

**Étude
hydrogéomorphologique :
Restauration de la dynamique
sédimentaire de la rivière
Bécancour dans le secteur de
Black Lake - étude
conceptuelle de faisabilité
(N./Réf. 22-1119)**

**Groupe de concertation des bassins
versants de la zone Bécancour
(GROBEC) et Association de
protection du lac à la Truite d'Irlande
(APLTI)**

MAI 2024

**Groupe de concertation des bassins versants de la zone Bécancour (GROBEC) et
Association de protection du lac à la Truite d'Irlande (APLTI)**

**Étude hydrogéomorphologique : Restauration de la dynamique sédimentaire de la
rivière Bécancour dans le secteur de Black Lake - étude conceptuelle de faisabilité**

08-05-2024

Représentant du client:

Sandrine Desaulniers, B.A. Géographie, M.Sc. Géographie
Directrice adjointe
GROBEC
600 rue Principale, bureau 200, Saint-Ferdinand (Québec) G0N 1N0

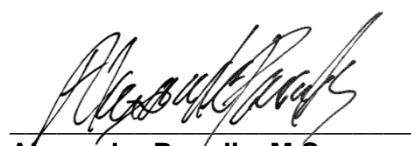
Représentant Avizo Experts-Conseils :

Responsable du projet: Mme Geneviève Marquis, Geo. Ph. D., Hydrogéomorphologue
(OGQ # 2203). Chargée de projets

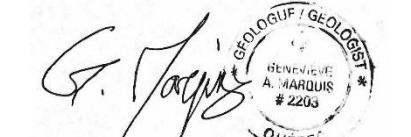
DOSSIER AVIZO: 22-1119

DATE DU RAPPORT 28 mai 2024

RÉDIGÉ PAR :


Alexandre Paradis, M.Sc.
Chargé de projets

VÉRIFIÉ PAR :


Geneviève Marquis, Geo. Ph. D.
Leader d'équipe

Le présent projet bénéficie également de la contribution financière des partenaires suivants :

Association de protection du lac à la Truite d'Irlande (APLTI)

IEN-WMAN Mini Grant

MRC des Appalaches

MRC de l'Érable

Ville de Thetford Mines

Municipalité d'Irlande

HISTORIQUE DES REVISIONS

No	Date	Description	Préparé	Vérifié
00	08-02-2024	Émission préliminaire pour commentaires	AP	GM
01	19-03-2024	Version finale, intégrant les commentaires	AP	GM
02	08-05-2024	Version finale, intégrant une 2 ^e ronde de commentaires	AP	GM
03	28-05-2024	Version finale, intégrant une 3 ^e ronde de commentaires	AP	GM

ÉQUIPE DE RÉALISATION	
Chargée de projet	Geneviève Marquis, Geo. Ph. D., Hydrogéomorphologue
Rédaction	Alexandre Paradis, M.Sc.
Géomatique/terrain	Jerémie Houle-Williams, B.Sc., géomaticien Francis Bonnier-Roy, M. Sc., hydrogéomorphologue
Ingénierie en ressources hydriques	Laura Dumont-Boyer, ing.
Soutien administratif	Lucie De Serres, Biogliste, M. Env.

TABLE DES MATIÈRES

1 MISE EN CONTEXTE	1
2 DESCRIPTION DU SITE.....	2
3 PRINCIPES D'HYDROGÉOMORPHOLOGIE.....	5
3.1 DÉBIT PLEIN BORD	7
3.2 STYLES FLUVIAUX	8
3.3 TRONÇONS HOMOGÈNES.....	10
3.4 ÉLARGISSEMENT DE COURS D'EAU FORTEMENT ANTHROPISES	10
4 DÉMARCHE	12
4.1 DONNÉES RECUEILLIES	12
4.2 MODÉLISATION HYDRAULIQUE	14
4.2.1 <i>Volet hydrologique</i>	14
4.2.2 <i>Modélisation hydraulique</i>	15
4.3 ANALYSES HYDROGÉOMORPHOLOGIQUES.....	17
4.3.1 <i>Analyse historique</i>	17
4.3.2 <i>Analyses granulométriques</i>	17
4.3.3 <i>Délimitation de tronçons homogènes</i>	18
4.3.4 <i>Indice de connectivité sédimentaire</i>	18
4.3.5 <i>Indice de qualité morphologique</i>	20
5 RÉSULTATS DE CARACTÉRISATION.....	21
5.1 PRINCIPALES OBSERVATIONS TERRAIN	21
5.2 ANALYSE HISTORIQUE	21
5.3 ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE	27
5.4 ANALYSE HYDRAULIQUE	30
5.5 TRONÇONS HOMOGÈNES.....	34
5.5.1 <i>Tronçon aval</i>	35
5.5.2 <i>Tronçon intermédiaire</i>	35
5.5.3 <i>Tronçon amont</i>	36
5.6 ANALYSE DU STYLE FLUVIAL	37
5.7 INDICE DE CONNECTIVITÉ SÉDIMENTAIRE	39
5.8 INDICE DE QUALITÉ MORPHOLOGIQUE	41

