureusement, l'aménagement de bande riveraine est synonyme d'une perte directe de superficie cultivable dans les exploitations agricoles et bien souvent, elle n'est pas mise en place.

Absences d'espace de mobilité

Que l'on parle d'un fleuve, d'une rivière ou d'un cours d'eau, il est toujours question d'un système en équilibre dynamique [Piégay *et al.*, 1998]. En réponse aux fluctuations de débits liquide ou solide⁴ et à des crues importantes, un réajustement morphologique naturel s'opère constamment dans le cours d'eau. Ceci se traduit par des migrations latérales et verticales des berges et du fond, et c'est en ce sens que la notion d'espace de mobilité⁵ est apparue (Figure 3). La définition donnée à l'espace de liberté peut être la suivante :

"Espace du lit majeur à l'intérieur duquel le ou les chenaux fluviaux assurent des translations latérales pour permettre la mobilisation des sédiments ainsi que le fonctionnement optimal des écosystèmes aquatiques et terrestres."

[SDAGE-RMC⁶, Volume 1, p°53, 1996]

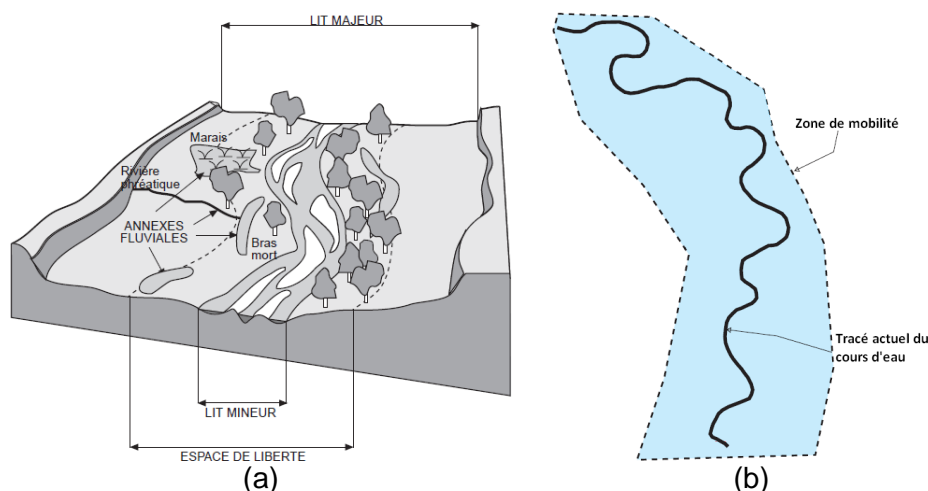


Figure 3 Le cours d'eau et son espace de mobilité

Source (a) : SDAGE-RMC⁶, Volume1, p°53, 1996

Source (b) : Piégay *et al.*, 1998

La mobilité d'une rivière participe au maintien de la diversité et de la richesse des écosystèmes. Elle détruit et recrée des milieux tous les 10 à 100 ans selon le cours d'eau. Elle contribue ainsi au maintien de la qualité et de la diversité des écosystèmes qui tirent justement leur richesse de cette perpétuelle régénération [Piégay *et al.*, 1998]. Cependant, comme dans le cas de la bande riveraine, respecter un espace de liberté occasionne des pertes de terres cultivables non négligeables pour les exploitants agricoles. Cette pratique a donc du mal à se mettre en place.

Intensification de l'agriculture

Suite à la seconde guerre mondiale, les efforts de reconstruction ont conduit l'agriculture, jusqu'alors extensive, vers un mode d'exploitation beaucoup plus productif. Ce type d'agriculture intensive, où la terre et le respect de l'environnement ne

⁴ Le transport solide, ou débit solide, est le transport de matériaux granulaires dans le réseau hydrique, provenant du bassin versant, de l'érosion du fond du cours d'eau ou de ses berges.

⁵ D'autres termes tels que zone ou espace de liberté pourront être employés ici.

⁶ Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Cours d'Eau du bassin Rhône-Méditerranée-Corse

sont pas les valeurs principales, consomme de très grandes quantités d'intrants chimiques, tels que les pesticides et les nutriments minéraux. Les impacts environnementaux sont multiples et bien connus. Les intrants et les pratiques culturales occasionnent notamment une forte contamination de l'eau et du sol (compaction, réduction de la matière organique, érosion, déstructuration, etc.) [Simard *et al.*, 2011].

Au Québec, dans les dernières décennies, la diversité et la rotation des cultures ont été mises à mal. Les superficies d'orges, de blé et de maïs sont par exemple passées de 87 230 ha à plus de 450 000 ha en seulement quinze ans. Dans le même temps, l'élevage porcin a presque triplé, pour passer de 1 332 000 à 3 298 500 têtes par années. Or, de 1971 à 1986, le nombre de fermes et la superficie agricole totale ont considérablement diminués⁷ [Tabi *et al.*, 1990]. L'agriculture québécoise s'est donc à la fois intensifiée et densifiée, amplifiant d'avantage son impact sur l'environnement.

Réduction des transferts des champs au cours d'eau

En milieu agricole, préserver la qualité d'un cours d'eau et de son environnement immédiat implique aussi d'adopter des pratiques respectueuses dans les champs. Les précipitations qui s'accumulent sur les terres cultivées finissent par créer du ruissellement de la parcelle au cours d'eau. Au passage, l'eau se charge d'éléments minéraux et organiques qui viennent contaminés le cours d'eau. Plusieurs méthodes permettent de limiter ce transfert. La bande riveraine en fait partie mais son efficacité est limitée.

Le travail réduit du sol par des techniques culturales simplifiées telles que le semis direct, l'emploi d'outils à disques et à dents⁸ ou la rotation des cultures, préserve la structure du sol. L'érosion hydrique⁹ dans la parcelle en est réduite, ce qui diminue ainsi les transferts des champs au cours d'eau.

L'emploi de cultures à faibles interlignes¹⁰ offre un meilleur couvert végétal et accroît la rugosité et la structure du sol. Cette technique contribue également à diminuer le risque d'érosion hydrique et le ruissellement de surface.

Toutefois, et au Québec tout particulièrement, on observe une prédominance de cultures à grands interlignes. Le maïs et le soja représentent à eux seuls près de 80% des 69 000 ha destinés aux céréales et aux oléagineux [DRMLL¹¹, 2007].

2. Mécanismes de l'évolution des rivières

La notion de bassin versant peut être appréhendée à bien des échelles. En France métropolitaine par exemple, le territoire est divisé en sept bassins versants, tels que celui affilié au fleuve du Rhône, le bassin Rhône-Méditerranée. Mais ce bassin peut également être subdivisé en une multitude de sous-bassins versants comme ceux de la Saône, de l'Isère ou même du Garon. L'inter-connectivité des réseaux hydriques est une composante essentielle dans la gestion intégrée des cours d'eau à l'échelle des

⁷ Nombre de fermes et superficie agricole totale en baisses de 32% et 18% [Tabi *et al.*, 1990].

⁸ Le semi direct et l'emploi d'outils à dents et à disques sont des alternatives au labourage.

⁹ L'érosion hydrique des sols correspond au détachement et au transport de particules du sol sous l'action combinée du ruissellement et de la pluie.

¹⁰ L'interligne d'une culture est l'espace laissé nu entre deux rangs de culture. Le maïs et le soja sont considérés comme des cultures à grand interligne, à l'inverse du blé ou des fourrages.

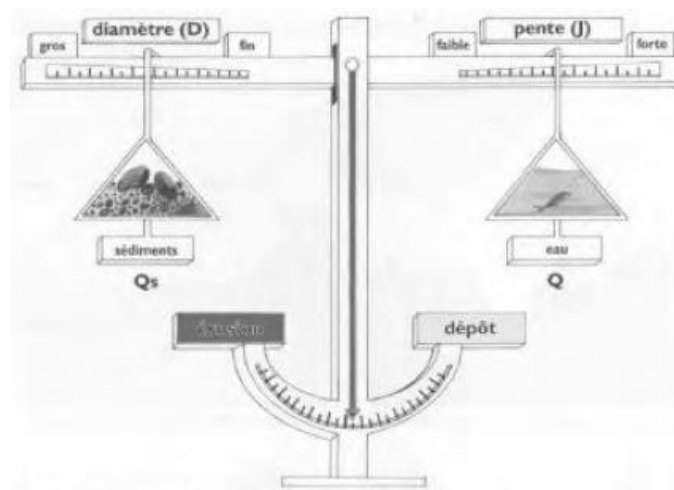
¹¹ Direction Régionale Montréal-Laval-Lanaudière

bassins versants. Des modifications anthropiques ou toutes autres altérations physico-chimiques dans la partie aval d'un bassin versant peut ainsi avoir d'importantes répercussions en amont, et vice-versa.

2/ 1. Équilibre dynamique des cours d'eau

L'évolution des systèmes fluviaux est un processus dynamique. Il s'exprime par des modifications hydrogéomorphologiques du cours d'eau tels que l'érosion, le transport solide, la sédimentation et le débordement. En ce sens, un certain nombre de variables de contrôle et de réponse peuvent être définies. Les variables de contrôles sont imposées au cours d'eau par son environnement et le climat tandis que les variables de réponse sont les paramètres sur lesquelles agit le cours d'eau pour se ramener à une position d'équilibre. Les variables de contrôles sont multiples : le débit liquide, le débit solide, la géométrie de la vallée, la nature du boisement du bassin versant, les caractéristiques granulométriques et mécaniques des matériaux du lit et des berges et la couverture végétale riveraine. Le cours d'eau peut alors jouer sur sa largeur, sa profondeur, sa pente, l'amplitude et la longueur d'onde des sinuosités, la taille des sédiments charriés et la vitesse de l'écoulement [Degoutte, 2006].

La notion d'équilibre dynamique est très bien représentée par la balance de Lane (Figure 4(a)). Le poids de la puissance hydraulique¹², à droite, est fonction de la géométrie du cours d'eau, et surtout de la pente, ainsi que du débit liquide Q apporté par les conditions climatologiques. Lors d'événement de crues printanières par exemple, la puissance hydraulique est décuplée et on parle de crues morphogènes. D'un autre côté, l'équilibre de la balance est assuré par le débit solide Q_s , à gauche, qui traduit le poids des sédiments transportés et le travail de transport que cela implique. Pour charrier des grains en plus grande quantité ou de diamètre élevé, l'écoulement devra développer un travail de transport plus important. Ainsi, si la pente et/ou le débit liquide diminuent, la puissance hydraulique décroît (Figure 4 (b)). Le travail demandé pour charrier les sédiments est alors trop grand et la balance de Lane penche vers la gauche. Les sédiments ne pouvant plus être transportés se déposent dans le fond. Dans le cas contraire, si la puissance hydraulique du cours d'eau augmente, l'écoulement sera plus à même de charrier des sédiments et même, de les arracher au fond ou aux berges (Figure 4 (c)).



(a)

¹² La puissance hydraulique Ω correspond au taux de dissipation de l'énergie d'un écoulement dans le lit de la rivière.

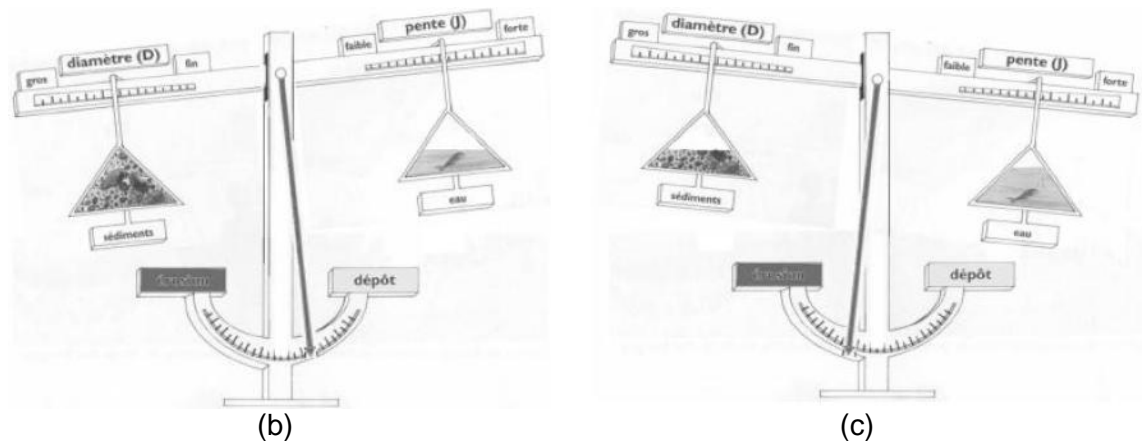


Figure 4 Balance de Lane comme modèle d'équilibre pour le dépôt et l'érosion des cours d'eau. (a) : modèle à l'équilibre, (b), déséquilibre vers de la sédimentation, (c): déséquilibre vers de l'érosion
 Source : Association Rivière Rhône-Alpes, 2006. Image inspirée de l'équation de Lane (1955).

Une des réponses à cet ajustement perpétuel est l'allure des profils de la rivière. De manière générale et à l'échelle du bassin versant, le profil d'un cours d'eau à l'équilibre est concave (Figure 5). La pente vers l'amont est souvent beaucoup plus forte que vers l'aval. C'est le lieu de fortes érosions, où les sédiments sont arrachés puis transportés vers l'aval. À cette configuration correspond un tracé très rectiligne. Inversement, plus on progresse vers l'aval, plus le tracé du cours d'eau devient méandreux. Tout d'abord des tresses et des zones divagantes se forment puis de véritables méandres apparaissent dans la plaine et vers l'embouchure. Dans les méandres, les sédiments se composent de grains fins en suspension tels que du limon ou du sable.

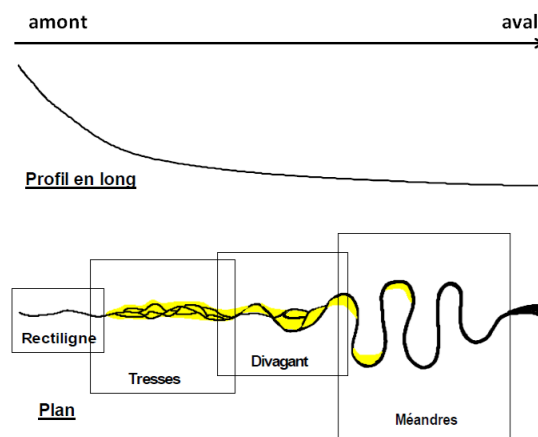


Figure 5 Formes générales en profil et en plan d'un cours d'eau de l'amont vers l'aval.
 Source : Degoutte, 2006

2/2. Réponses des cours d'eau aux modifications géomorphologiques

La dynamique des cours d'eau est gouvernée par la géologie du site et le climat, mais peut aussi être influencée par des actions anthropiques. Ces modifications sont diverses et entraînent des ajustements du cours d'eau.

Impact de la linéarisation des cours d'eau

Nous l'avons vu dans la section I-1/ 1. , la linéarisation des canaux a été jusqu'à très récemment, une pratique largement répandue. Cette modification, au même titre qu'une fermeture naturelle de boucle de méandre, a un impact majeur sur la géométrie

du cours d'eau. Sa longueur est réduite et sa pente augmentée (Figure 6). Dans le plan, le cours d'eau va chercher à retrouver une valeur de pente plus faible en recréant de nouveaux méandres. En coupe transversale, l'augmentation de la puissance hydraulique associée à l'augmentation de la pente se traduit par un pouvoir érosif très important (Figure 7). Au fil du temps, la rivière s'enfonce en creusant son lit et les berges, déstabilisées, s'affaissent et s'érodent.

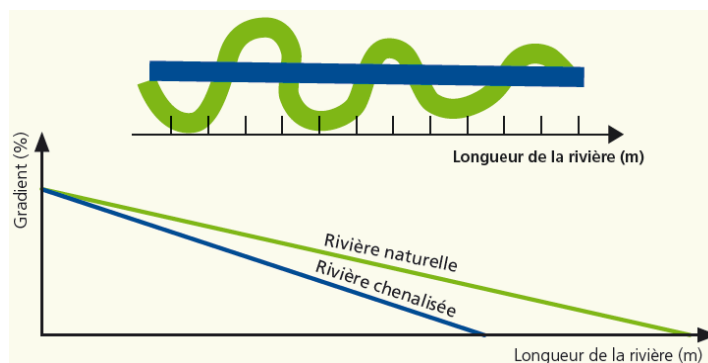


Figure 6 Linéarisation d'une boucle de méandre.
 Source : Bureau d'étude Micha Bunusevac, Renaturation des cours d'eau et restauration des milieux humides, 2007

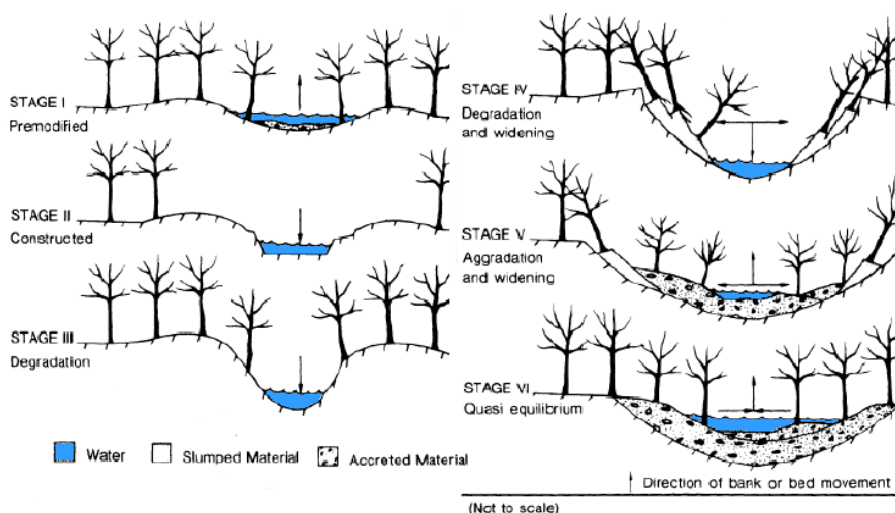


Figure 7 Impact de la linéarisation sur le fond et le lit du cours d'eau.
 Source : Wawrzyniak, 2009. Image modifiée depuis Hupp et Simon (1991)

Enfin, la linéarisation peut être mise en œuvre sur de longs tronçons, mais une cassure apparaît souvent dans le profil en long, au point amont de l'arrêt des travaux. Cette discontinuité de pente engendre une puissance hydraulique très importante en ce point. Ceci se traduit par une érosion de fond de l'aval vers l'amont (Figure 9). Ce phénomène d'érosion régressive à lieu jusqu'au retour d'un profil plus stable.

Impact d'un déblaiement des dépôts

Un déblaiement de dépôt consiste à nettoyer une partie d'un cours sujet à une accumulation de sédiments (Figure 8). Cette accumulation est due au fait que l'écoulement n'a pas la capacité de transport suffisante pour charrier les sédiments. Supprimer une zone de déposition conduit, comme la linéarisation, à un déséquilibre et augmente la pente du canal dans la section. Le cours d'eau va alors se réajuster afin de retrouver une pente plus faible. Pour ce faire, une érosion régressive du fond va se

produire vers l'amont (Figure 9), déstabilisant dans le même temps les berges attenantes.

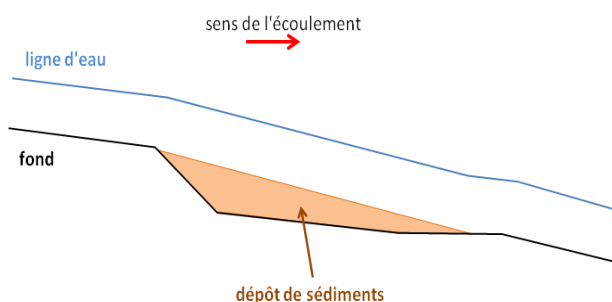


Figure 8 Zone d'accumulation de sédiments dans un cours d'eau

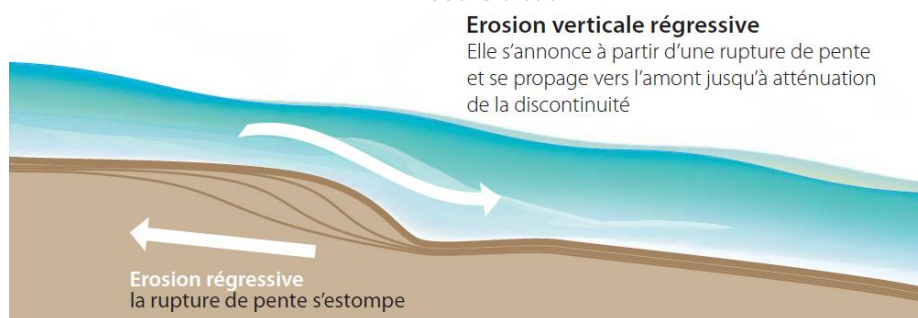


Figure 9 Phénomène d'érosion régressive de l'aval vers l'amont

Source : Agence de l'Eau Adour Garonne, *Quelles rivières pour demain ?*, 2009

3. La Baie de Lavallière, un problème séculaire

3/ 1. La problématique de la Baie de Lavallière

La Baie de Lavallière est un bassin versant de la rivière Yamaska, affluent du Saint Laurent reconnu comme étant le plus pollué du Québec. Le Ministère du Développement Durable, de l'Environnement et des Parcs répertorie la qualité de l'eau sur presque toute la longueur de la rivière de "mauvaise" à "très mauvaise". En 1998, la Baie de Lavallière a été classée comme site RAMSAR¹³ et depuis 2000, elle fait partie de la réserve mondiale de l'UNESCO de la Biosphère du Lac Saint-Pierre. Indispensable dans la voie migratoire de l'Atlantique, la Baie de Lavallière constitue une réserve et une halte pour un bon nombre d'espèces de sauvagine¹⁴. Véritable "îlot-vert", l'écosystème de la Baie contribue de manière importante à la richesse faunique du Lac Saint-Pierre [CIC et EI¹⁵, 1981]. En effet, une quinzaine d'espèces de canards et 28 des 30 espèces de poissons que compte la plaine inondable du lac Saint-Pierre viennent s'y reproduire. Le Ministère des Ressources Naturelles et de la Faune (MRNF) et la société de conservation des milieux humides Canards Illimités ont également dénombré 58 espèces d'oiseaux qui y nichent et y élèvent leurs couvées.

¹³ Convention relative aux zones humides d'importance internationale

¹⁴ La sauvagine est un terme générique pour les espèces d'oiseaux aquatiques tels que les canards ou les bernaches

¹⁵ CIC pour l'association de conservation des milieux humides Canards Illimités Canada et EI pour la firme Environnement Illimité

La Baie de Lavallière est reconnue comme un habitat prioritaire pour la sauvagine selon la *Loi sur la conservation et la mise en valeur de la faune* [Foucrier *et al.*, 2007].

Située dans la partie aval du bassin versant de la Baie de Lavallière, la zone humide est un bassin naturel de déposition des sédiments. L'érosion naturelle du fond des cours d'eau et des berges due au travail de l'eau, apporte son lot de matière en suspension (MES) dans le réseau hydrique. En amont, l'érosion au champ par le ruissellement des précipitations sur les parcelles agricoles contribue également à l'augmentation du taux de MES. Cet apport sédimentaire est charrié jusqu'en aval, dans la zone humide de la Baie.

Or aujourd'hui, c'est l'accumulation excessive de sédiments ainsi que leur composition qui posent de graves problèmes dans l'équilibre de l'écosystème du milieu humide de la Baie [Foucrier *et al.*, 2007]. Les travaux de 1986 qui ont suivi les aménagements de drainage des années 1930, ont permis de remettre en eaux le milieu humide qui s'asséchait. Malgré cela, on constate depuis quelques années, une nette dégradation de l'écosystème à l'embouchure de la Baie de Lavallière.