6 ANALYSE DU SCÉNARIO DE DÉVIATION PROPOSÉ	45
6.1 CAPACITÉ DE SÉDIMENTATION DANS LA FOSSE LAC D'AMIANTE	46
6.2 DYNAMIQUE HYDROGÉOMORPHOLOGIQUE À L'aval de la fosse Lac d'Amiante projetée	48
6.3 DYNAMIQUE HYDROGÉOMORPHOLOGIQUE EN AMONT DE LA FOSSE LAC D'AMIANTE PROJETÉE	50
6.4 SYNTHÈSE	53
7 CONCLUSION	58
8 LIMITATIONS	58
9 RÉFÉRENCES.....	59

TABLE DES FIGURES

FIGURE 1 : LOCALISATION DU SECTEUR À L'ÉTUDE, DES HALDES BORDANT LA RIVIÈRE BÉCANCOUR ET DES LACS FLUVIAUX À L'aval	4
FIGURE 2 : SECTEUR À L'ÉTUDE ET DÉVIATION PROPOSÉE.....	5
FIGURE 3 : ILLUSTRATION CONCEPTUELLE DE LA BALANCE DE LANE (1955).	6
FIGURE 4 : ILLUSTRATION CONCEPTUELLE DE L'INFLUENCE DU DÉVELOPPEMENT (URBAIN, AGRICOLE, ETC.) SUR L'HYDROLOGIE D'UN BASSIN VERSANT (ADAPTÉ DE ELLIOTT ET AL., 2010).	6
FIGURE 5 : ILLUSTRATION DU DÉBIT PLEIN BORD (CHARRAIS ET AL., 2014).	7
FIGURE 6 : ILLUSTRATION CONCEPTUELLE DES FACTEURS DE CONTRÔLES SUR LE STYLE FLUVIAL (CHURCH, 2006).	9
FIGURE 7 : ILLUSTRATION CONCEPTUELLE DE TRONÇONS HOMOGÈNES DANS UN BASSIN VERSANT (LINKE ET AL., 2019).	10
FIGURE 8 : ILLUSTRATION CONCEPTUELLE D'ÉVOLUTION DE COURS D'EAU FORTEMENT ANTHROPOISÉS (ADAPTÉ DE SIMON ET HUPP, 1986).	11
FIGURE 9 : EXEMPLE DE MARQUE D'ÉROSION COHÉRENTE ASSOCIÉE AU DÉBIT PLEIN BORD MESURÉE SUR LE TERRAIN (RIVE GAUCHE, ENVIRON 200 MÈTRES EN AMONT DU PONT DE LA 112).....	13
FIGURE 10 : LOCALISATION DES POINTS DE CHANGEMENT DE DÉBITS ET DE LA STATION HYDROMÉTRIQUE DANS LE SECTEUR À L'ÉTUDE.....	14
FIGURE 11 : SECTIONS TRANSVERSALES INTÉGRÉES AU MODÈLE HYDRAULIQUE ET POINTS DE MESURE TERRAIN.....	16

FIGURE 12 : ÉCHANTILLONNAGE SÉDIMENTAIRE EFFECTUÉ DANS LE SECTEUR À L'ÉTUDE.....	18
FIGURE 13 : TRACÉS DE LA RIVIÈRE BÉCANCOUR POUR LES ANNÉES 1950, 1979, 2021.....	22
FIGURE 14 : RIVIÈRE BÉCANCOUR ET RUISSAU NADEAU À PROXIMITÉ DU LAC NOIR (1950).....	23
FIGURE 15 : PHOTOGRAPHIES AÉRIENNES ILLUSTRANT L'ÉVOLUTION DES BANCS D'ACCUMULATION EN AVAL DU BOULEVARD DES MINEURS (PHOTOGRAPHIES DE 2007 À 2020 EXTRAITES D'INFO-SOLS).....	25
FIGURE 16 : TOPOGRAPHIE DU SEGMENT INTERMÉDIAIRE MONTRANT UN REHAUSSEMENT ARTIFICIEL DU TALUS EN RIVE GAUCHE.....	26
FIGURE 17 : TYPES DE DÉPÔTS CONSTITUANT LES HALDES DU SECTEUR À L'ÉTUDE (MDDEFP, 2013).....	27
FIGURE 18 : DISTRIBUTION GRANULOMÉTRIQUE DES DEUX BANCS AYANT FAIT L'OBJET D'UN PEBBLE COUNT.	28
FIGURE 19 : VARIATION DU RATIO D'ARMURAGE EN FONCTION DES APPORTS SÉDIMENTAIRES – TARRÍO ET AL. (2020).	29
FIGURE 20 : PROFIL LONGITUDINAL EXTRAIT DE HEC-RAS POUR LE DÉBIT DE RÉCURRENCE 2 ANS ET MARQUEURS D'ÉROSION ASSOCIÉS AU DÉBIT PLEIN BORD (POINTS ROUGES).....	30
FIGURE 21 : PROFIL LONGITUDINAL EXTRAIT DE HEC-RAS POUR UN DÉBIT DE 62 m ³ /s (SLS000853) ET 75 m ³ /s (SLS000851) ET ÉLEVATION DE CICATRICES GLACIELLES (POINTS ROUGES).....	31
FIGURE 22 : PIUSSANCE SPÉCIFIQUE CALCULÉE POUR LE DÉBIT DE RÉCURRENCE 2 ANS.	32
FIGURE 23 : PRÉSENCE D'AJUSTEMENT MORPHOLOGIQUE DANS LES COURS D'EAU LINÉARISÉS EN FONCTION DE LA PIUSSANCE SPÉCIFIQUE (BROOKES, 1988). ..	32
FIGURE 24 : COMPÉTENCE DE LA RIVIÈRE BÉCANCOUR AU DÉBIT DE RÉCURRENCE 2 ANS.	33
FIGURE 25 : TRONÇONS HOMOGÈNES DÉLIMITÉS DANS LA PRÉSENTE ÉTUDE.	34
FIGURE 26 : ILLUSTRATION REPRÉSENTATIVE DU TRONÇON AVAL.	35
FIGURE 27 : ILLUSTRATION REPRÉSENTATIVE DU TRONÇON INTERMÉDIAIRE.	36
FIGURE 28 : ILLUSTRATION REPRÉSENTATIVE DU TRONÇON AMONT.....	37
FIGURE 29 : COURBE DE DISTINCTION DU STYLE FLUVIAL TIRÉE DE LEOPOLD ET WOLMAN (1957) – LES TRONÇONS AMONT (CARRÉ), INTERMÉDIAIRE (CERCLE) ET AVAL (TRIANGLE) DU SECTEUR À L'ÉTUDE ONT ÉTÉ AJOUTÉS POUR LE DÉBIT PLEIN-BORD ASSOCIÉ AUX MARQUEURS PRÉSENTS EN AVAL (ROUGE) ET LE DÉBIT DE RÉCURRENCE 2 ANS (BLEU).....	38

FIGURE 30 : INDICE DE CONNECTIVITÉ SÉDIMENTAIRE DU BASSIN VERSANT AMONT DE LA RIVIÈRE BÉCANCOUR – LES VALEURS ÉLEVÉES SONT DÉFINIES PAR UNE COULEUR ROUGE.....	40
FIGURE 31 : ÉVOLUTION TEMPORELLE DE L'INDICE DE QUALITÉ MORPHOLOGIQUE POUR LES TROIS TRONÇONS À L'ÉTUDE (PASSÉ, ACTUEL, PROJETÉ).....	44
FIGURE 32 : SITE ANALOGUE À L'EXUTOIRE DU LAC NOIR EN 1950 (GAUCHE) VISIBLE AU NIVEAU DU LAC BOLDUC EN 2022 (DROITE).....	49
FIGURE 33 : PROJECTION DE L'ÉTENDUE DE CHAQUE AMÉNAGEMENT DE COURS D'EAU PROJETÉ.	56

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1. DÉBITS RETENUS POUR LA MODÉLISATION.....	15
TABLEAU 2. INTRANTS NÉCESSAIRES POUR LE MODÈLE SDR DE INVEST	19
TABLEAU 3. CHANGEMENTS PAR RAPPORT AUX CONDITIONS EN 1950 (C1-C3 ET A1 – A12)	42
TABLEAU 4. CHANGEMENTS PAR RAPPORT AUX CONDITIONS EN 1950 (F1-F13)	43
TABLEAU 5. CALCULS DE SÉDIMENTATION DANS LA FOSSE LAC D'AMIANTE (VERT : INTERCEPTION DES SÉDIMENTS / ROUGE : NON-INTERCEPTION DES SÉDIMENTS)	47
TABLEAU 6. ORIENTATIONS DE CONCEPTION DU PROJET DE DÉVIATION DE LA RIVIÈRE BÉCANCOUR DANS LA FOSSE LAC D'AMIANTE D'UN POINT DE VUE HYDROGÉOMORPHOLOGIQUE. LES AUTRES ENJEUX (ÉCOLOGIQUES, BIOPHYSIQUES, FINANCIERS, SOCIAUX, ETC.) NE FONT PAS L'OBJET DE CETTE ÉTUDE ET DEVONT ÊTRE CONSIDÉRÉS DANS DES ÉTAPES ULTÉRIEURES.....	57