Le rapport de l'Observatoire de la qualité de l'eau de surface en bassins versants agricoles de 2012 montre ainsi que l'excédent sédimentaire de la Baie est en grande partie imputable à la Petite rivière Pot-au-Beurre¹⁶ (573 kg.ha.an⁻¹ contre 277 kg.ha.an⁻¹ dans le sous-bassin voisin de la Petite rivière Bellevue). L'érosion des berges y est considérée comme principal facteur d'apport de sédiments. En effet, le relief extrêmement plat conjugué à un taux de ruissellement de surface faible (100 mm.ha⁻¹) laisse à penser que le phénomène d'érosion hydrique parcellaire est négligeable. Cette intuition est confirmée par la spéciation du phosphore¹⁷ de la Petite PaB et par les observations de terrain (affouillements, rupture en cercles, cisaillement). Conséquence directe de cette forte sédimentation, certains canaux de la Baie de Lavallière se seraient ainsi rehaussés de 30 à 60 cm dans les dix dernières années [Sundborg, 2009].

Le rapport d'Août 2007 du MRNF et de CIC dresse lui un portrait de l'état de la qualité de l'eau à l'embouchure de la Baie de Lavallière (Tableau 1). La quantité de phosphore semble augmenter au dernier relevé de 2004 (0.11 mg.l⁻¹) et dépassait largement le taux recommandé pour la protection de la vie aquatique de 0.03 mg.l⁻¹. Même constatation pour la teneur en nitrites, qui s'élevait à 0.03 mg.l⁻¹ à l'été 2004 pour un critère de 0.02mg.l⁻¹. L'intensification de l'agriculture, l'emploi excessif d'engrais et le drainage important des terres agricoles favorisent les apports en azote et phosphore. Or un excès de phosphore conduit généralement à un processus d'eutrophisation¹⁸ des milieux aquatiques. Les trop grandes quantités de nutriments favorisent la prolifération d'algues et de plantes aquatiques, appauvrissant ainsi la teneur en oxygène de l'eau. Ce phénomène accélère le vieillissement des cours d'eau et dégrade nettement les conditions de vie pour la faune aquatique.

¹⁶ Dans la suite de l'étude, nous utiliserons l'abréviation Petite PaB.

¹⁷ La spéciation chimique du phosphore est un procédé qui permet de distinguer la part de sédiments venant des champs par rapport à celle venant des berges ou déjà présente dans le réseau hydrique.

¹⁸ L'eutrophisation est un phénomène biologique qui concerne les milieux aquatiques. D'origine naturelle ou artificielle, elle correspond à un enrichissement excessif du milieu en éléments nutritifs.

Paramètres	Printemps 1983 ¹	Printemps 2004 ²	Été 1983 ¹	Été 2004 ²	Critère pour la protection de la vie aquatique- Exposition chronique ³
pH	7,25	7,75	7,4	7,45	6,5 - 9
Phosphore tot. (mg/l)	0,01	0,12	0,12	0,11	0,03
Nitrates (mg/l)	0,9	3,82	0,04	2,47	40
Nitrites (mg/l)	0,03	0,07	<0,01	0,03	0,02

¹ valeur moyenne de deux campagnes d'échantillonnage

² Laniel et St-Georges, 1987

³ données communiquées par l'UQAM

⁴ MDDEP, 2006b

Tableau 1 Physicochimie de l'eau près de l'exutoire de la Baie de Lavallière en 1983 et 2009
Source : Foucrier et al., 2007

Les aménagements mis en place dans les années 1980, et notamment le contrôle du niveau d'eau à l'embouchure de la Baie, ont conduit à une hausse et une stabilisation du niveau de l'eau et à une diminution du débit dans le milieu humide. L'état des lieux de la Baie de Lavallière de 2007, mené conjointement par le MRNF et CIC montre que cette structure de contrôle a également conduit à réduire l'impact des crues sur le site. Ces phénomènes, bien que bénéfiques au maintien de la zone humide, favorisent 1) le retrait des zones arborées et arbustives (-11% entre 1985 et 2006), zones d'habitats privilégiées pour la sauvagine, 2) le recul des marais profonds au profit des marais peu profonds, et 3) la diminution de l'action d'arrachement des végétaux par les glaces. Ainsi, en l'absence de perturbation majeure, les sédiments s'accumulent dans la Baie et entraînent l'eutrophisation et l'envahissement du milieu par des tapis végétaux. Ces tapis végétaux de 10 à 35 cm d'épaisseur en 2006, recouvrent désormais une grande partie de la zone humide dans laquelle, on a constaté une nette diminution de la surface d'eau libre, éléments essentiels dans l'occupation et la diversité faunique d'un milieu humide [Foucrier et al., 2007].

Parmi les espèces végétales présentes dans la zone humide de la Baie, la quenouille occupait 58% du couvert végétal du marais en 1985, contre 65% aujourd'hui [MRNF et CIC aout 2007]. D'autres espèces comme le butome à ombrelle, la zizanie et la potentille palustre envahissent peu à peu le marais au détriment d'espèces initialement présentes telles que le scirpe fluviatile et le rubanier à gros fruits. Brodeur et al. (en prep) ont réalisé des campagnes de prélèvements en 2007 et 2008. Les résultats de cette étude montrent l'impact de la dégradation de la qualité de la Baie en tant qu'écosystème. La population de poisson du milieu est actuellement dominée par des espèces résistantes à la pollution (entre 62% et 69%) et près de 5% des spécimens examinés présentent des lésions, déformations, tumeurs et autres anomalies inhabituellement observées dans ces proportions. En 2007, on dénombrait 42 couvées de canards soit 0.8 couvées.ha⁻¹.an⁻¹, ce qui représente moins de 50% du potentiel du site [Michaud, 2008]. A l'heure actuelle, seule 10% de la superficie du milieu humide de la Baie de Lavallière constitue une zone d'habitat de qualité pour la sauvagine.

« Dans l'état actuel, le marais est voué à se remplir de matière organique et de sédiments et à se transformer rapidement en un milieu humide fermé, exempt d'une mosaïque d'habitats diversifiés. La baie de Lavallière perdrait alors de son potentiel filtrant et de sa valeur en tant qu'habitat diversifié et productif pour la sauvagine, les poissons et les autres groupes fauniques. »

[Foucrier et al., 2007]

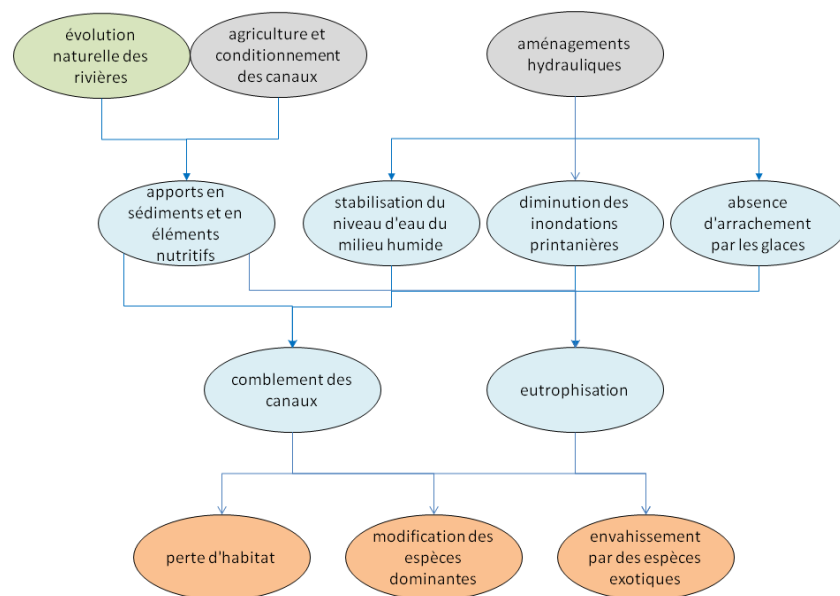


Figure 10 Schéma de l'évolution d'un cours d'eau suite à des modifications naturelle (en vert) et anthropique (en gris). En bleu : réponses hydrogéomorphologiques et biologiques; en rouge : conséquences sur la faune et la flore.
 Source : figure inspirée de MRNF et CIC, 2007

3/2. Des acteurs aux intérêts divergents

La Baie de Lavallière couvre un vaste territoire, essentiellement occupé par des exploitations agricoles. Elle englobe à elle seule les municipalités de Yamaska, Sorel-Tracy, Saint Robert, Saint-Aimé, Saint-Anne-de-Sorel, Sainte-Victoire-de-Sorel et Saint-Ours et est administrée par la MRC Pierre-de-Saurel. La Baie de Lavallière est donc un espace au sein duquel un grand nombre d'acteurs cohabitent et où les intérêts de chacun ne sont pas nécessairement en adéquations.

La présence du milieu humide en aval de la Baie à son importance. De part sa localisation, ce site classé écope de toute l'activité qui a lieu en amont. Or, l'intérêt écologique du site n'est plus à démontrer. Tout l'enjeu, pour les associations de protection de l'environnement, de conservation des milieux humides et des structures étatiques, au regard du statut de réserve mondiale de l'UNESCO et du bien commun, est de préserver ce site naturel dans les meilleures conditions possibles. Malgré leurs effets controversés, les aménagements réalisés jusqu'à aujourd'hui dans la zone humide tels que le dispositif de contrôle du niveau d'eau, la digue de retenue ou les installations fauniques, témoignent de l'implication de ces organismes. Implication tout à fait justifiée puisque leur intérêt est justement de préserver le milieu humide.

En revanche, soustraire un territoire de son bassin versant est illusoire, surtout lorsqu'il en draine la quasi totalité. Préserver le milieu humide de la Baie de Lavallière passe inévitablement par des actions en amont. Une modification du système de drainage et une diminution des intrants agricoles permettraient sans doute, d'améliorer la qualité de l'eau du réseau hydrique de la Baie. Une meilleure occupation des sols et une limitation des cultures à grands interlignes, augmenteraient la capacité d'infiltration en réduisant les transferts des champs au cours d'eau par le ruissellement de surface. L'aménagement d'un espace de mobilité et de bandes riveraines renforcerait la stabilité des berges. Une liste d'aménagements non exhaustive, mais qui témoigne de la

nécessité d'un changement de pratiques agricoles en aval de la zone humide. Or souvent, sur le plan financier, il est difficilement envisageable pour un exploitant agricole de changer de type de cultures ou même de léguer plusieurs dizaines de mètres carrés de terre. De plus, l'attachement à la terre et aux traditions, qui caractérise le milieu agricole ne facilite pas les changements de pratiques.

3/3. L'intégration des scientifiques et leurs rôles dans le projet

L'implication d'organismes scientifiques dans le projet remonte aux origines de l'exploitation de la Baie de Lavallière. Déjà dans les années 30, les grands travaux de drainage de la Baie ont été pilotés par des ingénieurs du Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries, et de l'Alimentation du Québec (MAPAQ). Ces travaux faisaient d'ailleurs déjà débat au sein de la communauté scientifique. En témoigne cette note d'un ingénieur civil, à propos de travaux de drainage similaire dans une rivière voisine, près de Plessisville: *«Au cas où ces travaux seront exécutés à la pelle mécanique dans cette partie de la rivière, je suis convaincu qu'il se produira des érosions aux côtés des berges telles, que dans quelques années, ces mêmes intéressés viendront nous demander de l'aide pour prévenir ces dégâts.»* [Correspondance personnelle de A.E. Larrivée, ingénieur civil, 1933].

Le déploiement de compétences et connaissances scientifiques constitue une ressource essentielle pour mener à bien le projet de préservation de la Baie de Lavallière. Projet dans lequel un grand nombre de processus d'origine naturelle et anthropique sont interconnectés. Dans le cadre d'une action concertée entre les différents intervenants et exploitants de la Baie, une expertise scientifique permet une meilleure compréhension des phénomènes qui sont en jeu. C'est un atout crucial pour cibler les principales problématiques de la Baie de Lavallière, ainsi que les zones d'actions prioritaires.

C'est donc dans cette optique que le Department of Geography, Planning and Environment de l'Université de Concordia et l'Institut de Recherche et Développement en Agroenvironnement (IRDA), se sont intégrés au projet de gestion intégrée de la Baie de Lavallière, l'IRDA pour les questions d'interactions entre les champs et les cours d'eau et l'Université de Concordia pour le volet concernant la géomorphologie fluviale. L'entreprise est également supportée par l'appui technique d'organismes de géomatique tels que Géomont, GéoBase ou Geogratix et l'expertise scientifique de CIC et des principaux acteurs gouvernementaux (MRC Pierre de Saurel, MRNF, MAPAQ).

4. Objectifs de l'étude

Dans une perspective de meilleure compréhension des phénomènes physiques en jeu dans le bassin de la Baie de Lavallière, l'étude présentée ici s'attaquera principalement au travail des cours d'eau sur leur environnement. Les effets de ruissellement, de transfert de sédiments et de pollution diffuse de la parcelle au réseau hydrique continuent de faire l'objet de travaux de la part des organismes partenaires tel que l'IRDA.

Au regard des observations de terrain et du Rapport de l'observatoire sur la qualité de l'eau de surface dans le bassin de la Baie de Lavallière, une conclusion importante a motivée la présente étude : la quantité très importante de matière en suspension

provenant du sous-bassin versant de la Petite rivière Pot-au-Beurre, deux fois supérieure à celle du bassin témoin de la Petite Bellevue.

L'objectif de l'étude est donc, dans la mesure du possible, de déterminer l'origine de ces sédiments. Pour parvenir à apporter des éléments de réponse quant à la contribution excessive de la Petite PaB dans la charge sédimentaire du réseau hydrique, plusieurs points seront étudiés.

1. Dresser un portrait hydrogéomorphologique des bassins de la Petite PaB et de la Petite Bellevue, puis remettre ces informations clefs dans le contexte général de la Baie de Lavallière;
2. Estimer la vitesse de migration des berges par l'analyse de données historiques;
3. Simuler le processus de re-méandrisation des sections linéarisées au cours du siècle dernier et dans un futur proche;
4. Évaluer la variabilité de la mobilité des berges selon plusieurs indices morphologiques;
5. Identifier, dans la Petite PaB, les zones les plus sensibles à l'érosion des berges.

II- Méthodologie

L'étude menée ici requiert une méthodologie particulière, qui fait l'objet de cette seconde section. Dans un premier temps, nous présenterons le site d'étude ainsi que le bassin versant de la Baie de Lavallière dans lequel il s'inscrit. Les trois approches employées feront l'objet d'une seconde partie. Nous nous pencherons ensuite sur l'utilisation des Systèmes d'Informations Géographiques dans l'étude hydrogéomorphologique d'un bassin versant. Enfin, nous dresserons un portrait des données que nous avons utilisées et nous évoquerons l'ensemble des post-traitements qui leur a été appliqué en vue d'obtenir nos résultats.

1. Le site d'étude, le bassin versant de la Petite rivière Pot-au-Beurre

1/ 1. Échelle globale de la Baie de Lavallière

L'étude s'inscrit dans un vaste projet de préservation de la Baie de Lavallière (Figure 11). Composée de 11 sous-bassins versants, elle s'étend sur 192.5 km². Elle couvre un ensemble de basses terres situées à 80 km au nord-est de Montréal (Montérégie), entre l'extrémité amont de l'archipel du Lac Saint-Pierre et le point de confluence de la rivière Yamaska avec le Lac Saint-Pierre. Le territoire fait partie de la plaine inondable du fleuve Saint-Laurent et de la rivière Yamaska (Foucrier *et al.*, 2007) et son relief est extrêmement plat. La Baie de Lavallière se situe en 46°04'N, -73°58'O.

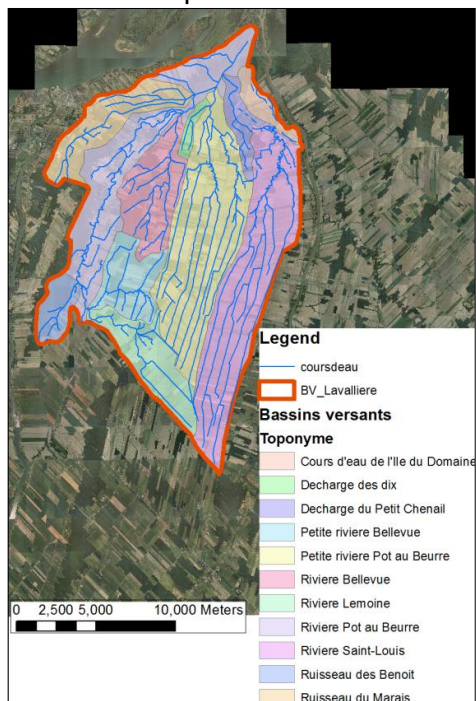


Figure 11 Baie de Lavallière

La Baie de Lavallière est composée d'environ 471.5 km de cours d'eau, dont la majeure partie se drainent dans le milieu humide situé avant l'embouchure de la Baie. Cette zone humide s'étend sur plus de 9 km². Soumise au régime hydrologique du Saint Laurent et de la Yamaska, elle est en grande partie inondée pendant les périodes de crues. L'importance des crues variant d'une année à l'autre, la superficie inondée peut évoluer et couvrir les terres agricoles les plus en aval.

D'un point de vue géologique et pédologique, cette région est âgée d'environ 450 millions d'années (Ordovicien Supérieur). Le sol de la région est principalement composé de sédiments marins et lacusto-marins¹⁹, tel que le loam²⁰. Différents événements, comme la création et le retrait de la mer de Champlain, sont à l'origine de ces dépôts [Bisson *et al.*, 2010].

¹⁹ Sédiments déposés lors de la formation des lacs a ont suivi le retrait de la mer de Champlain. Cette mer couvrait les basses terres du Saint Laurent après la dernière glaciation qui prit fin vers 7 000 av. J.C.

²⁰ Le loam est une classe texturale qui correspond au sols composés de moins de 52% de sable, de 28 à 50% de limon et de 7 à 27% d'argile.

1/2. Historique de la région

Depuis le siècle dernier, plusieurs dates ont marqué l'évolution de la Baie (Tableau 2). Au début du siècle dernier, le Québec a subi une importante vague de linéarisation des cours d'eau. Dans le but de donner une vocation agricole à la Baie de Lavallière, de nombreux fossés d'irrigation ont été transformés en cours d'eau. Ceci a permis d'améliorer le drainage de la région et l'évacuation des eaux de crues. Au cours des décennies suivantes, le marais en aval de la Baie s'est peu à peu asséché. En 1977, pour empêcher cette mort programmée du marais, le gouvernement provincial du Québec et Canards Illimités se portent acquéreurs de la zone humide. Une année seulement plus tard, les travaux de remise en eau commencent. Sont prévus un barrage, dispositif de contrôle du niveau d'eau dans la zone humide, et une digue de retenue. Après 5 ans de négociation avec les exploitants agricoles de la région, une côte géodésique de 5.2 m est fixée pour la hauteur d'eau. La mise en eau est effective en 1986. Depuis, plusieurs infrastructures visant à restaurer l'habitat de la sauvagine et la libre circulation des poissons tels que des îlots de nidification (1988), un exutoire de dévalaison et une passe migratoire (1994) [CIC, correspondance personnelle, 2012] ont été aménagés.

	Aménagements
1938	Linéarisation massive des cours d'eau et importants travaux de drainage dans la Pot-au-Beurre par le MAPAQ
1977	Acquisition de la Baie de Lavallière par le Ministère du Loisir, de la Chasse et de la Pêche
1978	Construction du barrage et de la digue à l'embouchure de la Baie avec la Yamaska → détermination du niveau opératoire à 5.2m
1986	Mise en opération
1988	Mise en place de 12 îlots de nidification pour la sauvagine
1994	Aménagement d'une passe migratoire au niveau du barrage par le Fonds de réhabilitation de l'habitat du poisson

Tableau 2 Historique des aménagements dans la Baie de Lavallière

1/3. Le site d'étude

Le site d'intervention est une partie du bassin versant de la Petite PaB, à 15 km à l'Est de la municipalité de Sorel-Traçy (Figure 12). D'une superficie totale de 58,5 km², le relief y est très plat. Le point culminant s'élève à 28.9 m et l'exutoire du bassin, répertorié dans le milieu humide, est à 4.6 m. Ce territoire comprend plus de 121 km de cours d'eau. Le bassin de la Petite PaB totalise 8 cours d'eau majeurs répartis dans deux branches. Les branches Est et Ouest se rejoignent en amont de la confluence de la Petite PaB avec le bassin versant voisin de la rivière Pot-au-Beurre. L'extrême aval de la branche Est, le bassin d'intervention, est équipé d'une station hydrométrique. Les sols du bassin versant de la Petite PaB sont généralement sablonneux en amont et argileux en aval [Sundborg, 2007].

Saint-Robert est la plus grande commune du bassin versant, dont la vocation principale est l'agriculture. En 2005, plus de 43.25 km² des terres sont dédiés à l'agriculture, soit près de 74% de la superficie totale du site. Les cultures de maïs, soja et les fourrages représentent à elles seules 79% des terres cultivées. Le maïs et le

soja, cultures intensives et à grands interlignes, sont reconnus comme facteurs de dégradation des sols, notamment en terme d'érosion [Patoine, 2010].

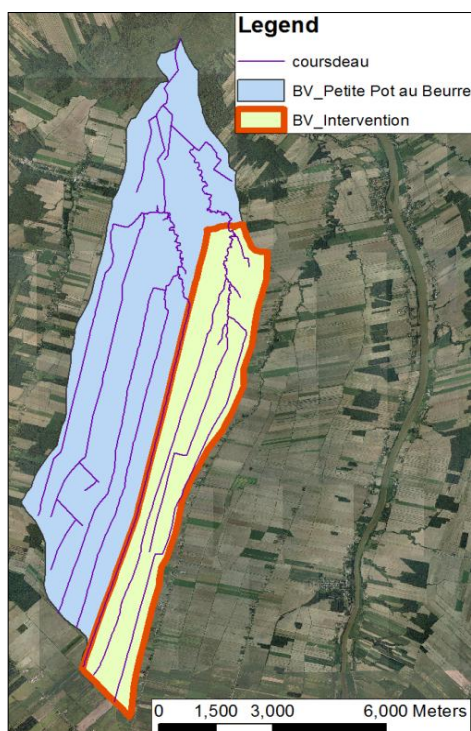


Figure 12 Localisation du bassin d'intervention

La MRC Pierre de Saurel, entité administrative de gestion des collectivités locales responsables du bassin versant, a également observé une augmentation significative de la taille des cheptels dans les exploitations depuis les années 1970. Or, une mauvaise gestion de l'entreposage des déjections animales et des épandages massifs de fumiers peuvent avoir un impact considérable sur la qualité des eaux [Bisson *et al.*, 2010].

Une rencontre sur le terrain avec les acteurs et exploitants locaux le 13 Avril 2012, a permis de se rendre compte de l'état des cours d'eau dans le bassin d'intervention. Cinq sites différents ont été visités (Figure 13). Parmi eux, le site 2 est la station hydrométrique et n'est donc pas répertorié dans le tableau synthèse (Tableau 3). Les 4 autres sites principaux sont des terrains agricoles. Plusieurs des photos prises lors de cette visite sont disponibles dans l'Annexe 3 et étayent les descriptions suivantes.

Le cours d'eau du site 1 est plus profond que dans les autres sections et la pente y est plus forte. Aucune entrave à la libre circulation de l'eau n'empêche les sédiments de poursuivre leur chemin vers des sections aval, où la pente est plus faible. D'importantes marques de décrochement de berges ont été constatées. Ces observations nous ont amené à émettre l'hypothèse, que ce site serait sujet à une régression de fond induite par des travaux de dragage en aval. La possibilité d'aménager des seuils dissipateurs comme moyen de lutte contre l'érosion a été évoquée. Le producteur pratique le travail minimum du sol afin de préserver l'environnement de l'impact de ses cultures. Le site 3 fait également l'objet d'une importante activité érosive. Il est situé dans une section de cours d'eau très méandreuse, où la pente est élevée et l'eau circule librement, ce qui refoule les sédiments vers l'aval. Le site a bénéficié d'un programme d'aide afin d'effectuer des travaux de stabilisation des berges par enrochement. Les sites n°4a et n°4b sont ceux qui sont situés le

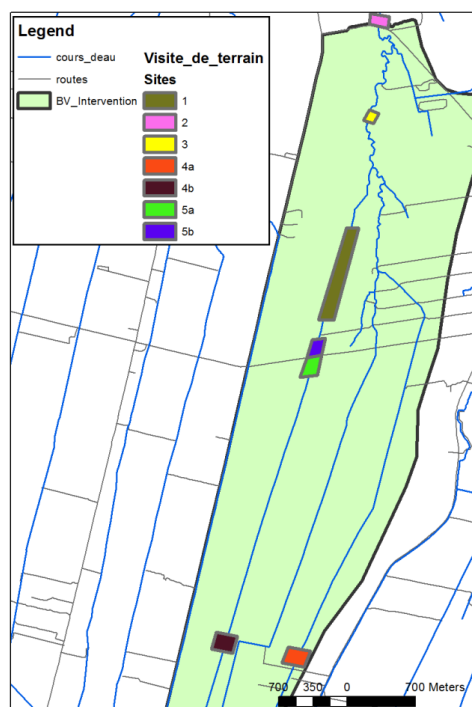


Figure 13 Sites visités dans le bassin d'intervention de la Branche Est de la Petite PaB lors de la visite du 13/04/2012

plus en amont. La pente y est très faible, l'obstruction du cours d'eau par la phragmite²¹ est très importante et les sédiments s'accumulent. Enfin, les sites 5a et 5b, coupés par la Route Principale, sont très différents. La partie amont (5a) est dominée par une pente faible et les végétaux s'y accumulent. À l'inverse, la partie aval (5b), très linéaire, possède une pente légèrement plus élevée et l'écoulement, en l'absence de végétation, cherche à recréer des méandres.