TABLE DES ANNEXES

ANNEXE A REPORTAGE PHOTOGRAPHIQUE

ANNEXE B GRILLE DE CALCUL DE L'IQM

1 MISE EN CONTEXTE

L'exploitation de l'amiante a généré sur le territoire de Thetford Mines plusieurs reliques indésirables, vestiges d'une activité économique autrefois incontournable. Plusieurs puits d'exploitation d'envergure de même que d'immenses monticules de résidus miniers appelés haldes figurent parmi ce leg environnemental. Ces dernières présentent plusieurs enjeux en raison de leur instabilité (faible capacité de colonisation par la végétation), de leur toxicité (amiante résiduel, métaux), mais également de leur impact écologique général sur le système fluvial de la rivière Bécancour. En effet, des problèmes de sédimentation et d'eutrophisation sont observés depuis plusieurs décennies dans les lacs fluviaux de la rivière Bécancour en aval de Thetford Mines, soit l'étang Stater, le lac à la Truite d'Irlande, le lac William et le lac Joseph. Avec le soutien continu de l'Association de protection du lac à la Truite d'Irlande (APLTI), le Groupe de concertation des bassins versants de la zone Bécancour (GROBEC) a mené des travaux diagnostiques ces dernières années supportant l'hypothèse que les haldes bordant la rivière Bécancour constituent une source sédimentaire problématique.

En parallèle, Olivier Jacques et Reinhard Pienitz de l'université Laval ont publié en mai 2022 un rapport offrant cette fois-ci un éclairage scientifique catégorique sur ce phénomène grâce à des analyses paléolimnologiques détaillées. Celles-ci montrent effectivement que les lacs fluviaux nommés précédemment subissent des taux de sédimentation très élevés par rapport à leur état naturel et que ceux-ci sont en grande partie attribuables aux activités minières dans le bassin versant. La situation s'est par ailleurs empirée avec la déviation de la rivière Bécancour et l'assèchement du lac Noir dans le secteur de Black Lake au milieu du 20^e siècle.

Pour certaines haldes du territoire de Thetford Mines, des travaux de stabilisation de pente par végétalisation sont en cours ou ont été complétés. Des solutions visant à revaloriser les résidus miniers riches en métaux font également l'objet de discussions actives entre les divers acteurs du milieu. Malheureusement, certaines haldes ne pourront ni faire l'objet d'une revalorisation ni d'une végétalisation en raison de leur configuration précaire, à proximité du lit d'écoulement de la rivière Bécancour. En effet, tel que discuté durant l'épisode intitulé *Restaurer l'impossible* de l'émission La Semaine Verte, les risques de ruptures de pentes durant d'éventuels travaux sont trop importants pour assurer la sécurité des travailleurs et la préservation du milieu fluvial adjacent. Or, ce sont ces haldes riveraines qui contribuent le plus significativement à l'excès sédimentaire identifié en raison de leur forte connectivité au corridor fluvial. Une troisième solution existe pour faire face à ce défi, tel qu'évoqué entre autres dans un rapport professionnel de Miroslav Chum (produit en 2020 pour le compte de l'APLTI), soit la déviation de la rivière Bécancour dans la fosse Lac d'Amiante (plan d'eau associé à la mine aménagée après l'assèchement du lac Noir). Le rapport de Jacques et Pienitz (2022) fait d'ailleurs écho aux bénéfices de restaurer une capacité de rétention sédimentaire en amont de l'étang Stater (fonction autrefois assurée par le lac Noir) pour atténuer la pression environnementale sur les lacs fluviaux de la rivière Bécancour. Le rapport de Chum propose quelques scénarios avec leurs contraintes et coûts respectifs. De façon générale, celui-ci arrive à la conclusion qu'un scénario de déviation est possible sur le plan technique.

Ce travail constitue un tout premier examen de cette possibilité et s'est essentiellement concentré sur les contraintes hydrauliques et économiques avec un bref survol des dynamiques sédimentaires.

Le présent rapport se veut dans la continuité du travail de Chum, en offrant des analyses plus détaillées et en considérant cette fois-ci le scénario de déviation principalement sous l'angle de l'hydrogéomorphologie. Cette discipline en pleine expansion au Québec est un incontournable en matière d'aménagement de cours d'eau, particulièrement dans un cas complexe comme celui du bassin versant amont de la rivière Bécancour. En plus de considérer les aspects hydrologiques et hydrauliques, l'approche hydrogéomorphologique analysera également le volet sédimentaire offrant ainsi une meilleure vue d'ensemble de la trajectoire actuelle et projetée du système fluvial.

Ainsi, les objectifs de la présente étude sont de :

- 1) Caractériser le segment de la rivière Bécancour dans le secteur de Black Lake où la déviation est prévue à l'aide d'une approche combinant analyses historique, hydrologique, hydraulique et hydrogéomorphologique ;
- 2) Déterminer les principaux enjeux hydrogéomorphologiques liés au scénario de déviation envisagé, notamment la capacité de la fosse Lac d'Amiate à intercepter la fraction sédimentaire responsable du phénomène de sédimentation des lacs fluviaux en aval de même que les processus fluviaux dominants à anticiper au niveau des tronçons de déviation;
- 3) Formuler des recommandations permettant d'orienter la conception des tronçons déviés envisagés, de manière à favoriser l'atteinte d'un état d'équilibre dynamique dans le système fluvial.

En somme, la présente étude constituera un point d'appui essentiel pour les analyses subséquentes afin de favoriser l'atteinte d'un état d'équilibre, mais également pour faciliter les interactions avec le ministère de l'Environnement qui aurait exigé de toute façon des éclaircissements hydrogéomorphologiques à des étapes subséquentes. Cette approche proactive facilitera donc le cheminement d'un tel scénario d'aménagement sur tous les fronts.

2 DESCRIPTION DU SITE

La rivière Bécancour débute son parcours à l'exutoire du lac Bécancour. La qualité de l'eau est bonne à cet endroit, mais se dégrade rapidement au contact de parcelles agricoles, puis du territoire urbanisé de la ville de Thetford Mines. Le phénomène de surverse lors d'événements pluvieux figure parmi les problèmes les plus importants pour la qualité de l'eau dans ce secteur. C'est également à partir de ce moment que les haldes de résidus miniers font leur apparition, notamment celles liées à l'exploitation de la mine King-Beaver. La rivière quitte ensuite le noyau urbain et parcourt un secteur boisé parsemé de haldes. Le gradient de la rivière est important sur ce segment (environ 1 %) qui se poursuit jusqu'au secteur de Black Lake. À partir du boulevard des Mineurs, un adoucissement brusque de la pente se produit (environ 0.15%) et celle-ci s'adoucit encore davantage à partir de la route 112 (environ 0.08%).

Ensuite, sur une distance d'environ 15 km, la rivière Bécancour présente peu de variabilité jusqu'à l'étang Stater, premier des quatre plans d'eau subissant les problèmes de sédimentation présentés précédemment. La Figure 1 offre une vue d'ensemble des éléments discutés jusqu'ici – incluant le bassin versant qui est d'une superficie de 178 km² dans le secteur de Black Lake.

Le scénario de déviation proposé se situe entre le boulevard des Mineurs et la route 112. En effet, étant donné le réaménagement récent de la 112 et des enjeux techniques complexes liés à la présence de résidus miniers, il n'est pas réaliste de considérer une déviation plus étendue vers l'aval qui requerrait la construction d'un nouveau pont. La Figure 2 illustre le scénario de déviation adapté de Chum auquel une deuxième option de tronçon aval a été ajoutée afin de maximiser la distance séparant les tronçons amont et aval dans la fosse Lac d'Amiante.