	Site 1	Site 3	Site 4		Site 5	
			4a	4b	5a	5b
Nom du cours d'eau	Branche 17	Branche 13	Branche 15	Branche 17	Branche 17	Branche 17
Allure du canal	linéaire	méandreuse	linéaire	linéaire	linéaire	linéaire
Type de culture	blé d'automne	maïs - soja	céréales - maïs - soja - maraichage		maïs	pois
Pente	élevée	élevée	faible		faible	modérée
État des berges	érodées	très érodées	non érodées		non érodées	faiblement érodées
Envahissement végétal	inexistant	inexistant	très important		important	très faible

Tableau 3 Synthèse descriptive des sites visités sur le terrain

1/ 4. Le bassin versant témoin de la Petite rivière Bellevue

Le sous-bassin de la Petite rivière Bellevue a été choisi comme bassin témoin (Figure 11) tout comme le bassin d'intervention de la Petite PaB, il se draine directement dans le bassin de la Pot-au-Beurre. Situé au sud-est de la commune de Saint-Robert, il couvre une zone de 16.1 km², dont le point le plus haut culmine à 27.3 m et l'exutoire à 14.5 m. Le bassin de la Petite Bellevue regroupe 24.82 km de cours d'eau au total et une rivière principale de 6.9 km. L'exutoire de la Petite Bellevue avec la Pot-au-Beurre est équipé d'une station hydrométrique.

Le territoire de la Petite Bellevue correspond à seulement 8% de la superficie totale de la Baie de Lavallière. Et comme le bassin de la Petite PaB, celui de la Petite Bellevue est un site hautement agricole. En effet, plus de la moitié des terres (58.5%) sont couvertes par des cultures et le maïs, le soja et le fourrage représentent 81% de celles-ci.

Le sous-bassin a été choisi comme témoin dans le cadre de l'Observatoire de la qualité de l'eau de surface en bassin versant agricole coordonné par l'IRDA et le MAPAQ. Les objectifs de ce projet sont de décrire, comprendre et prédire les transferts diffus de sédiments et de nutriments du champ au ruisseau, dans les bassins versants agricoles. Le choix du sous-bassin témoin a donc été motivé par un fort contraste avec le bassin d'intervention. Les terres boisées représentent 40% de la superficie du bassin témoin contre seulement 3% dans le bassin d'intervention. Un écart important est également observé pour les terres cultivées (74% pour la Petite PaB contre 58% pour la Petite Bellevue). Dans les deux cas en revanche, les différents types de cultures

²¹ La *Phragmite communite* est une espèce de roseau particulièrement envahissante et problématique dans le cas de la Baie de Lavallière.

(maïs, soja, céréales, fourrages) occupent les mêmes proportions. En terme de composition des sols, le bassin témoin a généralement une texture plus grossière (sable fin loameux) que le bassin de la Petite PaB (loam limono-argileux). La pente moyenne dans les deux bassins est sensiblement identique, reflétant la topographie très plane de la région [Michaud *et al.*, 2012].

La confluence du bassin de la Petite Bellevue avec la Pot-au-Beurre étant équipée d'une station de jaugeage, les données de débits liquide et solide sont accessibles. Malheureusement, le bassin témoin a été choisi dans le cadre de l'étude sur les transferts diffus de sédiments et, mise à part les données de débits, la Petite Bellevue n'a pas fait l'objet de campagne de mesure pour d'autres indices hydrogéomorphologiques. La physionomie de ce bassin est assez éloignée de celle du bassin d'intervention. Les cours d'eau certes peu méandreux, ne sont pas autant linéaires que dans le bassin de la Petite PaB qui possède des sections parfaitement droites de près de 6 km. La Petite Bellevue est moins étendue et élancée que la Petite PaB, comme en témoigne la Figure 11. Enfin, il y a aussi une différence dans l'occupation des sols et l'éloignement par rapport à la zone humide de la Baie et des aménagements hydrauliques qui y ont été faits.

Le bassin de la Petite Bellevue est donc utilisé en tant que bassin témoin en grande partie compte tenu du fait qu'il comprend une station hydrométrique à son exutoire. Sa faible contribution sédimentaire fait également de lui un bon élément de comparaison avec le bassin d'intervention.

Aussi, les données numériques acquises auprès des organismes partenaires²², nous offrent la possibilité de comparer les résultats obtenus pour la Petite PaB avec d'autres sous-bassins de la Baie de Lavallière.

2. Méthode mise en œuvre

2/ 1. D'un point de vue générale

Tout comme tenter de préserver la zone humide de la Baie de Lavallière sans l'inscrire dans son bassin versant est illusoire, il est essentiel de considérer le bassin d'intervention dans le bassin versant de la Baie de Lavallière.

C'est avec une notion d'inter-connectivité entre les sous-bassins versants que le portrait hydrogéomorphologique de la Petite PaB doit être dressé. Les résultats tels que la pente ou les profils d'élévation des cours d'eau, doivent être comparés aux mêmes types de données à l'échelle de la Baie. Ceci dans le but de déceler une singularité du bassin d'intervention susceptible d'expliquer sa contribution sédimentaire anormalement élevée.

Une échelle plus locale peut être adoptée pour cibler les zones particulièrement sensibles à l'érosion et simuler le processus de re-méandrisation. Ceci permettrait également de répondre aux besoins des exploitants agricoles de la région, engagés dans une lutte perpétuelle et coûteuse, contre l'érosion de leur terre. C'est en partie à cet effet que les informations récoltées lors de la visite de terrain ont été exploitées.

²² Cf. infra, II-4, page 23

2/2. Trois approches distinctes

Concrètement, trois types d'approches différentes et complémentaires seront utilisées dans cette étude. D'un certain point de vue, chacune de ces approches peut être associée à une période par rapport à l'époque actuelle : le passé, le présent et le futur.

Approche historique

Dans un premier temps, et comme les cours d'eau sont des systèmes qui s'ajustent constamment et sur des échelles de temps relativement grandes, une analyse de données historiques a été menée. Cette analyse se base essentiellement sur des clichés aériens réalisés au cours du siècle passé. L'historique des aménagements effectués dans la Baie de Lavallière nous a permis de comprendre que cette région a été pendant près d'un demi siècle, de 1930 et certainement avant, jusqu'à la fin des années 1980, le théâtre de modifications anthropiques lourdes, au regard des dimensions des bassins versants et des cours d'eau. L'analyse historique nous permet, dans une certaine mesure et compte tenu des données à notre disposition, d'appréhender l'ampleur de ces travaux et leur impact sur les cours d'eau. Un grand nombre d'études telles que celle menée par Gaillot (2007), montrent qu'une telle approche est fructueuse et même nécessaire dans la compréhension des phénomènes en jeu.

L'analyse des données historiques nous a permis d'obtenir les tracés des cours d'eau dans les bassins d'intervention et témoin. Ces données ont alors pu être superposées avec des données plus récentes et de même type, afin de déterminer l'amplitude de la migration des cours d'eau au cours du temps.

Analyse des données hydrogéomorphologiques

Cette approche pourrait s'assimiler à l'étude de l'activité actuelle des cours d'eau ou du moins, dans un passé très proche d'une décennie seulement. Elle repose essentiellement sur l'analyse des données hydrogéomorphologiques disponibles à partir des relevés LiDAR²³, telles que l'élévation et la pente des cours d'eau, leur largeur et leur débit. L'analyse et la cartographie de ces données, facilitées par les Systèmes d'Information Géographiques²³, nous permet de déceler les particularités du bassin d'intervention par rapport aux autres sous-bassins de la Baie de Lavallière. Ces résultats couvrent une étendue importante au sein de la Baie de Lavallière et leur validité a pu être confirmée par la comparaison avec les informations ponctuelles recueillies sur le terrain. C'est par cette approche qu'une cartographie des zones à fort potentiel érosif a pu être dressée.

Modélisation numérique à l'aide du modèle RVR Meander

Enfin, à partir de données extraites par les deux premières approches, une modélisation numérique a été menée à l'aide de RVR Meander, un modèle développé par R. Fernández, D. Motta, J.D. Abad, E.J. Langendoen, N. Oberg et M.H. Garcia en 2011. Basé sur une première version de RVR Meander (Abad et Garcia, 2006) et le logiciel CONCEPTS (Langendoen et Simon, 2008), cet outil a rendu possible l'obtention de tracés numériques des cours d'eau du bassin d'intervention (Annexe 1). Nous avons ainsi pu déterminer l'évolution des cours d'eau lors du siècle passé en l'absence de contraintes anthropiques et comparer les tracés numériques aux tracés réels. L'influence de certains paramètres hydrogéomorphologiques sur la migration des canaux a aussi été mise en avant, ainsi que l'amplitude latérale de migration des

²³ Cf. infra, II-3/ 1. , page 21

berges. Cette approche concerne un futur proche à l'échelle de la dynamique fluviale. À l'échelle humaine, elle fournit des informations de base, utiles aux acteurs locaux, sur le fait que, quoi qu'il arrive, un système fluvial sera toujours en mouvement.

Ce modèle numérique est un modèle analytique 2D, gouverné par le taux de migration R^* des berges. Une méthode a été mise au point par Ikeda *et al.*, 1981 afin de calculer ce taux de migration :

$$R^* = E_0(U_b^* - U_{ch}^*)$$

Cette méthode implique que le taux de migration R^* ($m.s^{-1}$), et donc l'érosion, est proportionnel à la différence entre la vitesse moyenne normale à une section et la vitesse moyenne proche de la berge. Le coefficient de migration sans dimension E_0 , est habituellement obtenu empiriquement par calibration du modèle sur les tracés historiques [Motta *et al.*, 2011]. C'est cette méthode que nous avons utilisée. Les autres données d'entrée de RVR Meander sont le débit liquide, la pente du cours d'eau, sa largeur, la taille des sédiments et le coefficient de Manning²⁴.

RVR Meander comporte néanmoins quelques limites. Il est basé sur un modèle purement linéaire, qui ne prend pas en compte les aléas climatiques et morphologiques. Le débit liquide et la largeur du cours d'eau sont des données d'entrée constantes, tout comme la pente. Il omet donc les brusques changements de section et les variations de débits. Enfin, il ne prend pas en compte l'évolution de la granulométrie des sédiments le long d'un cours d'eau [Motta, 2011]

3. Les systèmes d'Informations Géographiques (SIG) au service du diagnostic hydrogéomorphologique

3/ 1. La technologie LiDAR

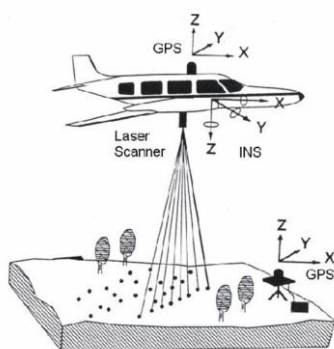


Figure 14 Schéma du fonctionnement d'une campagne de relevé LiDAR

Le LiDAR (Light Detection And Ranging) est une technologie qui permet la détection d'objet par l'intermédiaire d'un faisceau laser. Il fonctionne selon un principe équivalent à celui utilisé par les radars et est apparu avec l'invention du laser dans les années 1950. Il comporte un système chargé d'émettre un faisceau lumineux en direction de la surface étudiée (Figure 14). Le signal reçu en retour est transmis à une chaîne de traitement, qui calcule le temps de retour de l'onde et détermine l'altitude de l'objet rencontré au sol. L'appareil aéroporté est muni d'un système de positionnement GPS couplé avec un second GPS au sol et une centrale de navigation interne. Ces instruments permettent de connaître, à chaque instant, la position, la vitesse et les changements d'altitude de l'appareil et les données récoltées sont ajustées.

²⁴ Le coefficient de Manning représente la résistance au libre écoulement de l'eau dans une rivière. Il prend en compte de nombreux facteurs tels que les variations de section, le couvert végétal des berges, la sinuosité du cours d'eau, etc. Il est généralement déterminé grâce à des abaques de comparaison avec d'autres rivières.

Le résultat d'une campagne de relevés LiDAR correspond à une quantité relativement importante de données, qui dépend de l'étendue de la zone traitée. Le nombre de points par m² pouvant aller de 0.1 à 5. Un post-traitement d'interpolation permet de déterminer l'élévation et d'obtenir une grille régulière de points à partir des données brutes. Le résultat obtenu in fine est conditionné sous forme matricielle. On parle de Modèle Numérique de Terrain (MNT) si l'élévation ne tient pas compte du sursol (végétation et bâtiments) et de Modèle Numérique d'Altitude (MNA) dans le cas contraire. [Bilodeau, 2010]. La qualité d'un relevé LiDAR dépend de beaucoup de facteurs tels que la météo ou les besoins de l'étude. La précision planimétrique peut varier de plusieurs dizaines de mètres à seulement quelques centimètres et la précision altimétrique peut également être réduite à 5 cm voir moins.

3/2. Les Systèmes d'Informations Géographiques

Un grand nombre de définitions des SIG existe aujourd'hui. L'essentiel consiste à dire qu'un Système d'Informations Géographiques est un ensemble de logiciels, de procédures et d'outils de traitement, de visualisation, d'analyse et de modélisation de l'information géographique. Devenus populaires dans le milieu des années 80, les SIG permettent de localiser un objet (route, lac, centre commercial, etc...) ou un phénomène (pollution, vieillissement de population, etc...) et d'en déterminer la répartition spatiale sur l'étendue de la zone étudiée. Une analyse spatiale temporelle peut alors être menée, élucidant ainsi les relations qui existent entre les différents objets et phénomènes. La prédiction des événements à venir est aussi une force des SIG et permet d'appréhender les conséquences de tel ou tel scénario [Sanga et Dosso, 2007].

La plateforme de SIG utilisée dans la présente étude est la version 10 de la suite ArcGIS, développée par la société Esri.

3/3. Les types de données utilisées par les SIG

Un SIG ne serait rien sans les données de base qu'il manipule. Plusieurs types de données sont utilisés et toutes doivent être référencées spatialement et inscrites dans un système de coordonnées géoréférencées (WGS84 au niveau mondial, RGF93 pour la France, NAD83 pour le Canada, etc...). On parle de géoréférencement.

Les SIG exploitent deux grandes catégories de données :

- les données vectorielles , pouvant être des points, des lignes ou des polygones. Chaque objet est doté d'un identifiant qui lui est propre, avec ses principales caractéristiques (position, longueur, surface, etc...). Il peut être relié à une table attributaire, dans laquelle les informations utiles lui sont associées (Figure 15).

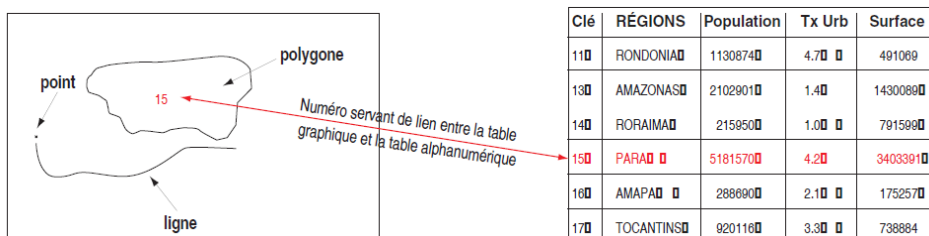


Figure 15 Traitement des données vectorielles dans un SIG
Source : Habert, 2000

- les données raster (ou matricielle) qui décomposent un terrain en un maillage régulier rectangulaire. Elles peuvent provenir d'images satellites, scannées ou

photographiques. Chaque cellule (ou pixel) possède une valeur unique. Un ensemble de pixel avec la même valeur représente alors un même objet (une forêt par exemple). La résolution spatiale d'un raster détermine la précision avec laquelle le réel est ainsi représenté (Figure 16).

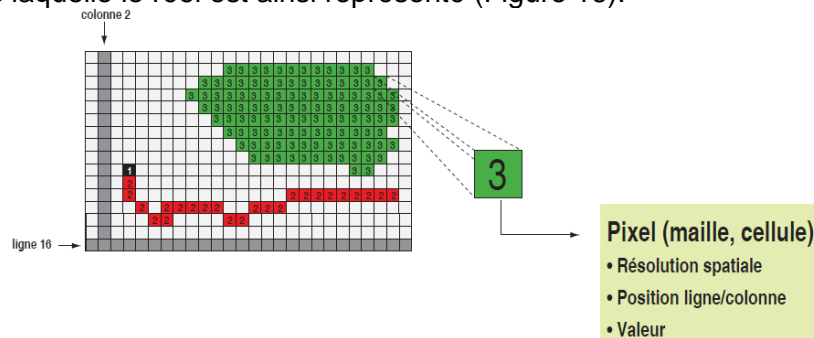


Figure 16 Traitement des données vectorielles dans un SIG
Source : Habert, 2000

3/ 4. SIG et l'étude hydrogéomorphologique

Les outils de traitement permettent un très grand nombre de manipulations de données. Il est possible, entre autres, d'effectuer des opérations booléennes ou arithmétiques entre plusieurs couches vectorielles ou matricielles. Sont également possibles des opérations plus élaborées, telles que la détermination des bassins versants dans un raster d'élévation (MNT), la mosaïque de plusieurs rasters, le lissage, ou l'interpolation de cellule²⁵.

Toute cette panoplie d'outils de traitement des données géographiques est un véritable atout dans l'élaboration d'un portrait hydrogéomorphologique du site d'étude. Par exemple, on peut aisément extraire le profil d'élévation le long des cours d'eau à partir d'un raster où chaque cellule correspond à l'élévation du terrain. L'exportation des données matricielles et vectorielles dans des formats de fichiers bruts (txt, ASCII) permet d'effectuer des traitements plus spécifiques à l'aide de scripts Python ou Fortran.

4. Données

4/ 1. Portrait des données historiques acquises

Plusieurs séries de photographies et d'orthophotographies²⁶ ont été récoltées dans le cadre du projet. Ce type de données a été utilisé dans la digitalisation des différents cours d'eau de la Baie et permet d'en étudier l'évolution [Wyżga, 1993]. Des orthophotos déjà géoréférencées interviennent également dans le processus de géoréférencement des photos classiques [Hugues *et al.*, 2006]. Un premier lot de 13 photos historiques non géoréférencées datant de 1935 a été acheté auprès de la Photothèque Nationale de l'Air du Canada. L'échelle de cette série est de 1:15000. L'institut de Géomatique Géomont a fourni des jeux d'orthophotographies datant de

²⁵ Cette liste, loin d'être exhaustive, fait référence à des opérations qui seront décrites dans la partie concernant le prétraitement des données LiDAR.

²⁶ Une orthophotographie se distingue d'une photographie aérienne classique dans le sens où elle a subi un post-traitement. Celui-ci permet de rectifier l'inclinaison de la prise de vue de telle sorte que la photographie semble être prise à la verticale de tous les points qui la composent.

1964, de 2003 et de 2008. La MRC Pierre de Saurel a également apporté sa contribution avec un lot datant de 2009.

Deux séries de plans datant de 1978 et de 1983 ont également pu être récoltées auprès de la MRC Pierre de Saurel. Y figurent des informations sur les profils longitudinaux, transversaux et sur les travaux de dragages effectués à ces dates là.

4/2. Stations de jaugeage et données hydrométriques

Comme il en a été fait mention plus haut²⁷, le site d'intervention et le bassin témoin sont tous deux équipés de stations de mesures. Ces deux dispositifs ont été installés sur le site en 2009. Chacun d'entre eux relève la hauteur d'eau ponctuelle du cours d'eau toute les 15 minutes et enregistre également la turbidité²⁸ et la conductivité électrique de l'eau. Les relevés hydrométriques sont assurés par une sonde à pression (limnimètre) qui mesure la hauteur d'eau. Une sonde acoustique est associée au limnimètre et mesure la vitesse du courant. Dans les cas de la Petite PaB et de la Petite Bellevue, des risques de refoulements au point de mesure ont été détectés. Un refoulement peut induire une hauteur d'eau supplémentaire qui n'est pas due à une hausse du débit. Ceci a motivé l'installation d'un courantomètre acoustique. Cet instrument permet de déterminer la vitesse et le sens de l'écoulement et de repérer tous refoulement. Une courbe de tarage permet alors d'ajuster la hauteur d'eau mesurée [Michaud *et al.*, 2012]

4/3. Portrait des données LiDAR

Les données altimétriques constituent le matériel de base pour la présente étude. Des relevés de trois années différentes ont été récoltés. Le tableau suivant dresse un portrait des principales caractéristiques de chacun d'entres-eux :

Années du relevé	Source	Résolution	Précision
2001	Environnement Canada	5m	planimétrique : Non communiquée altimétrique : ±0.15m
2007	IRDA	2m	planimétrique : Non communiquée altimétrique : ±0.15m
2008	Géomont	1m	planimétrique : ± 0.15m altimétrique : ±0.15m

Figure 17 Données LiDAR utilisées

Le relevé de 2001 nous a permis d'obtenir une couverture LiDAR pour la partie avale de la Baie de Lavallière, en particulier les sous-bassins versant de la Pot-au-Beurre et de la Bellevue. Quant au relevé de 2007 fourni par l'IRDA, il couvre parfaitement le bassin d'intervention. Enfin, celui de 2008 contient l'intégralité du sous-bassin de la Petite Bellevue et la quasi totalité de celui de la Petite PaB.

Suite à une rapide analyse des données du LiDAR 2008, d'importantes différences d'élévation ont été constatées par rapport au relevé de 2007. En moyenne, et sur les zones couvertes par les deux relevés, le LiDAR 2008 est surélevé de 0.307 m, avec un

²⁷ Cf. supra, II-1/ 3. , page 16 et II-1/ 4. , page 18

²⁸ La turbidité désigne l'opacité, le trouble de l'eau. C'est en fait "la mesure de la teneur en matériaux légers en suspension d'un cours d'eau" [Larousse, 2007]

maximum à 8.427 m et un minimum à -5.068 m. Ces observations ont été appuyées en comparant l'altitude donnée par les relevés avec celle de deux repères géodésiques effectués par Géobase. Des profils d'élévation ont également été tracés sur des portions de terrain supposés stables (routes) entre 2007 et 2008 (Figure 18). Ces observations ayant été confirmées par Géomont, l'intégralité du LiDAR 2008 a été abaissée de 0.307m.