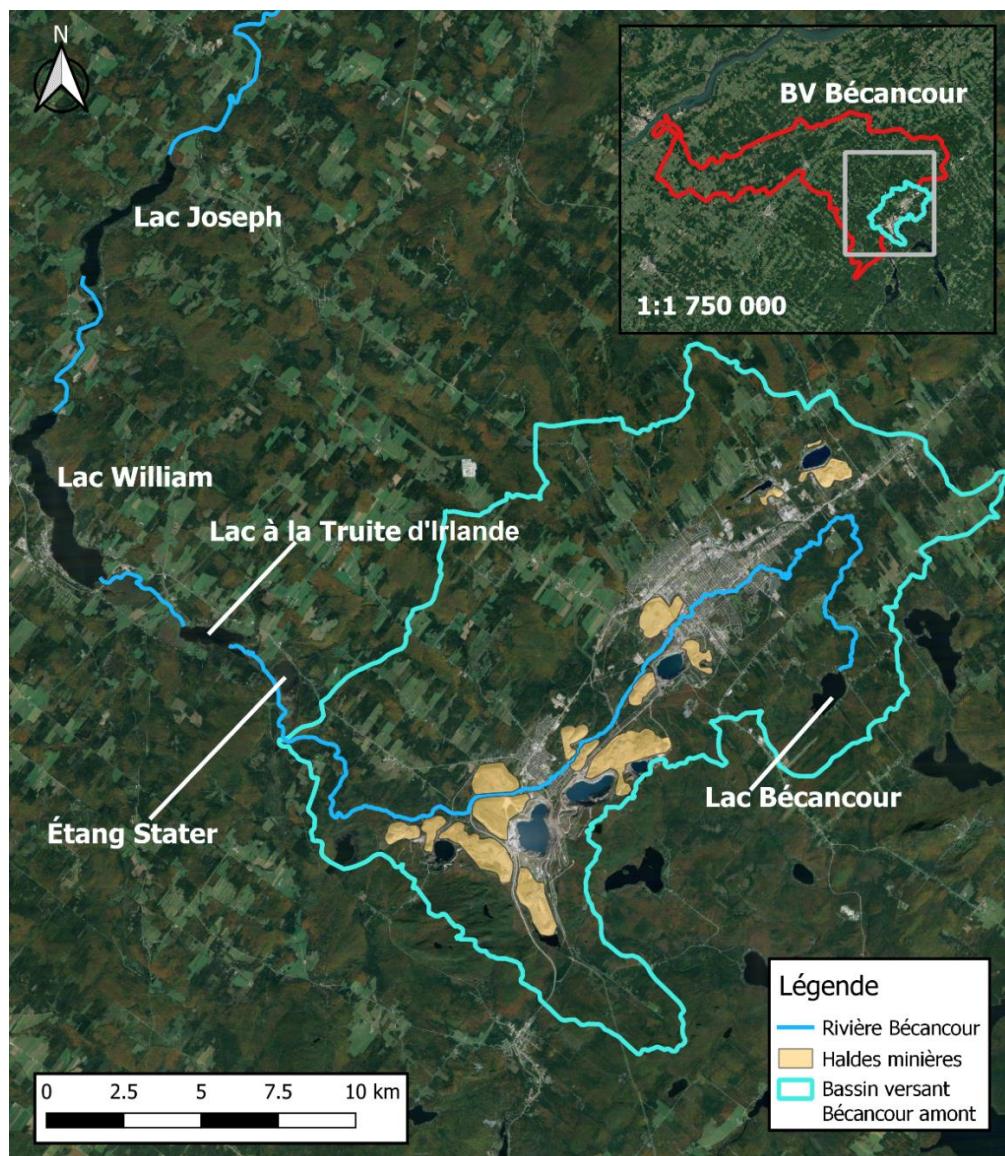


Figure 1 : Localisation du secteur à l'étude, des haldes bordant la rivière Bécancour et des lacs fluviaux à l'aval.

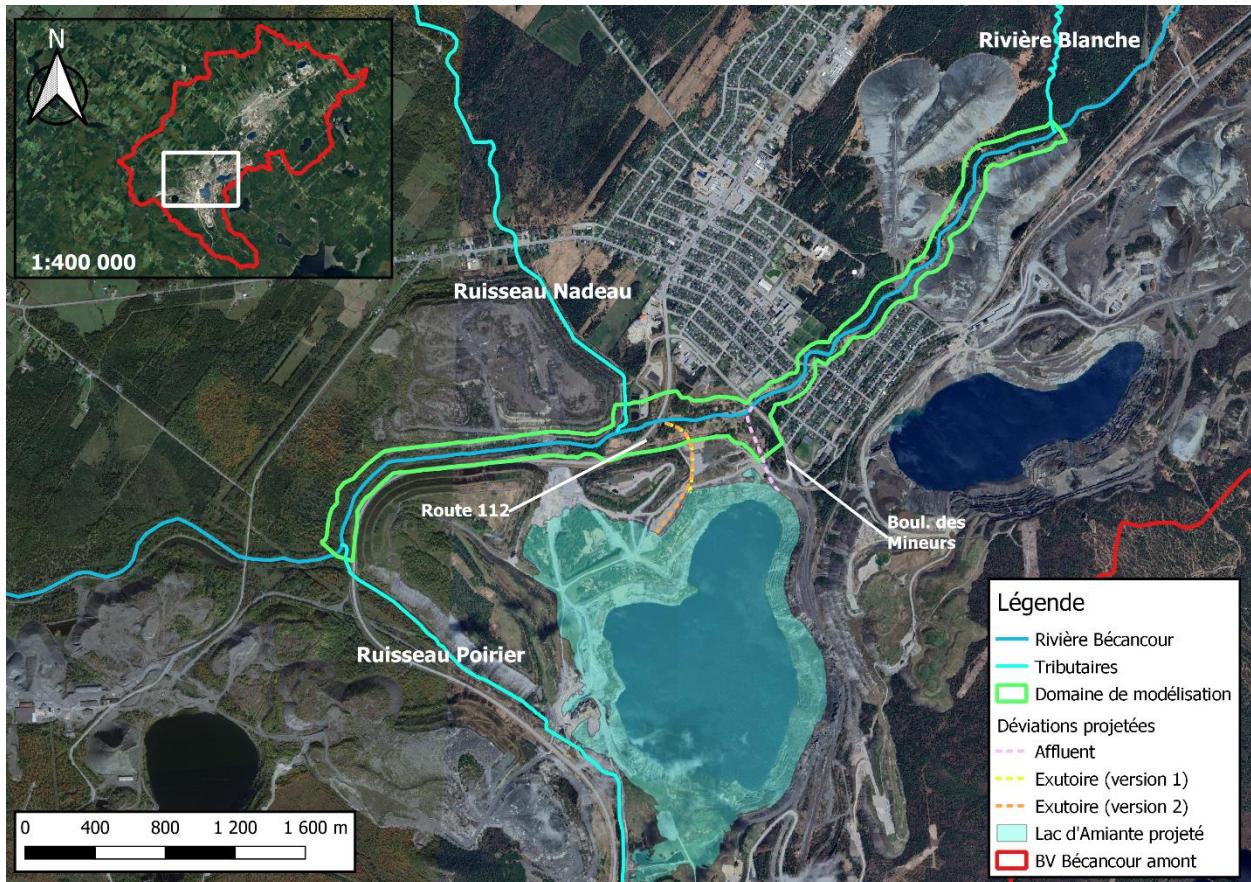


Figure 2 : Secteur à l'étude et déviation proposée.