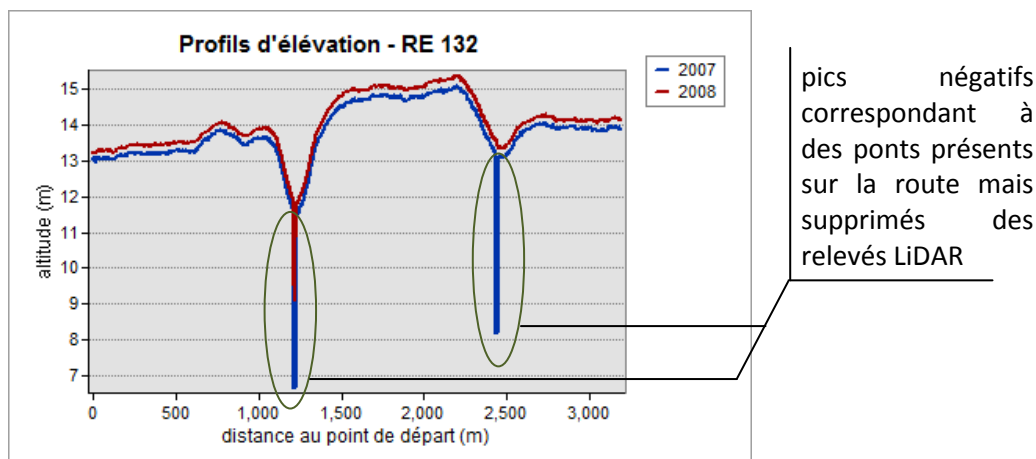


Figure 18 Profils d'élévation sur la route RE132 à hauteur de Picoudie pour les relevés LiDAR 2007 (en bleu) et 2008 (en rouge)

L'ensemble des données et tout particulièrement les données LiDAR, ont fait l'objet d'un grand nombre de prétraitement avant de pouvoir être utilisées dans le cadre de l'étude. La section suivante traite de ce travail précédent l'exploitation des données.

5. Prétraitement des données

Préalablement au traitement des données géographiques, il est indispensable de définir un système de coordonnées projetées dans lequel travailler. Un tel système permet de remettre l'information à l'échelle et de la replacer sur la surface terrestre. Compte tenu de l'étendue de la zone d'étude et de la précision escomptée des résultats (de l'ordre du mètre), il est nécessaire d'opter pour un système de projection géographique précis. Le Transverse universelle Mercator Modifié (MTM) a ainsi été choisi. Il découpe la surface terrestre en 240 fuseaux de 3 degrés et permet d'atténuer les déformations d'angles dues à l'aplanissement des données géographiques. C'est également le système de projection recommandé et utilisé par le MRNF. Le site de la Baie de Lavallière se trouve dans la zone 8 du système MTM.

5/ 1. Prétraitement des orthophotos

La seule étape de prétraitement des orthophotos est le géoréférencement. Il s'agit d'inscrire les images brutes dans le système de coordonnées projetées utilisé. Cela permet alors de superposer les différentes couches d'informations telles que les relevés LiDAR, les orthophotos, le tracé des routes, etc.

Géoréférencer une orthophoto requiert une orthophoto déjà géoréférencée. Il faut pour cela faire correspondre plusieurs points caractéristiques facilement identifiables (croisement de route, arbres, coin de champs ou de bâtiments, etc.) sur les deux orthophotos. Au minimum, 8 points de contrôle doivent être utilisés pour ne pas altérer

la qualité du géoréférencement. Hugues *et al.* (2006) ont montré que la nature précise ou grossière des points de contrôles n'est pas une source d'imprécisions majeures. Plusieurs méthodes d'interpolation permettent ensuite de réduire l'erreur en chacun des points de l'image par rapport à l'orthophoto de référence. L'interpolation polynomiale d'ordre 2 permet de réduire au maximum les erreurs radiales dues à la courbure terrestre, les erreurs géométriques induites par la topographie du terrain et la distorsion optique de la caméra [Hugues *et al.*, 2006]. Enfin, Hugues *et al.* (2006) recommande d'effectuer un ré-échantillonnage par convolution cubique afin de ré-homogénéiser la taille des pixels de l'orthophoto traitée.

Au final, seules les orthophotos de 1935 ont eu besoin d'être géoréférencées, les autres l'étant déjà. Ceci a été fait en prenant le jeu de 2009, le plus récent, comme référence. Malgré les importantes modifications subies par le terrain entre 1935 et 2009, une moyenne 18 points de contrôle par orthophotos a pu être utilisée. Conformément aux recommandations de Hugues *et al.*, 2006, ils se concentrent autant que faire se peut autour des zones d'intérêts que constituent les cours d'eau. Les valeurs moyennes de l'erreur quadratique²⁹ (RMS) entre les orthophotos géoréférencées de 1935, de 1964 et de 2009 ont pu être calculées. Ceci a été fait pour 5 tuiles³⁰ à partir de 28 nouveaux points de contrôles.

Année de référence	Erreur par rapport à l'année de référence (m)	
	1964	2009
RMS	2.471	3.419
erreur absolue selon l'axe x	1.806	2.044
erreur absolue selon l'axe y	1.262	2.344

Tableau 4 Erreurs induites par le géoréférencement des orthophotos de 1935 par rapport aux orthophotos de 1964 et 2009.

L'erreur ainsi obtenue reste élevée puisqu'elle est de l'ordre de la largeur des cours d'eau considérés dans le bassin d'intervention et le bassin témoin (de 1m à ~6 m). Malheureusement, les modifications évoquées ci-dessus, entre les paysages de 1935, 1964 et 2009, ne permettent pas de meilleurs résultats.

Il est également à noter que les orthophotos de 1964 présentait une erreur non négligeable par rapport aux données de 2009. La même analyse a donc été faite à partir de 8 tuiles (15 points de contrôles en moyenne par tuile), révélant une RMS de 3.629 m et des erreurs absolues selon l'axe x de 2.302 m et selon l'axe y de 2.350 m.

Bien que très difficilement réductibles, ces valeurs sont très utiles pour connaître la précision des données utilisées et interviennent directement dans l'extraction de certaines données clés (la vitesse de migration des méandres par exemple).

²⁹ Pour un point de contrôle (PC), la RMS est la distance qui le sépare du point correspondant sur l'orthophoto de référence : $RMS = [(x_{ref} - x_{PC})^2 + (y_{ref} - y_{PC})^2]^{1/2}$

³⁰ On parle de tuile pour désigner un fichier matriciel contenu dans un jeu de fichier. Dans ce cas, la tuile mentionnée est une orthophoto du jeu d'orthophotos de 1935. Il en est de même pour les données LiDAR. Un jeu de données étant composé de plusieurs centaines de tuiles.

5/2. Prétraitement des données hydrométriques

Les données hydrométriques recueillies par les stations de jaugeages et acquises auprès l'IRDA fournissent les lames d'eau³¹ journalière et toutes les 15 minutes aux deux points de mesure. Multipliées par les aires totales qui s'y drainent, que l'on extrait facilement à partir des relevés LiDAR, on obtient les débits correspondants. Ainsi, aux exutoires des bassins d'intervention et témoin, les débits moyens sont respectivement $0.228 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ et $0.221 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Des estimations des débits pleins bords³² peuvent être extraites des relevés de ces stations : $2.06 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pour la Petite PaB et $2.98 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pour la Petite Bellevue. Cependant, les mesures ont été prises entre le 1er Juin 2009 et le 31 Octobre 2011, soit à peine plus de 2 années. Les valeurs de ces débits pleins bords de récurrence 2 ans ne sont pas idéales.

5/3. Prétraitement des données LiDAR

Ré-échantillonnage

La première étape dans le prétraitement des données LiDAR consiste à obtenir des relevés de résolution identique. Augmenter la résolution d'un relevé revient à diviser un pixel de dimension $a \times a$ en plusieurs pixels de dimension $b \times b$ avec $b < a$. Cette méthode ne permet pas d'augmenter la précision du raster. À l'inverse, diminuer la résolution d'un relevé équivaut à agréger plusieurs pixels en un seul, de dimension supérieure. Étant donné la résolution et la couverture des LiDAR disponibles, la résolution retenue pour le traitement des données est de 2m.

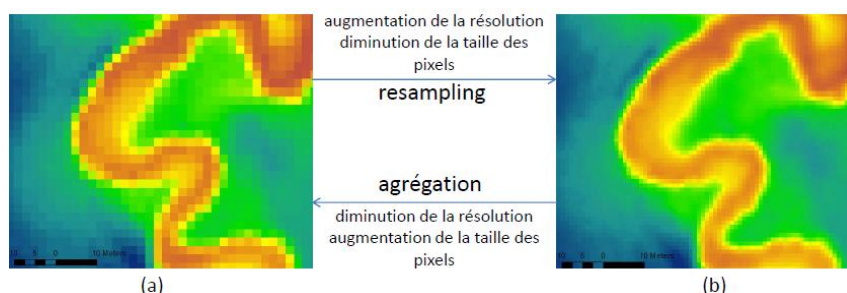


Figure 19 Ré-échantillonnage des données LiDAR, (a) : raster de résolution 2m, (b) : raster de résolution 1m.

Traitement des ponts et ponceaux

Dans le but d'obtenir l'élévation le long des différents cours d'eau de la zone d'étude, les relevés LiDAR doivent impérativement être nettoyés des ponts et ponceaux qui faussent les données altimétriques. Une observation attentive des LiDAR permet d'identifier ces surélévations de nature anthropiques. Leur présence est confirmée grâce aux différents jeux d'orthophotos.

³¹ La lame d'eau (en $\text{mm} \cdot \text{jr}^{-1}$) correspond à la hauteur d'eau précipitée en un point qui alimentera par la suite le cours d'eau. Cela exclue l'eau perdue par évaporation et infiltration en ce point.

³² Le débit plein bord correspond généralement au débit d'une crue de retour de 2ans.

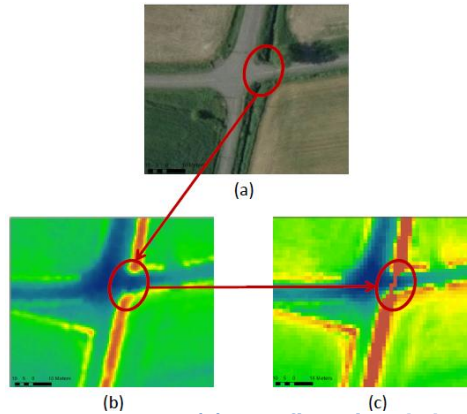


Figure 20 Process des ponts et ponceaux, (a) : confirmation de la présence d'un pont sur une orthophoto de 2009, (b) : visualisation du pont sur le relevé LiDAR, (c) : nouveau raster après élimination du pont

Le procédé d'élimination des obstacles consiste alors à tracer une ligne reliant les deux extrémités du cours d'eau, par dessus le pont. À cette ligne, on affecte la valeur de l'altitude la plus basse des deux extrémités. Cette ligne doit ensuite être convertie en raster de résolution identique à celle du LiDAR traité puis fusionnée avec le LiDAR (Figure 20).

Les relevés LiDAR 2001 et 2007 n'ont eu à subir que quelques modifications de ce genre, le traitement des ponts et ponceaux ayant été effectué avant leur acquisition. En revanche, le relevé de 2008 a dû être entièrement traité sur les sous-bassins de la Petite Bellevue et de la Petite PaB.

Interpolation IDW

Contrairement aux autres relevés, le LiDAR de 2001 possède un nombre important de cellules sans valeurs d'élévations (Figure 21(a)). Pour combler ces pixels vides, nous les avons interpolés par la méthode de pondération inverse à la distance³³ (Figure 21(b)). Chacun des points du raster se voit attribuer la valeur de la moyenne pondérée par la distance des points qui l'entourent. La densité de points composant la LiDAR étant très élevée, la valeur par défaut de 12 points utilisés pour l'interpolation a été choisie.

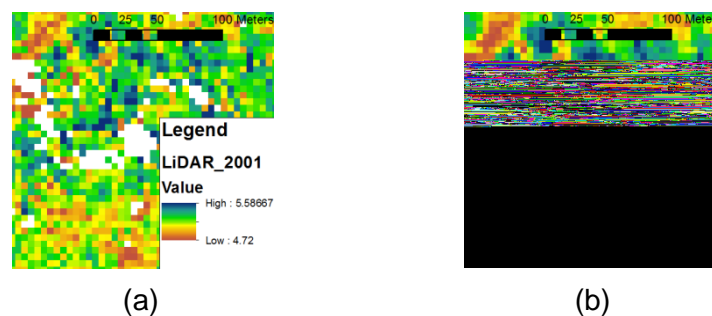


Figure 21 Interpolation des valeurs NoData du LiDAR 2001 par la méthode IDW. En (a) : relevé avant interpolation; en (b) : relevé après interpolation

Mosaïque de plusieurs LiDAR

Comme il en a été question plus haut³⁴, certains relevés LiDAR ne couvrent pas un bassin versant dans son ensemble. De plus, le logiciel de traitement des points

³³ Méthode IDW pour Inverse Distance Weighted

³⁴ Cf. supra, II-4/ 3. , page 24

altimétriques créé des zones très distordues, au relief irréaliste (Figure 22). Un traitement préalable des données LiDAR a donc été mis en œuvre pour compléter et corriger les données existantes.

L'IRDA nous a fourni les limites des sous-bassins versants de la Baie de Lavallière. Ces limites nous permettent d'identifier les zones manquantes dans un relevé LiDAR (Figure 23(a)). Un polygone de cette zone est alors créé afin de l'extraire à partir d'un autre relevé LiDAR (Figure 23(b)). Nous pouvons alors effectuer une mosaïque du LiDAR d'origine et de la zone manquante extraite. La méthode employée ici vise à atténuer le plus possible les éventuelles différences d'élévation qui peuvent exister entre les deux rasters à joindre. Ceci dans le but d'obtenir un relevé LiDAR final exploitable et le plus lisse possible. Pour ce faire, la zone manquante extraite empiète sur le raster à compléter (Figure 23(c)). La mosaïque est alors créée avec la méthode de pondération des valeurs des cellules dans la zone où les deux rasters se superposent (Figure 23(d)).

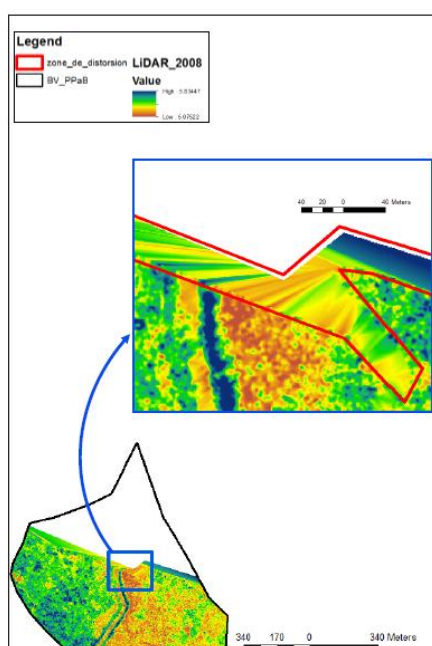


Figure 22 Zone de distorsion sur les bords du LiDAR 2008

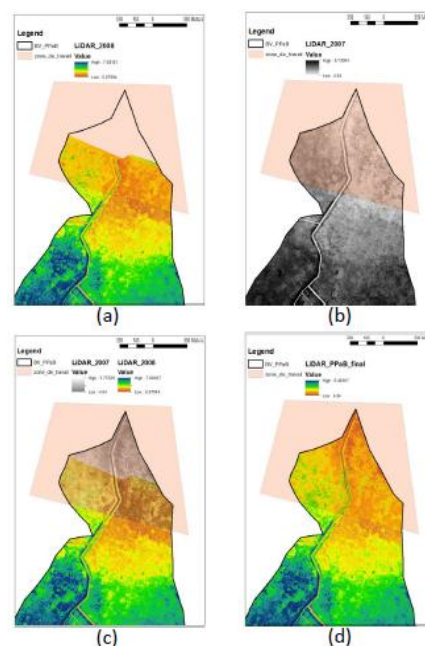


Figure 23 Mosaïque de plusieurs jeux de données LiDAR

Dans le but d'obtenir des couvertures altimétriques les plus récentes possibles, le relevé de 2008 a constitué une base de départ pour construire les rasters d'élévations des sous-bassins de la Baie de Lavallière.

Cette méthode de mosaïque a ainsi été mise en œuvre pour obtenir une couverture altimétrique du sous-bassin de la Petite PaB au complet, branche Ouest incluse. Au LiDAR 2008 ont été jointes des parties des relevés de 2001 et de 2007.

Il en est de même pour le sous-bassin principal de la Baie de Lavallière, celui de la Pot-au-Beurre, essentiel dans l'étude hydrogéomorphologique puisque la plupart des sous-bassins considérés se drainent dans celui-ci. Le raster d'élévation de la Pot-au-Beurre est donc une mosaïque des relevés de 2001 et 2008.

Le bassin d'intervention, la branche Est de la Petite PaB, est couvert entièrement par le LiDAR 2007. Cependant, les données de 2008 bien qu'incomplètes sont plus récentes. Le raster d'élévation du bassin d'intervention utilisé dans la présente étude est donc une mosaïque des LiDAR de 2007 et 2008.

Le bassin témoin de la Petite Bellevue et celui de la Bellevue sont quant à eux couverts parfaitement par le relevé de 2008.

Le Tableau 5 récapitule quels LiDAR ont été utilisés pour créer les relevés des sous-bassins d'intervention, témoin, de la Petite PaB au complet, de la Pot au Beurre et de la Bellevue.

	Sous-bassins versants				
	Bassin d'intervention branche est de Petite PaB	Bassin témoin de la Petite Bellevue	Petite PaB	Pot au Beurre	Bellevue
LiDAR 2001	X	X	✓	✓	X
LiDAR 2007	✓	X	✓	X	X
LiDAR 2008	✓	✓	✓	✓	✓

Tableau 5 Utilisation des relevés LiDAR disponibles pour créer les rasters d'élévation des sous-bassins versants considérés

L'ensemble du processus du prétraitement des données LiDAR est résumé dans la Figure 24.

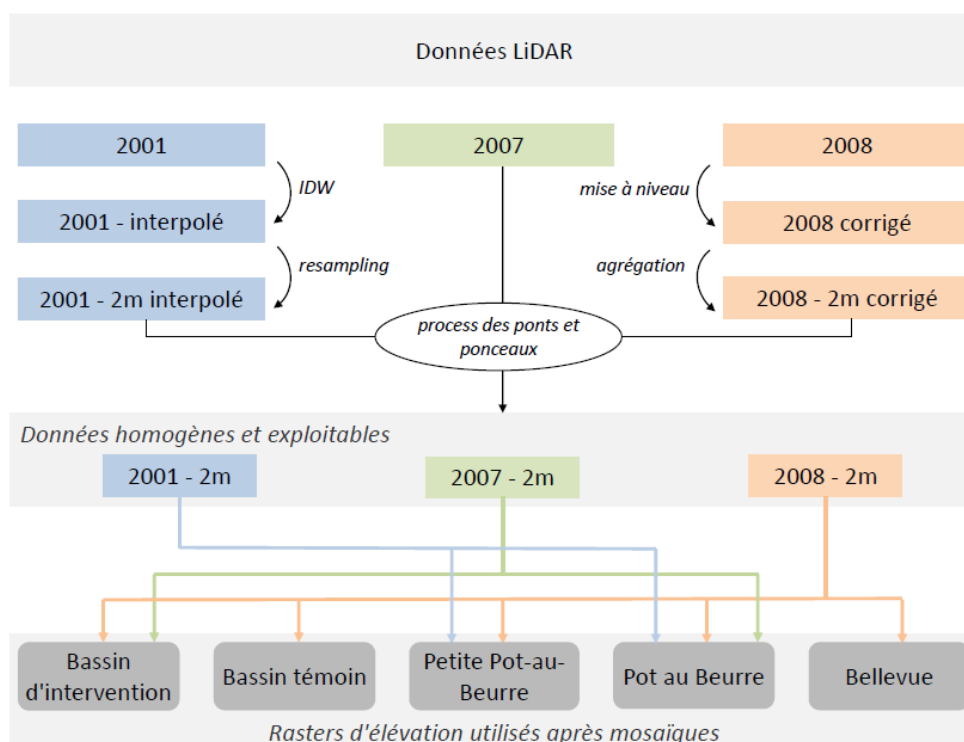


Figure 24 Processus de prétraitement des données LiDAR disponibles

III- Résultats et analyses

La présente section est consacrée à la présentation des résultats. L'ensemble de la méthodologie décrite ci-dessus a été menée afin de pouvoir mettre en œuvre les trois approches énoncées plus haut³⁵. Dans un ordre chronologique logique, nous aborderons l'étude des données historiques, l'analyse des données hydrogéomorphologiques et la modélisation numérique à l'aide du modèle RVR Meander.

1. Évolution historique du lit des cours d'eau

1/1. Évolution de la proportion de zones méandreuses

À partir des orthophotographies aériennes, il a été possible de digitaliser manuellement les lignes moyennes des lits des cours d'eau en 1935, 1964 et 2009. Compte tenu des sursauts dus à la numérisation manuelle, un très léger lissage a été effectué sur les profils. Une marge d'erreur égale à 5% de la largeur photo-interprétée du chenal a tout de même été introduite [Micheli *et al.*, 2004]. L'erreur totale qui comprend l'erreur de digitalisation et de géoréférencement peut ainsi être estimée lors de l'étude d'un tronçon.

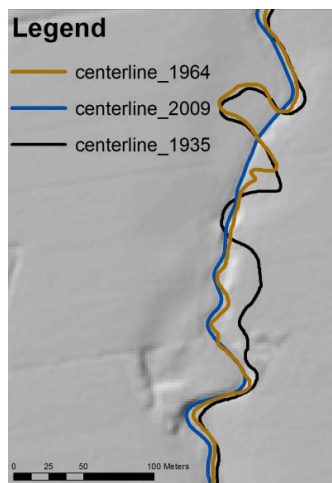


Figure 25 Visualisation de la linéarisation à partir des lignes moyennes digitalisées. En noir, le profil de 1935, en marron, 1964 et en bleu, 2009

Ainsi, grâce à ces tracés, nous avons pu facilement identifier les sections de cours d'eau qui ont été linéarisées entre 1935 et 2009 (Figure 25).

Au total, on constate que déjà en 1935, 67.4% des cours d'eau étaient linéarisés dans le bassin de Petite PaB. Clairement, le processus de linéarisation massive avait déjà été entamé. Entre 1935 et 2009, on observe une baisse significative de la proportion de zones méandreuses avec des diminutions de 32.7% pour la période 1935-1964 et de 21.9% entre 1964 et 2009. Ainsi, pour toute la période étudiée, près de 47.5% des cours d'eau de la Petite PaB ont été linéarisés. Dans la seule zone couverte par le bassin d'intervention, cette chenalisation touche 59.1% des cours d'eau.

Concernant le bassin témoin, nous ne pouvons pas statuer sur l'évolution de la proportion des zones méandreuses avant 1964. Nous ne disposons d'aucun jeu d'orthophotographies de 1935 couvrant cette zone. En revanche, les orthophotos de 1964 indiquent clairement que la quasi-totalité des cours d'eau étaient déjà linéarisée. Aucune évolution notable du lit des cours d'eau n'a eu lieu jusqu'à aujourd'hui. Ceci s'explique sans doute par la vocation essentiellement agricole des terres, dès 1964. Il est ainsi très probable que les cours d'eau, déjà linéarisés à cette époque, aient été contraints jusqu'à aujourd'hui.

Ainsi, malgré la proximité et les similitudes entre les deux bassins, il semble que le sous-bassin de la Petite PaB, et plus particulièrement le bassin d'intervention, aient subi davantage de modifications au cours des dernières décennies que le bassin témoin.

³⁵ Cf. supra, II-2/ 2. , page 19

1/2. Détermination de la vitesse de migration des berges

La vitesse de migration des berges représente le degré de mobilité d'un canal et a donc un rapport direct avec l'apport de sédiments par érosion des berges dans le réseau hydrique. Une fois tous les tracés des cours d'eau disponibles, nous avons déterminé empiriquement la vitesse de migration en s'inspirant de la méthode mise en œuvre par Micheli *et al.* (2004).

L'objectif ici est de caractériser la vitesse de migration pour les bassins témoin et d'intervention. Les sections linéarisées ne présentent alors plus grand intérêt, étant donné les contraintes anthropiques qui les stabilisent. Nous avons donc sélectionné des tronçons ayant eu une évolution naturelle significative entre 1935 et 2009. Les lignes moyennes à différentes années sont superposées et nous pouvons extraire des polygones correspondant aux aires de migrations des canaux (Figure 26(a)). La migration est alors calculée (Figure 26(b)) et, rapportée au nombre d'années qui séparent les deux lignes moyennes, nous obtenons une estimation de la vitesse de migration. Dans ce processus, nous avons tenu compte de l'erreur commise lors du géoréférencement des orthophotos et de la digitalisation des cours d'eau. Cette erreur fait office de seuil de tolérance et toutes les aires de migration dont la vitesse de migration est inférieure à ce seuil sont écartées. De plus, celles induites par une linéarisation du canal ou par une fermeture de boucle de méandre ne sont pas prises en compte (Figure 26 (a)).

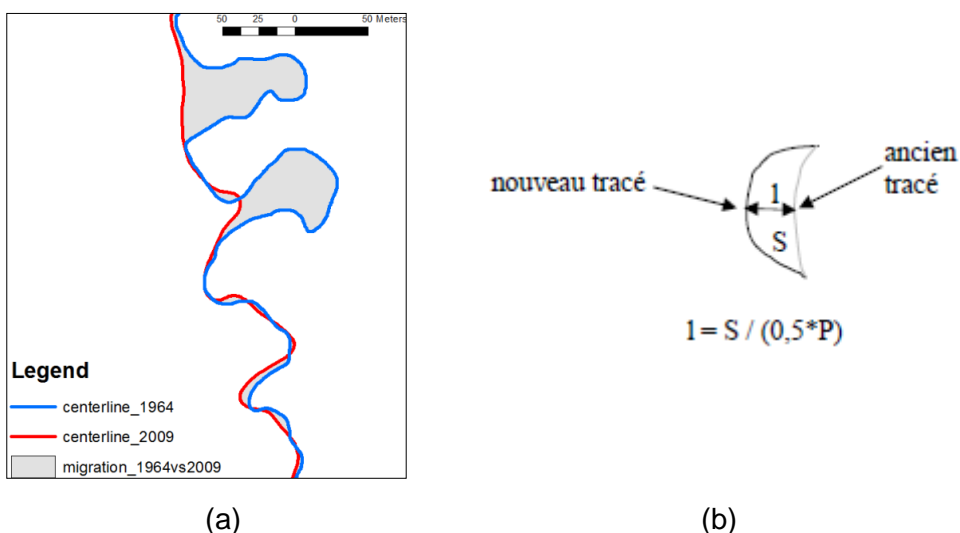


Figure 26 Processus de détermination de la vitesse de migration des berges, (a) : migration du cours d'eau à partir des lignes moyennes de 1964 et 2009, (b) : calcul de la migration de berge comme le rapport de l'aire du polygone sur son demi-périmètre. Source : Gaillot, 2007

Dans le bassin d'intervention, une longueur de 3601 m de cours d'eau a été étudiée. Il s'agit de la zone la plus méandreuse du site. Au total, 23.2% des polygones de migrations sont d'origine naturelle et dépassent le seuil de tolérance imposé. La vitesse moyenne de migration³⁶ est donc de 0.147 m.an⁻¹. Quant au bassin de la Petite Bellevue, sur presque 18 km de cours d'eau, seulement 2% des polygones ont pu être utilisés. La vitesse de migration correspondante est de 0.0986 m.an⁻¹, soit un tiers en dessous de celle de la branche Est de la Petite PaB.

³⁶ La vitesse de migration du site est la moyenne des vitesses de migration de chaque polygone retenu, calculée entre 1935 et 1964, 1964 et 2009 et 1935 et 2009.

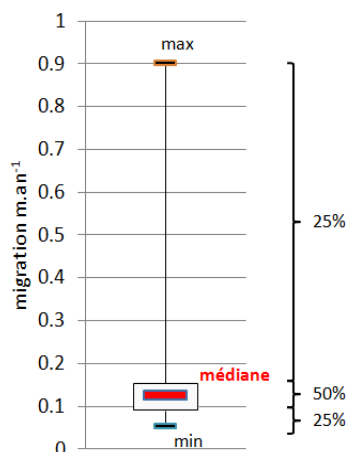


Figure 27 Distribution de la vitesse de migration dans le bassin de la Petite PaB

La répartition des vitesses de migration associée aux polygones de migration est très étendue (Figure 27). Bien que la méthode employée soit empirique et sujette à des imprécisions, une marge d'erreur a été appliquée. Cette distribution témoigne de la disparité qu'il peut y avoir dans la mobilité du lit des cours d'eau en fonction du lieu considéré. Un nombre très important de paramètres a un rôle dans cette migration, tels que la structure des bandes riveraines, la granulométrie des berges, le type d'utilisation des sols ou les variables hydrogéomorphologiques.

Ces résultats témoignent malgré tout d'une différence notable entre le bassin d'intervention et le bassin témoin. Enfin, les valeurs de vitesse de migrations rejoignent celles obtenues dans la basse vallée de la Bruche [Gaillot, 2007]. Les valeurs de vitesse de

migrations ont été utilisées pour caler la simulation numérique à l'aide du modèle RVR Meander³⁷.

1/3. Impact du dragage sur la régression de fond

Les plans des profils des cours d'eau et des travaux de dragage des années 1978 et 1983 fournis par la MRC Pierre de Saurel, nous ont permis de cartographier les zones de dragages dans le bassin de la Petite PaB (Figure 28). Nous avons ainsi pu vérifier la validité de l'hypothèse de régression de fond générée par le dragage de ces années là. Pour obtenir un ordre de grandeur de la vitesse de progression de cette éventuelle régression de fond, nous avons considéré la plus courte distance entre la zone draguée et un site marqué par l'érosion. Cette distance est d'environ 4906 m. Ramené au nombre d'années qui nous séparent de l'exécution des travaux, ceci impliquerait une régression de fond de l'ordre de 140 m.an⁻¹. Cette valeur anormalement élevée³⁸ nous permet d'écarter l'hypothèse de régression de fond.

Malgré tout, cette carte nous renseigne sur le fait que 7016 m de cours d'eau du bassin d'intervention ont été dragués entre 1978 et 1983, soit près de 18% des cours d'eau. La profondeur de creusage varie de 0.096 m à 1.008 m. Il est également à noter que d'autres travaux ont été effectués à la même période en aval du bassin d'intervention sur une longueur de 9150 m pour une profondeur de 0.232 m à 1.08 m. Ces aménagements lourds ont inévitablement eu des effets sur les cours d'eau.

Enfin, les importants travaux de drainages des années 1930, mentionnés à maintes reprises dans la littérature et les historiques des aménagements de la Baie de Lavallière ont peut être encore un impact sur les cours d'eau aujourd'hui. Malheureusement, aucune donnée authentique et exploitable sur ces travaux passés n'a pu être acquise. Il ne nous est donc pas possible de statuer sur l'hypothèse de régression de fond induite par les travaux des années 1930.

³⁷ Cf. infra III-3/ 1. , page 41

³⁸ L'érosion régressive du fond des cours d'eau est généralement de l'ordre du mètre par année, voire de la dizaine de mètres.

Bien que freiné par la difficulté à obtenir des informations sur la région, antérieures à 1964, l'étude historique nous a permis d'obtenir des informations intéressantes sur l'évolution des cours d'eau dans la Baie de Lavallière au cours du siècle passé. Ainsi, il apparaît clairement une différence entre le bassin d'intervention et celui de la Petite Bellevue. La charge sédimentaire excessive du premier est confirmée par une vitesse de migration supérieure à celle du dans le bassin témoin et il semble également avoir été plus modifié par l'homme depuis 1964. Si une hypothétique régression de fond, induite par le curage des années 1978-1983, a pu être écartée, l'hypothèse de régression de fond induite par les travaux de drainage des années 1930 n'a pas pu être vérifiée.

Nous allons maintenant entamer la deuxième approche de l'étude et nous pencher sur les paramètres hydrogéomorphologiques, tels que la pente et la puissance hydraulique. L'objectif principal est ici de trouver une variable représentative de l'état d'érosion des berges. Le cheminement logique consiste à analyser dans un premier temps l'élévation des cours d'eau grâce à laquelle leur pente peut être cartographiée. Il est ensuite possible d'accéder à la puissance hydraulique.

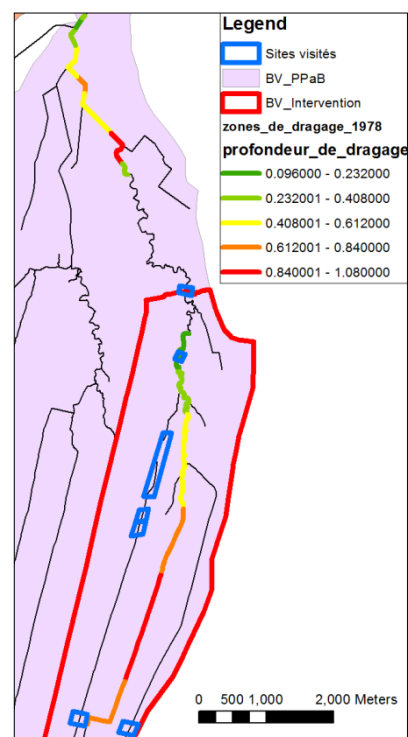


Figure 28 Zones de dragage entre les années 1978 et 1983

2. Portrait hydrogéomorphologique

2/ 1. Profils d'élévation

À partir des données LiDAR, il est possible d'obtenir le tracé des différents cours d'eau de la Baie de Lavallière (Annexe 1) ainsi que leurs profils longitudinaux. Nous avons donc pu comparer ces profils entre eux et observer les différences qui existent avec un profil concave type d'un cours d'eau à l'équilibre³⁹.

La Figure 29 laisse apparaître une particularité dans les profils longitudinaux des cours d'eau du bassin d'intervention. Bien que les trois cours d'eau principaux, les branches 13, 15 et 17, aient tous un profil similaire, on remarque que ceux-ci semblent composés de deux parties distinctes. La première, de l'extrême aval du sous-bassin à la jonction entre les branches 13 et 17, a un profil concave très proche d'un profil d'équilibre théorique. La seconde, en revanche, située entre la jonction 13 et 17 et l'amont des trois cours d'eau, a clairement un profil convexe. L'allure de ces profils longitudinaux traduit un réel déséquilibre dans les cours d'eau du bassin d'intervention. L'évolution naturelle des rivières amènera irrémédiablement les cours d'eau vers un profil concave d'équilibre par une érosion des berges et du fond.

³⁹ Cf. supra, I-2/ 1. , page 6

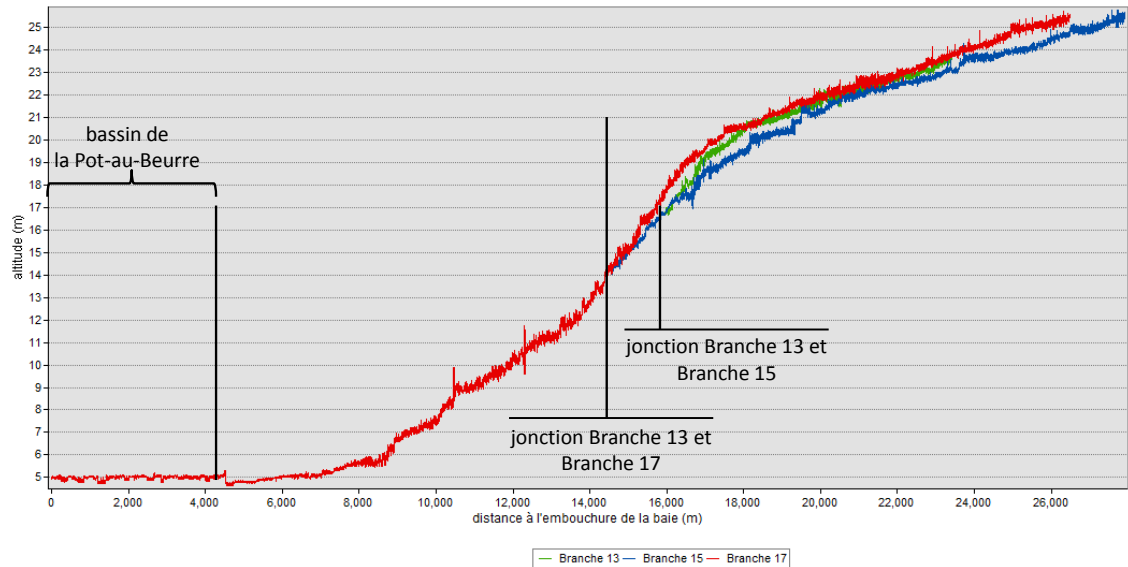
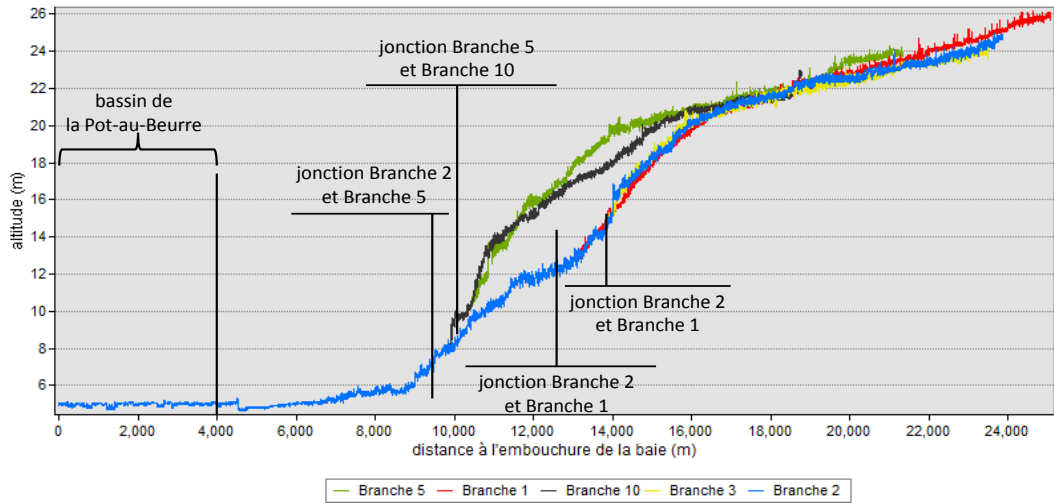


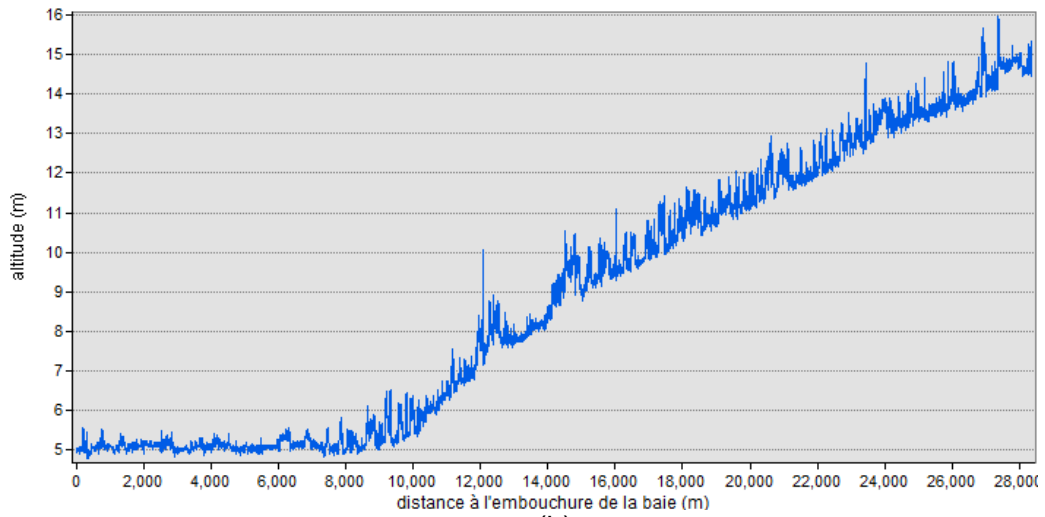
Figure 29 Profils longitudinaux dans le bassin d'intervention réalisés à partir des LiDAR de 2007 et 2008

Lorsque l'on compare ces profils à ceux des cours d'eau de la branche Ouest du bassin de la Petite PaB (Figure 30 (a)), on retrouve les mêmes déséquilibres. Le caractère convexe des profils est encore plus marqué dans les branches 5 et 10. Dans le sous-bassin principal de la Pot-au-Beurre, le profil de la Première rivière Pot-au-Beurre n'est pas convexe mais le problème est différent (Figure 30 (b)). Le profil en aval a été entièrement conditionné par les travaux de dragages réalisés dans le passé. L'étendue de la partie plate du profil en aval de la Première rivière Pot-au-Beurre, jusqu'à 7500 m de l'embouchure de la Baie, correspond à la fin de la zone de servitude d'inondation et se situe dans la zone humide de la Baie de Lavallière. Le reste du profil est quant à lui très linéaire et ne présente pas une allure concave ou convexe, comme dans le sous-bassin de la Petite PaB. Cette observation a également été faite dans le cas du bassin témoin de la Petite Bellevue (Figure 30 (c)) et témoigne aussi du déséquilibre des cours d'eau.

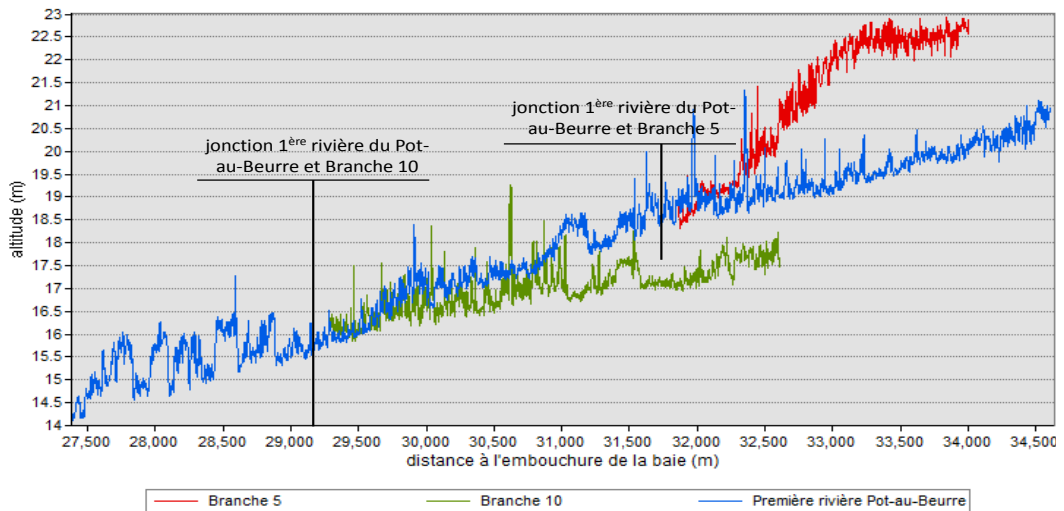
Ces profils d'élévation nous permettent de faire une conclusion importante sur l'état des cours dans l'ensemble de la Baie de Lavallière. L'importance de la charge sédimentaire observée dans le sous-bassin d'intervention peut être perçue comme un indicateur du déséquilibre de ces cours d'eau. Cependant, l'allure générale des profils longitudinaux laissent à penser que les cours d'eau des sous-bassin de la branche Ouest de la Petite PaB, de la Pot-au-Beurre et de la Petite Bellevue sont également en déséquilibre. L'excédent de sédiments dans la branche Est de la Petite PaB est peut-être une réponse spécifique à ce sous-bassin, compte tenu de facteur tel que la composition du sol ou la géomorphologie. À ce stade, il serait intéressant d'effectuer une campagne de mesure de la charge sédimentaire de tous les sous-bassins de la Baie de Lavallière.



(a)



(b)



(c)

Figure 30 (a) profils longitudinaux dans la branche Ouest du bassin de la Petite PaB; (b) profil longitudinal dans le bassin de la Pot-au-Beurre; (c) profils longitudinaux dans bassin témoin

2/2. Analyse de la pente des cours d'eau

La pente S des cours d'eau est également une variable hydrogéomorphologique importante. La précision de la technologie LiDAR permet d'avoir accès à cette information. Le processus d'extraction de la pente à partir des relevés altimétriques est décrit dans l'Annexe 2. Chaque cellule d'un cours d'eau étant dotée d'une pente spécifique, représenter la variable S sous forme graphique ne permet pas une bonne visualisation. Le plus représentatif est soit de cartographier la pente, soit de considérer directement la pente moyenne \bar{S} pour un sous-bassin, un cours d'eau ou un tronçon de cours d'eau.

La cartographie de la pente a été effectuée dans les bassins d'intervention et témoin, ainsi que dans ceux de la Pot-au-Beurre et de la Bellevue (Figure 31). À partir de cette cartographie, nous avons observé deux choses. Premièrement, lorsque l'on s'intéresse à la distribution générale de la pente dans la zone traitée, le bassin d'intervention ne semble pas se distinguer. Ceci est confirmé par la valeur des pentes moyennes (Tableau 6) : la pente moyenne varie de 0.088% à 0.1771% et celle du bassin d'intervention est égale à 0.0916%. Le bassin témoin quant à lui a la pente moyenne la plus faible avec 0.088%.

	S_{min} (%)	\bar{S} (%)	S_{max} (%)
Bellevue	-0.9817	0.1771	2.2682
Petite PaB	-0.4195	0.1016	1.2563
Pot-au-Beurre	-0.831	0.0936	1.1004
Intervention	-0.4195	0.0916	0.7042
Petite Bellevue	-0.295	0.088	0.7192

Tableau 6 Valeurs de la pente dans les sous-bassins de Baie de Lavallière

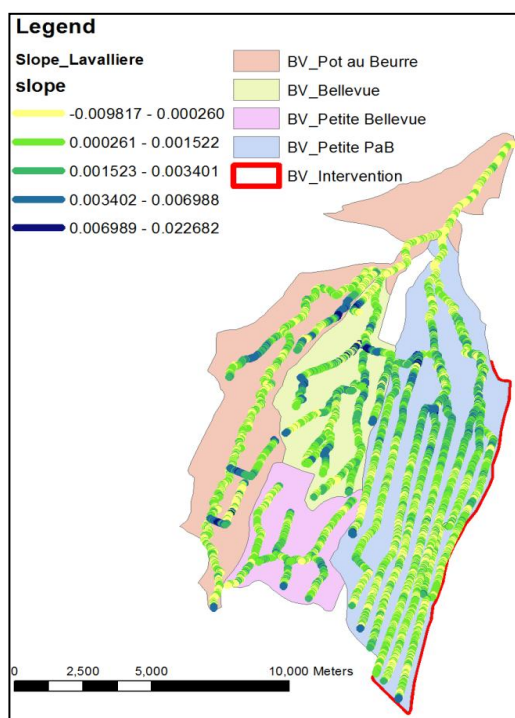


Figure 31 Cartographie de la pente dans la Baie de Lavallière

Enfin deuxièmement, une analyse plus ciblée de la pente dans le bassin d'intervention a été faite. Cette fois, il apparaît clairement qu'une zone se dégage dans la partie méandreuse et en amont de celle-ci. Les valeurs de S correspondantes y sont les plus élevées de tout le bassin d'intervention. Nous avons constaté certaines corrélations entre les valeurs de S et les observations faites sur le terrain.

Les sites visités 1 et 3, répertoriés comme étant sujet à une érosion des berges importantes, révèlent une pente moyenne \bar{S} supérieure à celle de l'ensemble du bassin d'intervention (Tableau 7). À l'inverse, les sites 4a et 4b, pour lesquelles aucune activité érosive n'a été constatée, ont des valeurs de \bar{S} inférieures à celle du bassin d'intervention. Cependant, malgré une relation apparente entre la valeur de la pente et l'état des berges dans les canaux, les sites 5a et 5b ne semblent pas suivre la même logique. Dans ces deux sites voisins

mais différents du point de vue hydromorphologique⁴⁰, on pourrait s'attendre à ce que la pente diffère. Or, les valeurs moyennes de la pente sont très proches (0.1466% pour le site 5a et 0.1313% pour le site 4b). Aussi, bien que le site 5a ne présente pas de marques d'érosion non plus, la valeur de \bar{S} y est bien supérieure à celle observée dans les sites 4a et 4b.