Notons que pour des fins de clarté, le reste du rapport fera référence aux tronçons actuels ainsi : aval, intermédiaire et amont. Pour les tronçons de déviation projetés, ceux-ci seront plutôt désignés ainsi : affluent projeté de la fosse Lac d'Amiante et effluent projeté de la fosse Lac d'Amiante.

3 PRINCIPES D'HYDROGÉOMORPHOLOGIE

L'hydrogéomorphologie est une discipline qui s'intéresse au cours d'eau en tant qu'agent de modification du paysage. Cette vision sous-entend donc que le milieu fluvial est dynamique, non seulement d'un point de vue hydrologique et hydraulique, mais également au niveau sédimentaire. Cette vision holistique permet une meilleure compréhension des phénomènes se produisant à des échelles variées dans un réseau hydrographique donné.

La dynamique sédimentaire est représentée de façon conceptuelle à l'aide d'une balance (Figure 3 – Lane, 1955) et permet entre autres de bien sentir l'influence des modifications anthropiques dans les déséquilibres observés.

Par exemple, les débits solides excessifs issus des activités minières entraînent de la sédimentation. À l'autre extrême, l'urbanisation (imperméabilisation, surverses, etc.) entraîne une augmentation prononcée des débits liquides (Figure 4) ce qui augmente la capacité érosive du cours d'eau récepteur (contribuant ensuite également aux excès sédimentaires).

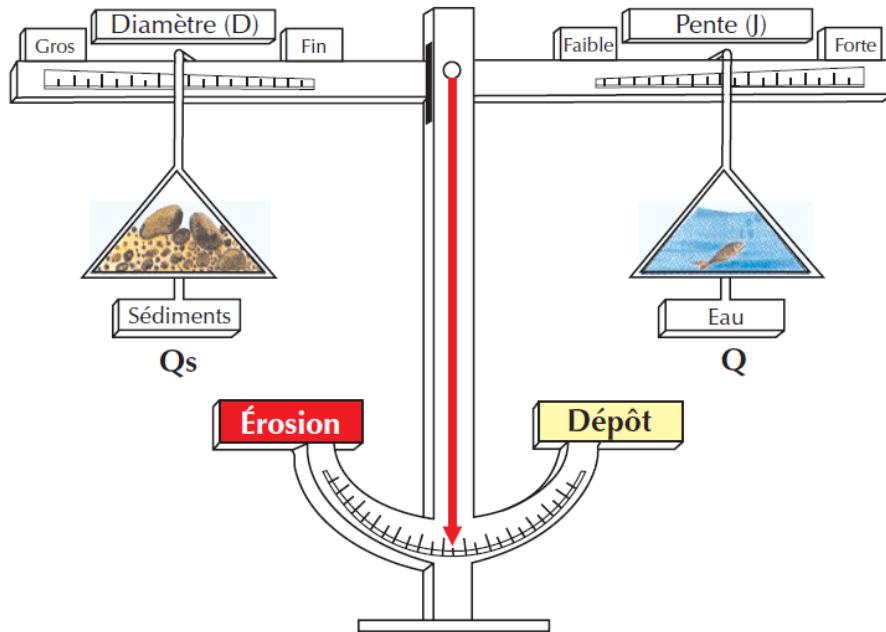


Figure 3 : Illustration conceptuelle de la balance de Lane (1955).

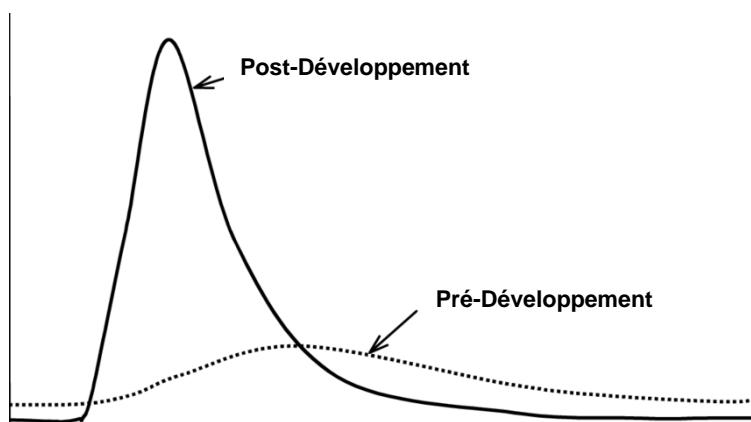


Figure 4 : Illustration conceptuelle de l'influence du développement (urbain, agricole, etc.) sur l'hydrologie d'un bassin versant (adapté de Elliott et al., 2010).