	S_{min} (%)	\bar{S} (%)	S_{max} (%)	État des berges
Site 1	-0.1041	0.2433	0.4962	érodées
Site 3	-0.0462	0.2145	0.5242	très érodées
Site 4a	-0.0371	0.0739	0.2187	non érodées
Site 4b	-0.0963	0.0602	0.2464	non érodées
Site 5a	-0.0056	0.1466	0.2762	non érodées
Site 5b	-0.0339	0.1313	0.3556	faiblement érodées

Tableau 7 Valeurs de la pente moyenne \bar{S} observées dans les sites visités sur le terrain

La pente du cours d'eau n'apparaît donc pas comme un indicateur fiable pour statuer sur l'état des berges. Cette seule donnée géomorphologique ne suffit pas. La partie suivante traite le cas de la puissance hydraulique, variable hydrogéomorphologique prenant également en compte le débit des cours d'eau.

2/3. La puissance hydraulique à l'échelle de la Baie

À partir des données désormais disponibles, une cartographie de la puissance hydraulique a pu être élaborée. La puissance hydraulique Ω est une variable hydrogéomorphologique largement utilisée dans les domaines de la dynamique et de la gestion des rivières [Jordan et Fonstad, 2008; Ferencevic et Ashmore, 2012] et notamment, pour les applications au transport de sédiments [Prosser et Rustomji, 2000; Ali *et al.*, 2011]. Elle correspond au taux de dissipation de l'énergie d'un écoulement dans un lit de rivière et combine à la fois le débit plein bord Q_{bf} de l'écoulement et la pente S du cours d'eau (équation(1)).

$$\Omega = \gamma Q_{bf} S \quad (1)$$

La puissance hydraulique s'exprime en $W.m^{-1}$. Le poids spécifique γ de l'eau, en $N.m^{-3}$, est égal à 9180 N. Le débit plein bord et la pente s'exprime respectivement en $m^3.s^{-1}$ et en $m.m^{-1}$. Si la largeur du cours d'eau est disponible, on peut alors calculer la puissance hydraulique spécifique ω (équation(2)) en $W.m^{-2}$. Cette variable présente l'avantage de s'affranchir du poids grandissant de Q_{bf} vers l'aval, en considérant l'élargissement du cours d'eau. Elle est plus adaptée pour l'étude de l'évolution du tracé des rivières induite par l'érosion du lit [Jordan et Fonstad, 2008]. La question ici est de savoir si dans le cas du bassin d'intervention, ω constitue un bon indicateur de la mobilité des rivières ou non.

$$\omega = \frac{\Omega}{w} \quad (2)$$

Réaliser une cartographie de la puissance hydraulique spécifique requiert donc une digitalisation de la largeur des cours d'eau à partir des orthophotos. Pour ce faire, nous avons utilisé la série de 2008 et numérisé la largeur des cours d'eau tous les 10 à 50

⁴⁰ Cf. supra, II-1/ 3. , page 16

m. Quant à la pente, les valeurs utilisées sont celles présentées dans la section précédente⁴¹.

Enfin, le débit plein a été acquis à partir de la même méthode d'extraction utilisée pour la pente et décrite dans l'Annexe 2. Pour chaque cellule de cours d'eau, nous avons extrait le nombre de cellules drainées à partir du raster d'accumulation de flux. En multipliant cette valeur par l'aire d'une cellule, nous obtenons la surface totale drainée en chacune des cellules du cours d'eau. À ce stade, plusieurs méthodes numériques permettent d'obtenir Q_{bf} à chaque cellule à l'aide de l'équation(3), où A représente la surface drainée dans une cellule et le couple (a, b) , des paramètres déterminés empiriquement.

$$Q_{bf} = a.A^b \quad (3)$$

Nous avons testé les formules de Leclerc et Lapointe (1995) et de Benyahya *et al.* (2009)⁴² et comparé nos résultats avec ceux fournis par les stations hydrométriques des bassins d'intervention et témoin (Tableau 8). Compte tenu de l'importante différence de précision entre les deux formules, nous avons décidé de retenir celle fournie par Benyahya *et al.* (2009). En effet, elle implique une erreur de 160% contre plus de 360% pour celle de Leclerc et Lapointe. Ces valeurs semblent très éloignées des valeurs fournies par les stations de mesure, mais il faut garder deux choses importantes à l'esprit. Premièrement, la comparaison que nous avons faite n'a pu être basée que sur les deux points où des mesures de terrain sont disponibles. Deuxièmement, l'amplitude temporelle des mesures de terrain n'est que d'un peu plus de 2 ans. Or, le débit plein bord est assimilé au débit de récurrence 2 ans. Les données disponibles nous permettent juste de déterminer une seule valeur de Q_{bf} . La précision du débit plein bord est donc réduite au minimum. D'autre part, l'équation empirique de Benyahya *et al.* (2009) possède un coefficient de détermination⁴³ R^2 égal à 0.928 et a fourni de bons résultats dans les 44 rivières ou cours d'eau liés à l'étude.

	Benyahya <i>et al.</i> (2009) $Q = 0.009A^{1.105}$ (4)		Leclerc et Lapointe (1995) $Q = 0.028A^{0.96}$ (5)	
	BV Intervention	BV Témoin	BV Intervention	BV Témoin
Débit calculé ($m^3.s^{-1}$)	6.530	6.068	11.525	10.764
Débit réel ($m^3.s^{-1}$)	2.059	2.979	2.059	2.059
Erreur (%)	217%	104%	460%	261%
	160%		360%	

Tableau 8 Détermination de la formule de calcul du débit : comparaison entre les valeurs numériques données par les équations de Benyahya *et al.* (2009) et Leclerc et Lapointe (1995) avec celles fournies par les stations hydrométriques.

⁴¹ Cf. supra, III-2/ 2. , page 37

⁴² Ces deux articles sont basés sur l'étude d'un grand nombre de rivières. Les coefficients (a, b) retenus au final sont ceux fournissant les meilleurs résultats sur l'ensemble des rivières considérées. Dans le cas de Benyahya *et al.* (2009), des couples (a, b) ont été calculés pour chacune des grandes provinces du Québec et nous avons choisi celui correspondant au site d'étude, basé en Montérégie.

⁴³ Le coefficient de détermination est un outil statistique, qui permet de juger de la qualité d'une régression, linéaire dans le cas de l'étude de Benyahya *et al.* (2009). Plus la valeur de R^2 est proche de 1, plus la régression linéaire est précise.

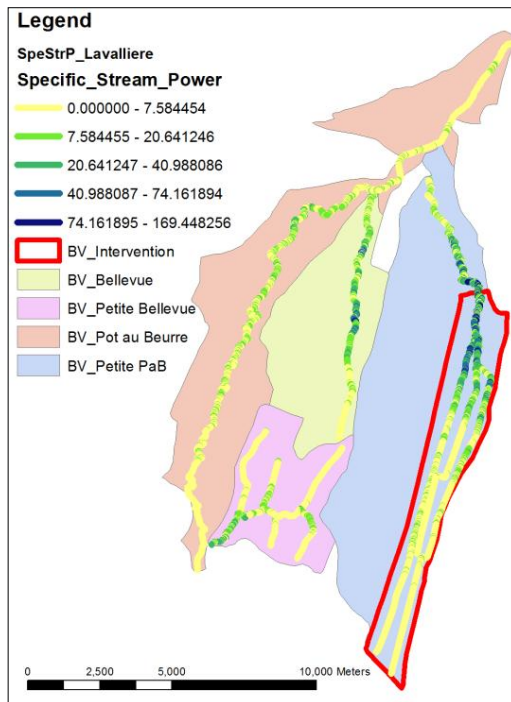


Figure 32 Cartographie de la puissance hydraulique spécifique dans les bassins d'intervention, témoin, de la Bellevue et de la Petite PaB

Les processus d'acquisition du débit plein bord et de la largeur étant relativement longs, nous avons omis la branche Ouest du sous-bassin de la Petite PaB, pour nous concentrer sur le bassin d'intervention, le bassin témoin, la Première rivière Pot-au-Beurre dans le sous-bassin de la Pot-au-Beurre et la Branche 8 du sous-bassin de la Bellevue (Figure 32).

À l'inverse de la pente, la cartographie de la puissance spécifique nous permet de voir que le bassin d'intervention fait figure d'exception dans la Baie de Lavallière. On y observe des valeurs particulièrement élevées de ω au regard des autres cours d'eau représentés. Ceci est confirmé par les distributions de ω (Figure 33). Ainsi, bien que la valeur $\bar{\omega}$ dans le bassin d'intervention ne soit pas plus élevée que dans les autres bassins, la zone de forte pente observée dans la section précédente est également une zone où la puissance hydraulique spécifique est élevée.

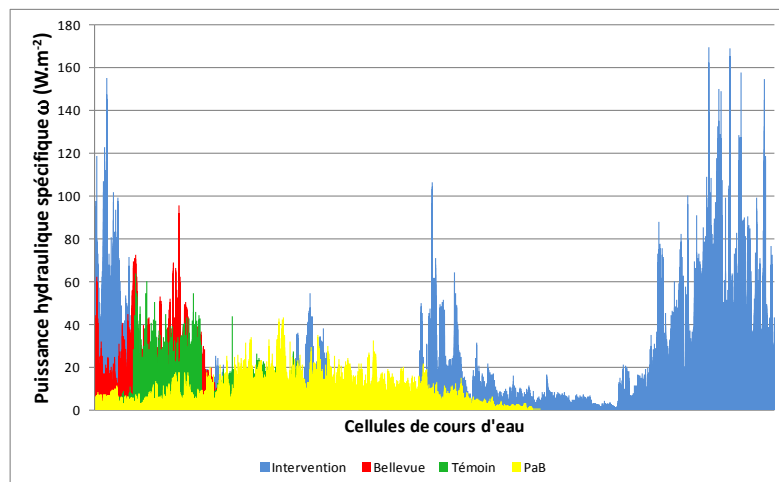


Figure 33 Distributions de la puissance hydraulique spécifique dans les bassins d'intervention (en bleu), témoin (en mauve), de la Pot-au-Beurre (en rouge) et de la Bellevue (en vert).

Dans un deuxième temps, et à l'échelle du bassin d'intervention, nous nous sommes intéressés aux valeurs de ω dans les sites visités sur le terrain. L'objectif étant de déterminer si la puissance hydraulique spécifique peut être perçue comme un indicateur fiable de la mobilité de la rivière et donc, de l'érosion des berges. Le Tableau 9 présente les valeurs moyennes de ω sur chacun des sites, hormis celui concernant la station de mesures.

Les deux sites présentant une valeur élevée de $\bar{\omega}$ sont les sites 1 et 3 (respectivement 47.11 W.m^{-2} et 62.53 W.m^{-2}). Or, ce sont également les sites qui présentaient des marques d'érosions importantes lors de la visite de terrain. Le site 5b quant à lui est

sujet à de l'érosion de berges, mais dans une moindre mesure que les sites 1 et 3. Ceci se retrouve dans la valeur de $\bar{\omega}$ (24.91 W.m^{-2}) qui est deux fois plus faible que dans le site 1 (marques d'érosion importantes), et trois fois plus faible que dans le site 3 (marques d'érosion très importantes). Les valeurs maximales ω_{max} de la puissance hydraulique spécifique sont aussi révélatrices de l'état de l'érosion puisque ces trois sites ont tous des maxima supérieurs à 70 W.m^{-2} . Pour les sites 4a, 4b et 5a, les valeurs de $\bar{\omega}$ sont faibles ($\bar{\omega} < 17 \text{ W.m}^{-2}$). Ceci corrobore le fait qu'aucune activité érosive n'y a été observée. Inversement aux sites 1, 3 et 5b, les valeurs de ω_{max} sont cette fois peu élevées, ne dépassant pas les 35 W.m^{-2} , valeur de ω habituellement considéré comme seuil au dessus duquel la puissance de l'écoulement devient suffisante pour générer de l'érosion.

	ω_{min} (W.m^{-2})	$\bar{\omega}$ (W.m^{-2})	ω_{max} (W.m^{-2})	État des berges
Site 1	3.57	47.11	155.03	érodées
Site 3	0.35	62.53	157.58	très érodées
Site 4a	0.06	6.89	17.21	non érodées
Site 4b	0.07	6.90	19.43	non érodées
Site 5a	0.63	16.38	34.34	non érodées
Site 5b	1.38	24.91	71.62	faiblement érodées

Tableau 9 Valeurs de la puissance hydraulique spécifique pour les sites visités sur le terrain.

La qualité et l'étendue des relevés LiDAR dont nous disposons ont permis un travail important de cartographie des paramètres hydrogéomorphologique dans quatre sous-bassins de la Baie de Lavallière. Dans un premier temps, et au vu des profils d'élévation présentés, il apparaît un réel déséquilibre dans la plupart des cours d'eau de la Baie. L'origine de ces déséquilibres n'est pour l'heure pas connue mais le retour à un profil concave d'équilibre est inévitable. Enfin, à l'inverse de la pente, la cartographie de la puissance hydraulique spécifique semble être un indicateur particulièrement fiable de l'état d'érosion des berges. Une telle cartographie, sur l'ensemble de la Baie et à une échelle plus fine permettrait de cibler précisément les zones à risque. Dans la dernière section qui suit, nous allons nous pencher sur la modélisation numérique de l'évolution des canaux, dont la réalisation nécessite un certain nombre de données désormais accessibles, tels que la vitesse de migration des berges ou la pente des canaux.

3. Re-méandrisation et paramètres influençant la mobilité

3/ 1. Calage du modèle numérique

Comme il l'a été montré dans la section II-2/ 2. , le modèle utilisé dans RVR Meander ne demande, en plus des paramètres hydrogéomorphologiques de base, que la valeur du coefficient de migration E_0 associé au tronçon étudié. Les données présentées précédemment ont servi de base au calibrage de E_0 dans les bassins d'intervention et témoin. Le principe du calage numérique consiste à effectuer une série de tests sur des tracés de 1935 afin d'obtenir numériquement les tracés de 1964 et 2009. À partir de ces profils numériques, la même méthode de détermination de la vitesse de migration que celle décrite dans le paragraphe III-1/ 2. a été mise en œuvre. Différentes valeurs de E_0 sont utilisées jusqu'à obtenir une vitesse de migration la plus proche possible de celle obtenue dans la section III-1/ 2.

Les sections retenues pour ce calibrage ont été choisies dans les parties des cours d'eau non linéarisées et ayant donc eu une évolution naturelle au cours du temps. Cependant, nous avons constaté que RVR Meander a tendance à ne pas compiler dans le cas de faibles débits. Pour palier à ce problème, il est nécessaire de réduire la longueur du tronçon considéré. Le calibrage s'est donc fait à partir du plus grand tronçon disponible pour lequel la simulation arrivait à terme dans le cas de la branche Est de la Petite PaB et de la Petite Bellevue.

Les variables hydrogéomorphologiques d'entrée répertoriées dans le Tableau 10 proviennent des données orthophotographiques et des relevés LiDAR. La largeur a été photo-interprétée sur la base des clichés de 1935. Le débit et la pente sont issus du post-traitement des rasters d'élévation de 2008 dont il est question dans l'Annexe 2. Le coefficient de Manning a quant à lui été déterminé à partir de l'abaque de l'United States Geological Survey et la taille des sédiments a été fixée à 10^{-4}m ⁴⁴.

	Longueur (m)	Largeur ⁱ (m)	Pente ⁱ (m.m ⁻¹)	Débit ⁱ (m ³ .s ⁻¹)	Manning	Taille des sédiments (m)
Bassin d'intervention	2709	2.186	0.001674	0.1742	0.0275	0.0001
Bassin témoin	195 ⁴⁵	3.786	0.000392	0.0157	0.0275	0.0001

Tableau 10 Paramètres d'entrée utilisés dans le calage du modèle numérique de RVR Meander. (i) : pour un tronçon, les valeurs de largeur, pente et débit sont les moyennes de toutes les valeurs disponibles sur le tronçon.

Le coefficient E_0 résultant pour le bassin d'intervention est de l'ordre de $1.525\text{e-}7$, ce qui rejoint la valeur habituellement utilisée [Constantine *et al.*, 2009; Motta *et al.*, 2011]. La vitesse de migration correspondante de 0.146m.an^{-1} s'approche à 0.1% près de la valeur déterminée en III-1/ 2. (0.146m.an^{-1}). Pour le bassin témoin de la Petite Bellevue, la valeur du coefficient de migration retenue est $3.9\text{e-}7$ et approche à 2.46% la valeur de la vitesse de migration de référence.

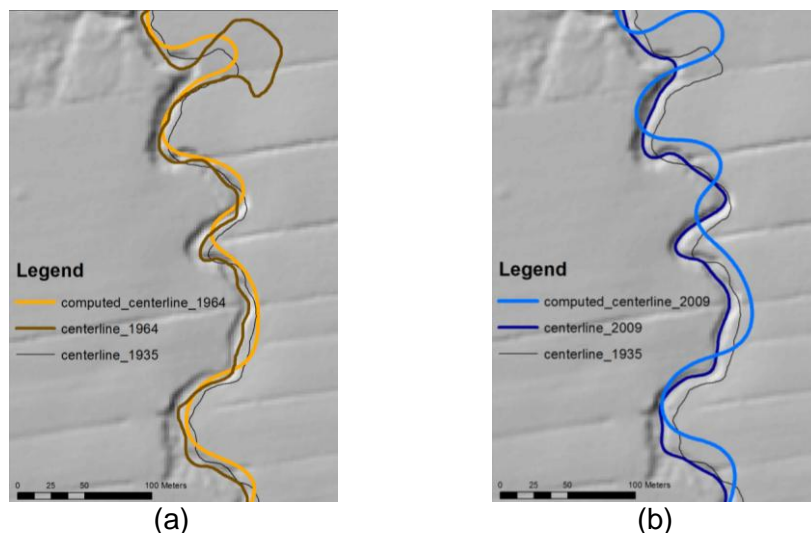


Figure 34 Comparaison entre les tracés photo-interprétés et les tracés obtenus numériquement avec RVR Meander. (a) : 2009, (b) : 1964

⁴⁴ La taille des sédiments a été déterminée empiriquement, à partir des observations faites sur le terrain.

⁴⁵ La faible longueur du tronçon considéré pour le bassin témoin est due aux limites de la zone couverte par les orthophotos de 1935 et à la faiblesse du débit calculé dans cette zone.

Au premier abord, les résultats numériques de 2009 et 1964 présentés dans la Figure 34 semblent assez éloignés des tracés photo-interprétés. Cependant, plusieurs études ont montré que le modèle de RVR Meander basé sur le coefficient de migration, fournissait une bonne approximation de l'amplitude moyenne de migration, bien que la localisation précise des méandres soit mal gérée [Choné, 2012]. C'est également l'interprétation que nous pouvons tirer de la superposition des lignes numériques avec celles de 2009 et de 1964.

Les différences avec les tracés photo-interprétés peuvent s'expliquer par l'aspect très continu et linéaire du modèle en lui-même. Les paramètres d'entrée sont des valeurs constantes pour tout un tronçon [Motta, 2011]. Or, et nous l'avons directement constaté sur le terrain, des indices tels que la composition des sols ou le couvert végétal des berges peuvent évoluer très rapidement le long des cours d'eau. Un autre aspect important que le modèle omet reste l'occurrence de débits importants, lors des épisodes saisonniers de crues ou de fortes précipitations. Les lits des cours d'eau peuvent alors changer brutalement et durablement. En plus des aspects numériques, il faut également prendre en compte le rôle de l'activité humaine sur les cours d'eau. Soixante quatorze années séparent les deux tracés, pendant lesquelles des contraintes et des stabilisations locales des berges, non visibles à partir des données disponibles, ont pu avoir lieu.

3/2. Configuration prédite par RVR Meander

Tous les paramètres d'entrée sont désormais fixés pour la partie numérique. L'accent ici est mis sur 2 des sites visités sur le terrain, le site 1 et le site 4b. Ils sont intéressants dans le sens où ces deux sites s'opposent par leurs valeurs de puissance hydraulique spécifique ω . Constaté sur le terrain, le site 1 est une zone d'érosion de berges importantes, à l'inverse du site 4b.

Nous avons donc lancé le modèle de RVR Meander sur 74 ans à partir de 1935, pour comparer les résultats avec les données photo-interprétées. Les paramètres d'entrée du modèle sont donnés dans le Tableau 11⁴⁶.

	Longueur (m)	Largeur (m)	Pente (m.m ⁻¹)	Débit (m ³ .s ⁻¹)	Manning	Taille des sédiments (m)	Coefficient de migration E_0
Site 1	369	1.730	0.002191	0.0568	0.0275	0.0001	$1.5 \cdot 10^{-7}$
Site 4b	281	1.557	0.000566	0.0302	0.0275	0.0001	$1.7 \cdot 10^{-7}$

Tableau 11 Paramètres d'entrée de RVR Meander pour les sites 1 et 4b en 1935

Site 1

Pour le site 1, la configuration prédite par le modèle numérique est très largement éloignée de la situation réelle, en 1964 comme en 2009 (Figure 35). Certes, ceci est dû, en partie, à RVR Meander lui-même, et aux approximations qu'il effectue⁴⁷. Mais,

⁴⁶ La provenance de ces paramètres d'entrée est la même que pour le calage du modèle : la largeur provient des clichés de 1935. Le débit et la pente sont issus des rasters d'élévation de 2008. Le coefficient de Manning a été déterminé à partir de l'abaque de l'United States Geological Survey.

⁴⁷ Cf. supra, III-3/ 1. , page 41

lors du calage du modèle dans des sections de cours d'eau vraisemblablement exemptes de contraintes anthropiques, nous avons vu que l'amplitude des méandres prédite par RVR Meander se rapprochait de celle observée sur le terrain. Or ce n'est pas le cas ici. Sur la configuration réelle de 1964, le cours d'eau n'a quasiment pas évolué et les lignes moyennes de 1935 et 1964 se superposent. Dans le cas de 2009, bien qu'il y ait un décalage entre les tracés dûs au géoréférencement, il est évident que le cours d'eau a été contraint. Certaines sections ont été linéarisées entre 1964 et 2009 et nous n'observons aucune formation de méandre. En revanche, sur les tracés numériques, nous observons que des boucles de méandres se sont déjà formées en 1964. En 2009, de nouveaux méandres apparaissent, d'autres se referment et l'amplitude générale des méandres semble augmenter.

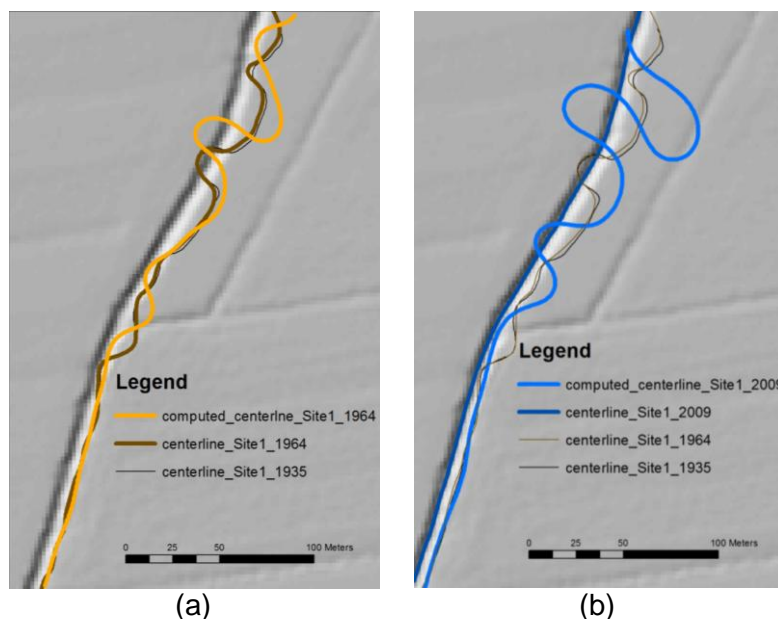


Figure 35 Configurations prédites par RVR Meander pour le site 1. En (a), la situation en 1964 et en (b), la situation en 2009

D'après les simulations numériques, si le site 1 n'avait pas été contraint entre 1935 et 2009, le profil du cours serait très sinueux. Confirmant les valeurs élevées de la puissance hydraulique spécifique, le modèle prédit, en l'absence de contraintes anthropiques, une mobilité importante du cours d'eau avec la formation de nombreux méandres. Leur amplitude⁴⁸ initiale d'environ 4.6 m atteint 11.1 m en 1964 et 18.6 m en 2009. Ceci traduit le fait que la situation actuelle de 2009 ne peut pas être une configuration d'équilibre. Étant donné que les profils d'aujourd'hui sont quasiment les mêmes que ceux de 1935, la migration des cours d'eau est inévitable.

Site 4b

Le site 4b a un débit un peu plus faible que le site précédent mais surtout, une pente beaucoup plus plane. Ce sont les deux seules différences géomorphologiques notables avec le site 1. Il faut également garder à l'esprit que la valeur moyenne de la puissance hydraulique spécifique dans le site 4b est 7 fois plus petite que dans le site 1⁴⁹.

⁴⁸ Le calcul de l'amplitude des méandres fait l'objet de plus amples explications dans la section III-3/ 3. , page 48.

⁴⁹ Cf. supra, III-2/ 3. , page 38

La configuration prédite par RVR Meander dans ce cas est totalement différente du site 1. Le tracé rectiligne du profil pourrait nous laisser penser que le modèle prédirait une re-méandrisation, à l'instar du site 1. Cependant, les lignes moyennes numériques de 1964 et 2009 se superposent presque parfaitement avec celles obtenues par digitalisation des orthophotos et correspondent au tracé initial de 1935. La pente et le débit beaucoup plus faible que dans le site 1 ne fournissent pas à l'écoulement la puissance nécessaire pour modifier le lit du cours d'eau. Comme dans le cas précédent, ce résultat est cohérent avec la valeur de ω .

3/3. Évolution de l'amplitude des méandres

Nous nous sommes ensuite intéressés à l'évolution de l'amplitude des méandres au cours du temps, dans le cas fictif où toutes les contraintes anthropiques seraient supprimées. La capacité d'une rivière à modifier son lit ne dure pas éternellement. Le processus de méandrisation et l'augmentation de l'amplitude des méandres tendent à allonger le cours d'eau et donc, à en diminuer la pente. Or, et nous l'avons vu à travers la simulation menée sur le site 4b, plus la pente S est faible, plus la migration des berges est réduite. L'objectif est donc ici de déterminer l'expansion maximale de la zone de mobilité des cours d'eau prédite par le modèle numérique.

L'amplitude des méandres sur une section a été calculée en décomposant le profil longitudinal en somme de fonctions sinusoïdales. Le tracé est extrait depuis ArcGIS (Figure 36 (a)) puis réorienté de manière à être parallèle à l'axe des abscisses (Figure 36 (b)). Une première sinusoïde est déterminée empiriquement afin de représenter l'allure générale du tracé (Figure 36 (c)). De la même manière, une seconde sinusoïde est ajoutée pour représenter les méandres (Figure 36 (d)).

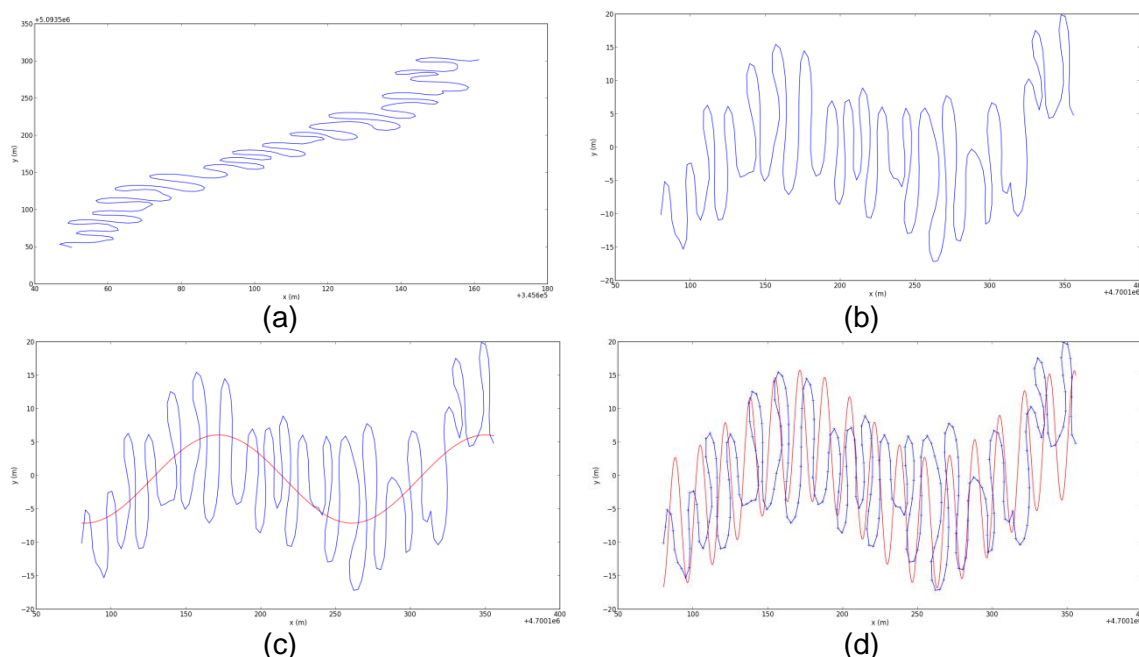


Figure 36 Méthode de calcul de l'amplitude des méandres. En (a), le profil initial et en (b), le même profil réorienté selon l'axe des x. En (c), la sinusoïde rouge représente l'allure générale du tracé et en (d), une seconde sinusoïde représente les méandres.

L'étude a été menée pour le site 1 sur un intervalle de temps de 550 ans à partir du profil datant de 2009. L'objectif étant de fournir de l'information aux exploitants locaux quant au gain de terrain du cours d'eau sur leurs terres agricoles. Une courbe de

l'évolution de l'amplitude des méandres pour le site 1 a pu être réalisée à partir de 23 profils différents (Figure 37).

De prime abord, la première constatation que nous pouvons faire est que l'amplitude moyenne des méandres ne croît pas indéfiniment. Au bout de 300 ans d'évolution non contrainte, et dans le cas d'un profil initial linéarisé, les méandres les plus grands se referment (Figure 38(b)). L'amplitude moyenne sur le tronçon est alors de 35 m. Ceci semble conforme à l'intuition puisque la capacité d'une rivière à modifier son lit n'est un processus perpétuel. S'en suit alors une série de création et de destruction de méandres lors de laquelle, l'amplitude moyenne oscille autour de 27 m environ. De plus, nous n'avons constaté que les premiers changements visibles dans le tracé du canal apparaissent à partir d'une vingtaine d'années d'évolution. Cela peut se comprendre par le fait que, dans le cas d'un canal fortement linéarisé, les lignes de courant sont quasiment parallèles aux berges et la composante normale à la direction de l'écoulement est très peu importante. La pression exercée sur les berges est alors minimale et la création de perturbation pouvant dévier l'écoulement prend du temps. Cependant, une fois le processus amorcé, la phase de re-méandrisation qui s'étend jusqu'à la première fermeture de méandre suit une évolution quasi linéaire.

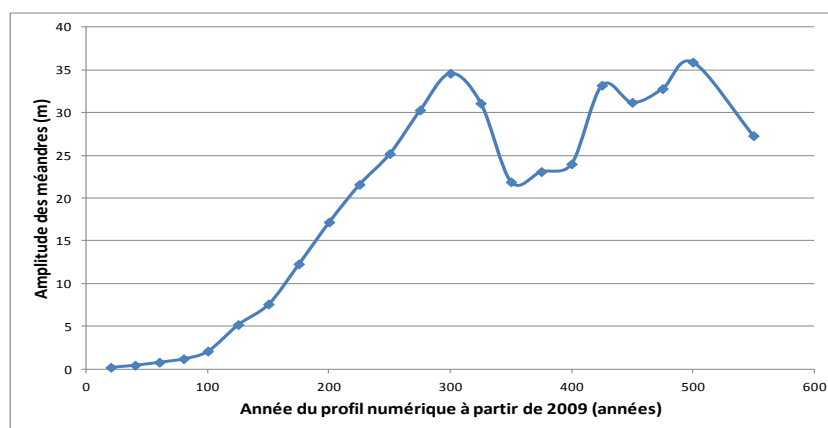


Figure 37 Évolution de l'amplitude des méandres prédite par RVR Meander sur un intervalle de temps de 80ans

D'après nos simulations, l'amplitude d'un méandre peut atteindre près de 50 m (Figure 38(a)). Le processus d'élargissement d'une boucle de méandre (Figure 38(b)), de la plus petite apparition à la fermeture de la boucle, prend environ 300ans. Même si il est un peu plus élevé, ce résultat rejoint ceux de Piégay *et al.* (1998), qui estime que ce processus prend en moyenne entre 10 et 100ans, bien qu'il soit extrêmement changeant selon le cours d'eau.

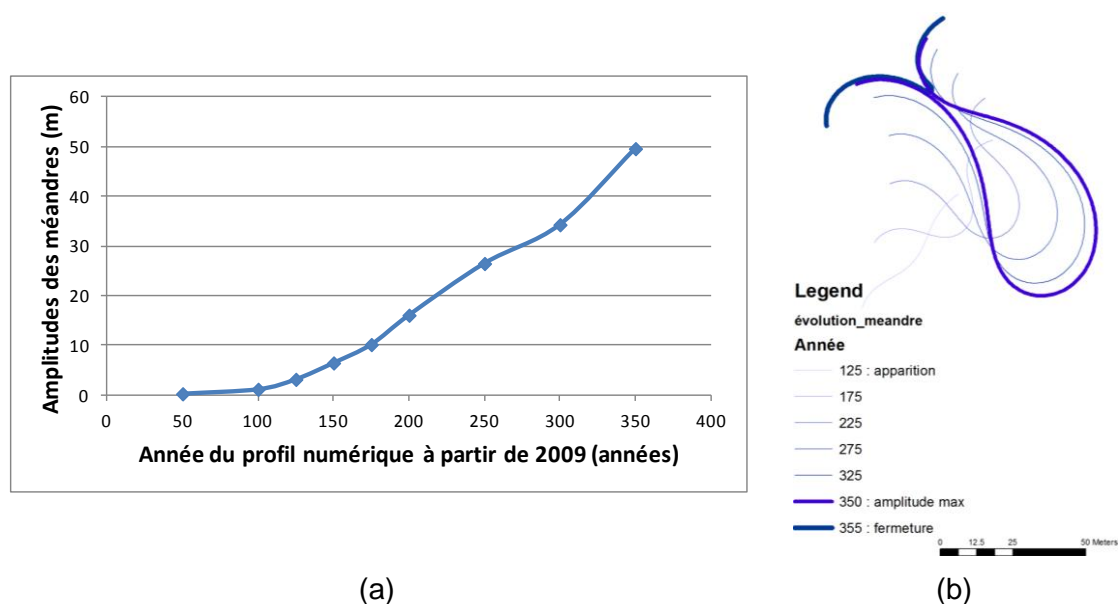


Figure 38 En (a) : Évolution de l'amplitude d'un méandre prédite par RVR Meander. En (b) : Vie d'un méandre de son apparition à sa fermeture

3/ 4. Paramètres influençant la mobilité du lit

Nous avons déjà vu grâce aux simulations sur les sites 1 et 4b que la pente était un paramètre influençant grandement la migration. Dans un dernier temps, nous allons donc nous pencher sur les facteurs intervenant dans la mobilité des berges. Pour ce faire, les simulations ont été lancées sur 30 ans, à partir du tracé du site 1 de 2009, afin de déterminer si les paramètres étudiés ont un impact dans un futur proche.

Les paramètres que nous pouvons faire varier dans RVR Meander sont la pente et la largeur des canaux⁵⁰. Nous avons réalisé deux simulations. Toujours à partir de la configuration de 2009, l'une avec une pente plus faible, et l'autre avec une largeur plus élevée. La pente abaissée a été déterminée empiriquement. La valeur correspond à celle observée dans le site 4b, site où l'érosion est inexistante et la puissance hydraulique spécifique faible. La largeur augmentée est elle aussi déterminée empiriquement et correspond également à celle mesurée dans le site 4b. Les paramètres d'entrées sont présentés dans le Tableau 12.

Configurations	Largeur (m)	Pente (%)
inchangée	1.556	0.2191
pente abaissée	1.556	0.0566
largeur augmentée	1.808	0.2191

Tableau 12 Différentes valeurs de la pente et de la largeur pour l'étude de l'influence de ces paramètres sur la mobilité

Comme nous l'avons vu précédemment⁵¹, si la situation initiale est rectiligne, la migration des berges prend du temps avant d'être visible. Dans un futur proche, cela ne veut pas dire pour autant que l'érosion est nulle. Il est juste plus difficile d'identifier

⁵⁰ Le débit et la granulométrie peuvent aussi être modifiés dans RVR Meander, tout comme le coefficient de Manning. Cependant, ces paramètres sont difficilement modifiables sur le terrain et les faire varier ici ne serait pas très réaliste.

⁵¹ Cf. supra, III-3/ 3. , page 45

clairement un méandre et d'en déterminer l'amplitude. Pour comparer les résultats de nos simulations sur 30 ans, nous ne nous sommes donc pas attardés sur l'amplitude des méandres mais sur la surface totale de migration. Comme dans la section III-1/ 2. , nous avons déduit des tracés digitalisés de 2009 et numériques de 2039, l'aire sur laquelle le cours d'eau s'est déplacé au cours des 30 années.

Dans notre cas de référence, où la configuration reste inchangée, la superficie de migration de canal est de l'ordre de 150 m². Lorsque la pente est abaissée , cette superficie chute de 47% et passe à 80 m². À l'inverse, pour une largeur plus importante, la surface de migration est de 173 m², soit une augmentation de plus de 14%.

Ces résultats révèlent bien l'influence que peuvent avoir ces paramètres sur l'érosion des berges. Or, ces paramètres sont fréquemment perturbés par des actions anthropiques telles que le reprofilage de section ou le curage des canaux. La relation entre la pente et le pouvoir d'érosion de l'écoulement peut se comprendre aisément par le biais de la puissance hydraulique spécifique ω , qui est directement proportionnelle à la pente du canal. En diminuant la pente, on réduit la vitesse de l'écoulement et son pouvoir d'érosion.

La largeur semble avoir l'effet inverse. La relation entre la taille des méandres et la largeur est moins intuitif que celle qui lie la taille des méandres à la pente. Leopold et Wolman (1957) ont déterminé empiriquement les relations suivantes :

$$\begin{cases} 7L \leq \lambda \leq 11L \\ A \approx 2.5 \lambda \end{cases} \quad (6)$$

La grandeur L représente la largeur du canal, tandis que A et λ sont respectivement l'amplitude des méandres et la longueur d'onde entre deux méandres. En fin de compte, augmenter la largeur du canal permet certes d'améliorer le drainage en cas de forte crue, mais expose aussi à accroître la pression exercée par l'écoulement sur les berges.

RVR Meander est un outil de simulation numérique rapide et simple d'utilisation. Il ne peut pas être utilisé pour localiser précisément où un cours d'eau est susceptible de migrer. En revanche, il constitue un moyen efficace pour prédire l'amplitude de l'ajustement d'un cours d'eau en fonction de son environnement hydrogéomorphologique. Une conclusion importante que nous pouvons donc tirer de nos simulations reste que les tronçons étudiés, très linéarisés et similaires à une grande partie du réseau hydrique du bassin d'intervention, présentent un fort déséquilibre. L'ajustement naturel du cours d'eau par l'érosion de fond et des berges est inévitable.

Conclusion

Dans le cadre de l'étude, des informations importantes sur l'évolution des cours d'eau de la Baie de Lavallière au cours des dernières décennies ont été déduites de l'analyse historique. Malgré des données partielles, il apparaît clairement que le bassin d'intervention se comporte différemment de son voisin. Les cours d'eau y sont plus mobiles. Cela peut s'expliquer par des différences dans le type et l'occupation des sols, par l'allure générale des cours d'eau et des bassins versants, mais également par le fait que le bassin d'intervention semble avoir subi plus de modifications anthropiques depuis les années 1960. Ces observations ont pu être confirmées par l'analyse des données hydrogéomorphologiques, qui témoignent d'un réel déséquilibre des cours d'eau dans le bassin d'intervention. Cependant, nous avons constaté que ce déséquilibre n'est pas l'apanage du seul bassin d'intervention. C'est également le cas pour les cours d'eau des sous-bassins de la Pot-au-Beurre, de la Petite Bellevue et de la branche Ouest de la Petite PaB. Il est possible que l'excédent de charge sédimentaire dans le bassin d'intervention, soit une réponse spécifique de ce bassin, mais il est certain que des réajustements naturels, d'amplitudes variables, soient à prévoir dans d'autres cours d'eau.

Malheureusement, l'origine de l'excédent sédimentaire dont fait l'objet le bassin d'intervention n'a pas pu être déterminée. Bien que les dragages de 1978 et 1983 ne semblent pas avoir un impact majeur, l'hypothèse principale de régression de fond induite par les travaux de drainage des années 1930 a souffert d'un cruel manque de données et nous n'avons donc pas pu la valider. Pour répondre à cette question cruciale, une étude supplémentaire pourrait être envisagée. Dans le meilleur des cas, un nouveau relevé LiDAR permettrait de comparer les profils d'élévation à deux périodes différentes, mais compte tenu du coût prohibitif de cette technologie, cette solution est peu envisageable. Une des alternatives serait de réaliser une campagne de mesure de niveau de fond des cours d'eau à quelques années d'intervalles.

Tous ces éléments nouveaux sont destinés à documenter scientifiquement le projet pilote d'entretien et d'aménagement intégré des cours d'eau. Les acteurs locaux possèdent désormais des ordres de grandeurs relatives à la mobilité des canaux dans le bassin d'intervention. Bien qu'une trentaine d'années soient nécessaires à l'apparition visible des méandres dans les secteurs linéarisés, des pertes de terres attenantes aux cours d'eaux sont probables dans un futur proche de quelques années seulement. L'influence des paramètres morphologiques est également un facteur important dans la migration des berges. Ces informations ont été émises dans la présente étude et pourront servir lors des futurs aménagements menés dans la Baie de Lavallière.

Enfin, à l'échelle globale, la puissance hydraulique spécifique s'est révélée être un indicateur fiable de l'érosion des berges. À l'échelle de la Baie de Lavallière, et avec une précision accrue, une telle cartographie serait un outil très utile pour les acteurs locaux, afin de cibler les zones d'actions prioritaires. Des aménagements hydrauliques, tels que des seuils dissipateurs d'énergie, pourraient être implantés efficacement afin de cibler les zones d'activité érosive problématique. Répertorier l'ensemble des marques d'érosion dans un site particulier, tel que le bassin d'intervention, permettrait de déterminer localement une valeur de la puissance hydraulique spécifique au delà de laquelle les marques d'érosions apparaissent et d'agir en conséquence, de manière préventive.

Ces données, ainsi que toutes les études menées par les acteurs scientifiques du projet, sont dès lors accessibles aux gestionnaires du territoire et, utilisées à bon

escient, permettraient une meilleure orientation des fonds publics engagés. L'entretien des branches 15 et 17 du sous-bassin de la Petite PaB prévu en 2013 fait partie des actions nécessaires de soutien aux exploitants agricoles. Cependant, des concertations publiques appuyées par des études scientifiques supplémentaires devraient aider à trouver des solutions satisfaisantes sur le long terme.

Liste des figures

Figure : 1 Principaux objectifs des aménagements de cours d'eau. _____	2
Figure : 2 Bande riveraine idéale (a) et bande riveraine mal entretenue (b). _____	3
Figure : 3 Le cours d'eau et son espace de mobilité _____	4
Figure : 4 Balance de Lane comme modèle d'équilibre pour le dépôt et l'érosion des cours d'eau. (a) : modèle à l'équilibre, (b), déséquilibre vers de la sédimentation, (c): déséquilibre vers de l'érosion _____	7
Figure : 5 Formes générales en profil et en plan d'un cours d'eau de l'amont vers l'aval. _____	7
Figure : 6 Linéarisation d'une boucle de méandre. _____	8
Figure : 7 Impact de la linéarisation sur le fond et le lit du cours d'eau. _____	8
Figure : 8 Zone d'accumulation de sédiments dans un cours d'eau _____	9
Figure : 9 Phénomène d'érosion régressive de l'aval vers l'amont _____	9
Figure : 10 Schéma de l'évolution d'un cours d'eau suite à des modifications naturelle (en vert) et anthropique (en gris). En bleu : réponses hydrogéomorphologiques et biologiques; en rouge : conséquences sur la faune et la flore. _____	12
Figure : 11 Baie de Lavallière _____	15
Figure : 12 Localisation du bassin d'intervention _____	17
Figure : 13 Sites visités dans le bassin d'intervention de la Branche Est de la Petite PaB lors de la visite du 13/04/2012 _____	17
Figure : 14 Schéma du fonctionnement d'une campagne de relevé LiDAR _____	21
Figure : 15 Traitement des données vectorielles dans un SIG _____	22
Figure : 16 Traitement des données vectorielles dans un SIG _____	23
Figure : 17 Données LiDAR utilisées _____	24
Figure : 18 Profils d'élévation sur la route RE132 à hauteur de Picoudie pour les relevés LiDAR 2007 (en bleu) et 2008 (en rouge) _____	25
Figure : 19 Ré-échantillonnage des données LiDAR, (a) : raster de résolution 2m, (b) : raster de résolution 1m. _____	27
Figure : 20 Process des ponts et ponceaux, (a) : confirmation de la présence d'un pont sur une orthophoto de 2009, (b) : visualisation du pont sur le relevé LiDAR, (c) : nouveau raster après élimination du pont _____	28
Figure : 21 Interpolation des valeurs NoData du LiDAR 2001 par la méthode IDW. En (a) : relevé avant interpolation; en (b) : relevé après interpolation _____	28
Figure : 22 Zone de distorsion sur les bords du LiDAR 2008 _____	29

Figure : 23 Mosaïque de plusieurs jeux de données LiDAR _____	29
Figure : 24 Processus de prétraitement des données LiDAR disponibles _____	30
Figure : 25 Visualisation de la linéarisation à partir des lignes moyennes digitalisées. En noir, le profil de 1935, en marron, 1964 et en bleu, 2009 _____	31
Figure : 26 Processus de détermination de la vitesse de migration des berges, (a) : migration du cours d'eau à partir des lignes moyenne de 1964 et 2009, (b) : calcul de la migration de berge comme le rapport de l'aire du polygone sur son demi-périmètre. Source : Gaillot, 2007 _____	32
Figure : 27 Distribution de la vitesse de migration dans le bassin de la Petite PaB _____	33
Figure : 28 Zones de dragage entre les années 1978 et 1983 _____	34
Figure : 29 Profils longitudinaux dans le bassin d'intervention réalisés à partir des LiDAR de 2007 et 2008 _____	35
Figure : 30 (a) profils longitudinaux dans la branche Ouest du bassin de la Petite PaB; (b) profil longitudinal dans le bassin de la Pot-au-Beurre; (c) profils longitudinaux dans bassin témoin _____	36
Figure : 31 Cartographie de la pente dans la Baie de Lavallière _____	37
Figure : 32 Cartographie de la puissance hydraulique spécifique dans les bassins d'intervention, témoin, de la Bellevue et de la Pot-au-Beurre _____	40
Figure : 33 Distributions de la puissance hydraulique spécifique dans les bassins d'intervention (en bleu), témoin (en mauve), de la Pot-au-Beurre (en rouge) et de la Bellevue (en vert). _____	40
Figure : 34 Comparaison entre les tracés photo-interprétés et les tracés obtenus numériquement avec RVR Meander. (a) : 2009, (b) : 1964 _____	42
Figure : 35 Configurations prédites par RVR Meander pour le site 1. En (a), la situation en 1964 et en (b), la situation en 2009 _____	44
Figure : 36 Méthode de calcul de l'amplitude des méandres. En (a), le profil initial et en (b), le même profil réorienté selon l'axe des x. En (c), la sinusoïde rouge représente l'allure générale du tracé et en (d), une seconde sinusoïde représente les méandres. _____	45
Figure : 37 Évolution de l'amplitude des méandres prédite par RVR Meander sur un intervalle de temps de 80ans _____	46
Figure : 38 En (a) : Évolution de l'amplitude d'un méandre prédite par RVR Meander. En (b) : Vie d'un méandre de son apparition à sa fermeture _____	47

Liste des tableaux

Tableau : 1 Physicochimie de l'eau près de l'exutoire de la Baie de Lavallière en 1983 et 2009 _____	11
Tableau : 2 Historique des aménagements dans la Baie de Lavallière _____	16
Tableau : 3 Synthèse descriptive des sites visités sur le terrain _____	18
Tableau : 5 Erreurs induites par le géoréférencement des orthophotos de 1935 par rapport aux orthophotos de 1964 et 2009. _____	26
Tableau : 6 Utilisation des relevés LiDAR disponibles pour créer les rasters d'élévation des sous-bassins versants considérés _____	30
Tableau : 7 Valeurs de la pente dans les sous-bassins de Baie de Lavallière _____	37
Tableau : 8 Valeurs de la pente moyenne S observées dans les sites visités sur le terrain _____	38
Tableau : 9 Détermination de la formule de calcul du débit : comparaison entre les valeurs numériques données par les équations de Benyahya et al. (2009) et Leclerc et Lapointe (1995) avec celles fournies par les stations hydrométriques. _____	39
Tableau : 10 Valeurs de la puissance hydraulique spécifique pour les sites visités sur le terrain. _____	41
Tableau : 11 Paramètres d'entrée utilisés dans le calage du modèle numérique de RVR Meander. (i) : pour un tronçon, les valeurs de largeur, pente et débit sont les moyennes de toutes les valeurs disponibles sur le tronçon. _____	42
Tableau : 12 Paramètres d'entrée de RVR Meander pour les sites 1 et 4b en 1935 _____	43
Tableau : 13 Différentes valeurs de la pente et de la largeur pour l'étude de l'influence de ces paramètres sur la mobilité _____	47

Bibliographie

- ABAD, J.D. et GARCIA, M.H. 2006.** *RVR Meander : a toolbox for re-meandering of channelized streams*: Computers & Geosciences, 2006. pp. 92-101. Vol. 32.
- ALI, M., STERK, G., SEEGER, M., BOERSEMA, M.P., PETERS, P. 2012.** *Effect of hydraulic parameters on sediment transport capacity in overland flow over erodible beds* : Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 2012. pp. 591-601. Vol. 16, DOI : 10.5194/hess-16-591-2012.
- BENYAHYA, L., DAOGLE, A., CAISSIE, D., BEVERIDGE, D., ST-HILAIRE, A. 2009.** *Caractérisation du régime naturel du débit des bassins versants de l'Est du Canada* : INRS-ETE, 2009. p. 88. Vol. R1057.
- BILODEAU, C. 2010.** *Apports du LiDAR à l'étude de la végétation des marais salés de la Baie du Mont-Saint-Michel*. 2010. p. 204.
- BISSON, C., LAURENCE-OUELLET, C. et SOUMAHORO, C. 2010.** *Plan d'action concerté pour réduire la pollution diffuse dans le bassin versant de la Baie Lavallière 2009-2013*. Saint-Hyacinthe : Comité plan d'action du bassin versant de la baie Lavallière, 2010. p. 35.
- CCSE. 2007.** *Les bandes riveraines et la qualité de l'eau : une revue de la littérature*. 2007.
- CHONÉ, G. 2012.** *Simulation of channel migration of the Matane River, Québec, with RVR Meander : Accuracy and its utility to assess the impact of bank stabilization on channel migration*. 2012. p. 16.
- CIC et EI. 1981.** *Projet Baie Lavallière : Étude d'impact*. 1981. p. 99.
- CONSTANTINE, C.R., DUNNE, T. et HANSON, G.J. 2009.** *Examining the physical meaning of the bank erosion coefficient used in meander migration modeling* : Geomorphology, 2009. pp. 242-252. Vol. 106.
- DEGOUTTE, G. 2006.** *Diagnostic, aménagement et gestion des rivières*. : Tec et Doc - Lavoisier, 2006. pp. 55-93.
- DRMLL. 2010.** *Fiches d'enregistrement des producteurs agricoles*. : MAPAQ, 2010. p. 8.
- FOUCRIER, L., MINGELBIER, M., BRODEUR, P., MORIN, J. 2007.** *Le marais aménagé de la Baie de Lavallière : état de situation, enjeux agroenvironnementaux et recommandations de gestion*. Québec : MRNF, Direction de la recherche sur la Faune, 2007. p. 69.
- GALLIOT, N. 2007.** *La dynamique géomorphologique du méandrage de la basse vallée de la Bruche (Bas-Rhin) : approche historique*. 2007. p. 59.
- HABERT, E. 2000.** *Qu'est-ce-qu'un système d'informations géographiques*. : Insitut de recherche pour le Développement, 2000. p. 13.
- IKEDA, S., PARKER, G. et SAWAI, K. 1981.** *Bend theory of river meanders*. : Journal of Fluid Mechanics, 1981. pp. 363-377. Vol. 112.
- JORDAN, D.C. et FONSTAD, M.A. 2005.** *Two-Dimensional mapping of river bathymetry and power using aerial photography and GIS on the Brazos River, Texas*. : Geocarto, 2005. pp. 1-8. Vol. 20.
- LE DELLIU, P. 2003.** *Les barrages, conception et maintenance*. : Presses Universitaires de Lyon, 2003. pp. 9-14.

- LECLERC, R. et LAPOINTE, M.F. 1995.** *Hydraulic geometry of alluvial rivers in the Bois-Francs region of southern Québec.* : Canadian Water Resources Journal, 1995. pp. 237-252. Vol. 19 n°3.
- LEOPOLD, L.B. et WOLMAN, M.G. 1957.** *River channel patterns : Braided, meandering and straight.* : U.S. Geological Survey Professional Paper, 1957. pp. 39-85. Vol. 282B.
- MALAVOI, J.R., BRAVARD, J.P., PIÉGAY, H., HÉROIN, E., RAMEZ, P. 1998.** *Détermination de l'espace de liberté des cours d'eau.* : SDAGE RMC, 1998. p. 35. Guide technique n°2.
- MICHAUD, A. 2007.** *Inventaires de couvées.* Québec : Canards Illimités Canada, 2007.
- MICHAUD, A., DESJARDINS, J., COTÉ, N., BEAUDIN, I., DROUIN, A., SEYDOUX, S., ST-LAURENT, I. 2012.** *Rapport de l'Observatoire de la qualité de l'eau de surface en bassin versants agricoles. Rapport sommaire pour la période de référence 2009-2011. version préliminaire.* Québec : IRDA et MAPAQ, 2012. p. 87. Rapport réalisé dans le cadre du projet Observatoire de la qualité de l'eau de surface en bassins versants agricoles.
- MICHELI, E.R., KIRCHNER, J.W. et LARSEN, E.W. 2004.** *Quantifying the effect of riparian forest versus agricultural vegetation on river meander migration rates, Central Sacramento River, California, USA.* : River Research and Applications, 2004. pp. 537-548. Vol. 20, DOI : 10.1002/rra.756.
- MOTTA, D. 2011.** *A GIS-based computational platform for physically-based bank evolution and meander migration.* Beijing : Proceedings of the 7th IAHR Symposium on River, coastal and Estuarine Morphodynamics, Tsinghua University Press, 2011. p. 57.
- MOTTA, D., ABAD, J.D., LANGENDOEN, E.J., GARCIA, M.H. 2011.** *Floodplain heterogeneity and meander migration.* Beijing : Proceedings of the 7th IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics, Tsinghua University Press, 2011. pp. 1971-1976.
- PROSSER, I.P. et RUSTOMJI, P. 2000.** *Sediment transport capacity relations for overland flow.* : Progress in Physical Geography, 2000. pp. 179-193. Vol. 24.
- Rhône-Alpes, Association Rivière. 2006.** *Quels outils pour la reconquête des espaces de liberté des cours d'eau ?* 2006. p. 86.
- SDAGE-RMC. 1996.** *Orientations fondamentales, mesures opérationnelles et modalité de mise en oeuvre.* 1996. pp. 41 - 74. Vol. 1.
- SIMARD, C., GINGRAS, C. et CAMIRAND, J. 2011.** *L'agriculture au Québec, un changement de paradigme s'impose.* : Nature Québec, 2011. p. 35.
- SUNDBORG, M. 2009.** *Diagnostic d'érosion hydrique dans un bassin versant agricoles au moyen d'indices topographiques dérivés d'un relevé LiDAR aéroporté.* 2009. p. 53.
- VIOLLET, P.L. 2004.** *L'hydraulique dans les civilisations anciennes.* : Presse des Ponts et Chaussées, 2004. pp. 15-20 et 272-278.
- VOCAL FERENCZEVIC, M. et ASHMORE, P. 2012.** *Creating and evaluating digital elevation model-based stream-power map as a stream assessment tool.* : River Research and Applications, 2011. DOI : 10.1002/rra.1523.
- WASSON, J.G., MALAVOI, J.R., MARIDET, L., SOUCHON, Y., PAULIN, L. 1998.** *Impacts écologiques de la chenalisation des rivières.* : CEMAGREF, 1998. p. 160.

WAWRZYNIAK, V. 2009. *Linéarisation des cours d'eau et risque hydrologique : le cas du ruisseau Norton, Sud du Québec.* 2009. p. 37.

WYZGA, B. *River response to channel regulation ; case study of the Raba River, Carpathians, Poland.* : Earth Surface Process and Landforms. pp. 541-556. Vol. 18.

EXTRACTION DU TRACÉ DES COURS D'EAU À PARTIR DES DONNÉES LIDAR

À partir des données LiDAR exploitables¹, le tracé des cours d'eau peut être extrait. La présente fiche décrit la procédure utilisée. Une fois le tracé des cours d'eau obtenu, la plupart des indices hydrogéomorphologiques de base peuvent être déterminés par SIG.

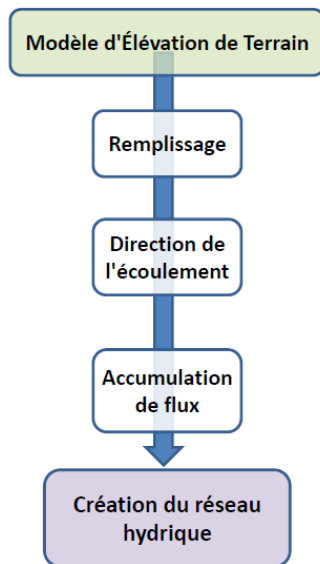


Figure 39 Processus SIG de création du réseau hydrique à partir d'un MNT. Inspiré de Ferencevic et Ashmore, 2012

Les principales étapes pour créer une cartographie des cours d'eau à partir d'un MNT² sont données dans la Figure 39.

1/ Lissage du relevé

La première étape consiste à lisser le relevé d'élévation. L'objectif ici est d'éliminer les cuvettes³ qui sont généralement des imperfections dans les données d'origine. Elles sont rehaussées afin de permettre l'écoulement.

2/ Direction de l'écoulement

Dans un second temps, un raster de direction de l'écoulement est créé. Chaque cellule se voit attribuer une des huit valeurs possibles (Figure 2) correspondant chacune à un sens d'écoulement vers une cellule voisine : 1, vers la cellule Est, 2, vers la cellule Sud-Est, etc. Cette direction est calculée pour chaque cellule à partir de la différence d'altitude qui existe entre elle et ses 8 voisins.



Figure 2 À gauche, le raster d'élévation. Au milieu, le résultat du Flow Direction. À droite indique la correspondance entre la valeur attribué et le sens de l'écoulement : 1=Est,2=Sud-Est, etc.
Source : documentation ArcGis 10.

¹ Par données LiDAR exploitables, on entend les rasters d'élévation obtenus suite au prétraitement de mise à niveau, de ré-échantillonnage, d'élimination des ponts et ponceaux et d'interpolation.

² MNT : un Modèle d'Élévation de Terrain est un raster d'élévation ne prenant pas en compte le sursol.

³ Une cuvette est une cellule ou un ensemble de cellule dont toutes les cellules voisines ont une altitude plus élevée. La direction de l'écoulement, le drainage, de cette cellule ne peut alors pas être déterminé.

EXTRACTION DU TRACÉ DES COURS D'EAU À PARTIR DES DONNÉES LIDAR

3/ Accumulation de flux

À l'aide de la direction de l'écoulement, on peut facilement savoir quelle est l'aire totale qui se draine dans chacune des cellules. C'est l'objet de la troisième étape du processus, par le biais de l'outil d'accumulation de flux. La résolution du raster détermine la surface d'une cellule. D'ores et déjà, ce nouveau raster permet de visualiser les cours d'eau (Figure 3). À partir de l'accumulation de flux, plusieurs études montrent comment obtenir une approximation du débit à chaque cellule d'écoulement [Leclerc et Lapoint, 1995; Benyahya *et al.*, 2009].

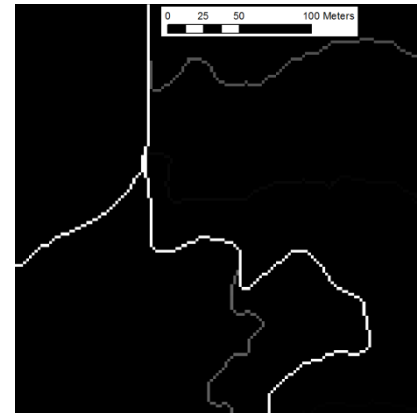


Figure 3 Flow accumulation du LiDAR 2008

4/ Création du réseau hydrique

Cette dernière étape permet d'extraire le réseau hydrique en format vectorielle⁴. Il s'agit d'une simple conversion de fichier à laquelle on applique un seuil minimal de cellules drainées en un point. Ce seuil permet d'éliminer les petits cours d'eau superflus créés par l'accumulation de flux. Sa valeur est fixée empiriquement.

⁴ Ensemble de lignes

EXTRACTION DE LA PENTE LE LONG DES COURS D'EAU

À partir des données LiDAR exploitables¹, on peut extraire la pente le long des cours d'eau. La présente fiche décrit la procédure mise en œuvre à cet effet. La pente est un indice important du portrait hydrogéomorphologique d'un bassin versant. Elle intervient directement dans le calcul de la puissance hydraulique, indicateur de la capacité du cours d'eau à modifier son environnement.

1/ Description du script ProfilExtractor/ProfilReturner

La première étape dans le calcul de la pente est d'extraire l'élévation le long du cours d'eau. Pour cela, le script ProfilExtractor développé en 2007 par Marco Van De Wiel a été utilisé. Il opère simplement à partir du MNT², du raster de direction de flux et d'une cellule considérée comme le début du cours d'eau. Le script d'extraction recherche alors, dans le raster de direction de flux, la cellule dans laquelle l'écoulement se draine. Il en extrait les informations contenues dans le MNT (position et élévation) puis répète le processus de cellule en cellule. L'information est stockée dans un fichier .txt (Figure 1). Il est alors possible d'utiliser l'information altimétrique extraite³ pour calculer la pente à chaque cellule. On peut enfin retourner l'information dans un SIG afin de la visualiser avec le script *ProfileReturner*.

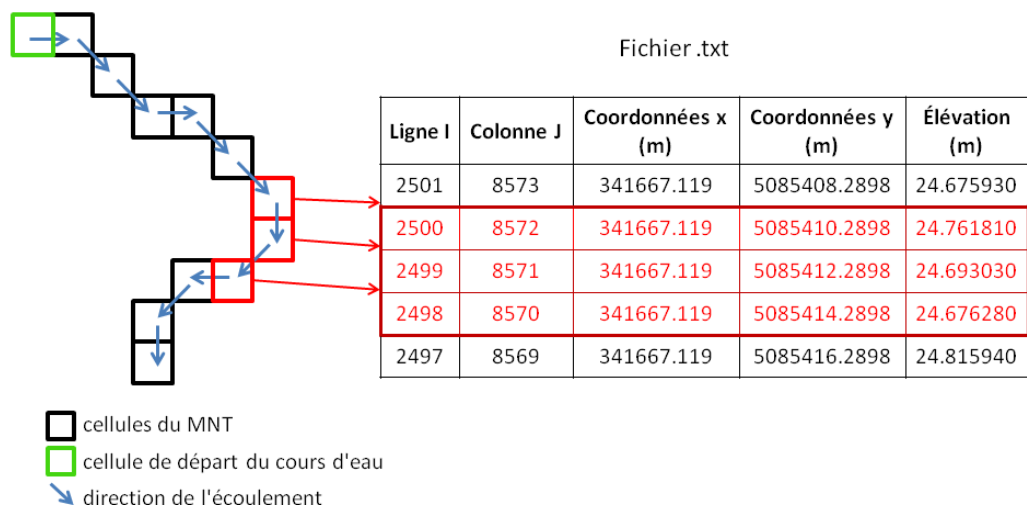


Figure 1 Extraction de l'élévation le long des cours d'eau grâce au script de Marco Van De Wiel (2007)

¹ Par données LiDAR exploitables on entend les rasters d'élévation obtenus suite au prétraitement de mise à niveau, de ré-échantillonnage, d'élimination des ponts et ponceaux et d'interpolation.

² MNT : un Modèle d'Élévation de Terrain est un raster d'élévation ne prenant pas en compte le sursol.

³ L'information extraite dépend du raster en entrée. Dans le cas du MNT, c'est l'élévation qui est stockée, mais dans le cas de la grille de direction de flux, se serait l'aire drainée en chacune des cellules.

EXTRACTION DE LA PENTE LE LONG DES COURS D'EAU

2/ Méthode de calcul de la pente

La précision de la valeur de la pente a une très grande importance sur celle de la puissance hydraulique. Plusieurs études ont été faites pour montrer que selon la méthode utilisée, les relevés LiDAR peuvent fournir de très bonnes approximations de la pente [Ferenčević et Ashmore, 2012]. Celle décrite ici permet de calculer la pente dite "aux 200m".

Il s'agit non pas de déterminer la pente entre deux cellules successives, mais de faire une interpolation linéaire de la pente d'une cellule à partir de l'élévation de cellules distantes de $l = 200m$ (Figure 40). On considère la cellule C située à d de l'origine du cours d'eau. Les cellules fictives C_{-100} et C_{+100} sont elles situées respectivement à $d_{-100} = d - 100m$ et $d_{+100} = d + 100m$ de l'origine. L'altitude de C_{-100} est alors la moyenne de celles des deux cellules qui l'entourent. La même interpolation est faite pour C_{+100} . La pente de la cellule traitée C est donnée par :

$$S = \frac{(z_{-100} - z_{+100})}{200}$$

Cette méthode de calcul a pour effet de lisser la valeur de la pente le long du cours d'eau en diminuant l'effet du bruit et de l'imprécision de mesure dans les relevés LiDAR.

Il faut également faire attention au problème des conditions aux limites. Pour le point situé à l'extrême amont par exemple, il n'est pas possible d'introduire un point fictif amont puisqu'aucune donnée n'y est disponible. Il en est de même

pour les 50 premiers points⁴ et, inversement, pour les 50 derniers points. D'après Ferenčević et Ashmore (2012), l'exactitude de la pente dépend directement de la longueur prise entre les deux points fictifs. Les cours d'eau inscrits dans le projet de la Baie de Lavallière ayant le même ordre de grandeur que ceux traités dans l'étude de Ferenčević et Ashmore, la valeur de 200m a été conservée.

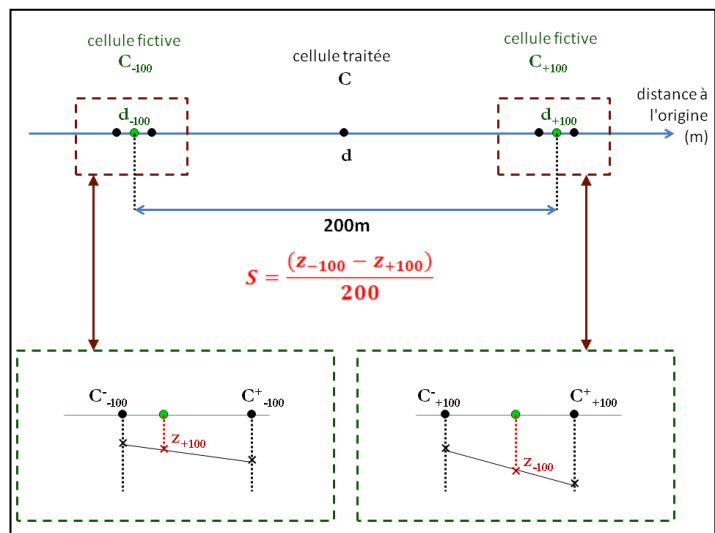


Figure 40 Méthode d'interpolation de la pente

⁴ La distance de 100m entre le point fictif amont et le point traité représente, avec une résolution de 2m par pixel, environ 50 cellules.

EXTRACTION DE LA PENTE LE LONG DES COURS D'EAU

Cet Annexe présente différentes photographies prises lors de la visite de terrain du 13 Avril 2012.



(a)



(b)



(c)



(d)

Photos prises lors de la visite de terrain sur le Site n°1.

En (a) : marque d'affaissement de berge (en rouge) et rupture en cercle (en vert).

En (b) : début du processus de re-méandrisation du cours d'eau.

En (c) : rupture en cercle de la berge.

En (d) : aménagement d'un seuil dissipateur d'énergie (en rouge) et stabilisation des berges attenantes (en bleu).

EXTRACTION DE LA PENTE LE LONG DES
COURS D'EAU



(a)



(b)

Photos prises lors de la visite de terrain sur le Site n°3.

En (a) : affaissement de berge

En (b) : stabilisation de berge par enrochement réalisée dans le cadre du programme d'aide "Prime Vert"



(a)



(b)

Photos prises lors de la visite de terrain sur les Sites n°4b (à gauche) et 5a (à droite).

En (a) : envahissement par la végétation aquatique et absence de marques d'érosion.

En (b) : zone d'écoulement très lent et absence de marques d'érosion.

Auteur : ROUX Clément

Année 2012

Confidentiel : NON

Portrait hydrogéomorphologique d'un bassin versant agricole et processus de re-méandrisation des cours d'eau linéarisés

Le cas de la Baie de Lavallière au Québec

Mots-clés : hydrogéomorphologie, dynamique fluviale, érosion des berges, méandre, sédimentation

Résumé :

La question de l'aménagement et de la gestion des cours d'eau en milieu agricole fait, depuis plusieurs années, l'objet d'une attention toute particulière. La Baie de Lavallière est un bassin versant hautement agricole dont beaucoup de cours d'eau, linéarisés par le passé, sont sujets à une érosion de berges importante.

À travers trois approches distinctes, cette étude dresse un portrait hydrogéomorphologique de la région et se penche sur l'évolution des canaux à travers le temps. D'une analyse d'orthophotographies aériennes anciennes, il ressort le fait que les cours d'eau de la Baie de Lavallière se comportent différemment selon le sous-bassin versant auquel ils appartiennent. Le type de modification qu'ils ont subi et à quelle époque, porte également à conséquence. Plus le cours d'eau a été modifié, plus ses réajustements par érosion seront importants. Ces observations sont confirmées par une analyse des données hydrogéomorphologiques telles que les profils d'élévation des chenaux, leur pente et la puissance hydraulique spécifique à l'échelle de la Baie de Lavallière. Il apparaît clairement que cette dernière donnée peut être perçue comme un indicateur efficace pour localiser les zones à forts potentiel érosif. Grâce à cela, les gestionnaires du territoire et les exploitants agricoles pourront cibler précisément les zones prioritaires sur lesquelles intervenir. Enfin, l'utilisation du modèle numérique RVR Meander a permis de simuler l'évolution de certains canaux au cours du temps. Les acteurs locaux possèdent désormais des ordres de grandeurs sur le processus de re-méandrisation qui affecte les berges et les terres agricoles de la région.

Cette étude a pour vocation de documenter scientifiquement les concertations et les actions menées dans le cadre du projet pilote d'aménagement et de gestion intégrés des cours d'eau et de la zone humide de la Baie de Lavallière. Elle devra être complétée par une analyse plus poussée du probable phénomène de régression de fond et de son impact. Il serait aussi intéressant de réaliser une étude économique comparative entre allouer un espace de mobilité à la rivière et intervenir régulièrement pour lutter contre l'érosion en conservant la forme actuelle du lit des cours d'eau.

Nombre de volume : 1

Nombre total de page du document final : 50

Demandeur : Department of Fluvial Geomorphology (Concordia University) et Institut de Recherche et de Développement en Agroenvironnement, pour le projet de gestion intégrée des cours d'eau et du milieu humide de la Baie de Lavallière.