Une autre influence humaine indirecte a pris de l'ampleur ces dernières décennies et agit de façon prononcée sur l'hydrologie : les changements climatiques. En effet, selon l'Atlas hydroclimatique du Québec méridional (2015), les crues seront plus intenses à l'été et à l'automne dans cette région.

En somme, la discipline hydrogéomorphologique offre une vision compréhensive et complète des problèmes vécus dans un bassin versant. Les cours d'eau fortement modifiés, tels la rivière Bécancour, présentent d'ailleurs un niveau de complexité qui renforce la nécessité de s'appuyer sur cette science. Les objectifs d'amélioration de la qualité de l'eau sont intimement liés à la mobilité des sédiments et la vision holistique de l'hydrogéomorphologie permettra de les rencontrer de façon optimale.

Quelques principes fondamentaux additionnels, particulièrement pertinents pour la présente étude, sont présentés ci-bas.

3.1 DÉBIT PLEIN BORD

Le débit plein bord revêt une importance capitale en hydrogéomorphologie puisqu'il s'agit la plupart du temps du débit morphogène. Autrement dit, il s'agit du débit effectuant le plus grand travail géomorphologique et est donc responsable de la morphologie du cours d'eau. La Figure 5 ci-bas illustre le niveau d'eau associé à ce débit dans un contexte naturel. Il s'agit d'un débit remplissant le lit mineur tout juste avant qu'il ne déborde sur la plaine inondable (lit majeur). L'énergie davantage concentrée ainsi que la récurrence relativement fréquente, en fait donc un agent de changement beaucoup plus efficace qu'une crue de plus forte magnitude. Évidemment, dans un contexte de cours d'eau linéarisés et approfondis (p. ex. rivière Bécancour dans le secteur du lac Noir aujourd'hui disparu), des débits de plus forte magnitude peuvent être contenus avant de déborder. Cependant, la fréquence du passage du débit plein bord demeure un facteur d'importance et celui-ci reste donc pertinent même dans ce contexte.

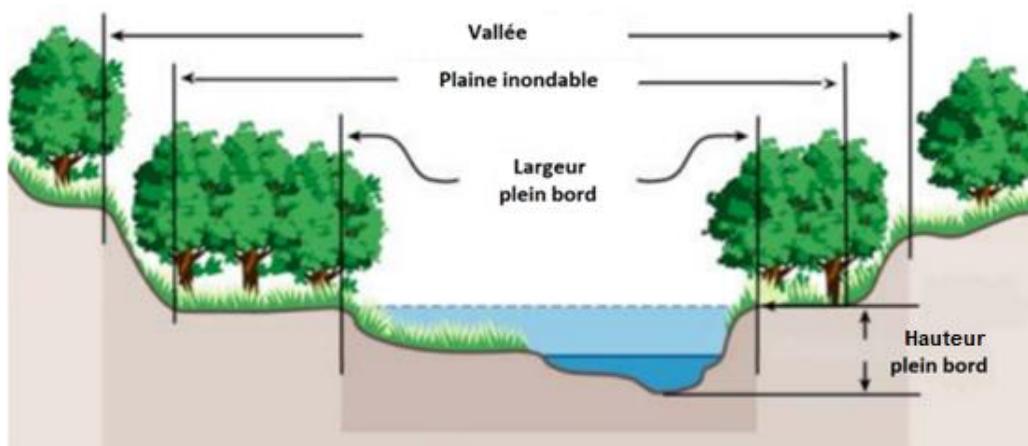


Figure 5 : Illustration du débit plein bord (Charrais et al., 2014).

Selon une littérature scientifique abondante, le débit plein bord en milieu naturel possède une récurrence hydrologique se situant généralement entre 1.5 et 2 ans. Dans un contexte de bassin versant présentant plusieurs modifications anthropiques (urbanisation, activité minière, agriculture, etc.), la théorie perd évidemment en précision, mais de façon générale celle-ci tend à être inférieure. Dans le cadre du présent projet, le volet hydrologique ne sera pas développé au point de déterminer une valeur précise de récurrence hydrologique pour le débit plein bord. L'objectif étant plutôt de contraster les tronçons entre eux.

3.2 STYLES FLUVIAUX

Le milieu fluvial présente un potentiel de variabilité morphologique important, généralement catégorisé en styles fluviaux. Ces styles, présentés à la Figure 6, sont issus de nombreux contrôles hydrosédimentaires, principalement : les sources sédimentaires, la pente et la taille des sédiments. Évidemment, il existe ici un lien clair avec le concept de balance de Lane (1955). Alors que ce dernier suggère une réponse fluviale générale (érosion/régression, sédimentation/aggradation), le modèle conceptuel illustré à la Figure 6 propose quant à lui d'identifier le style fluvial qui accompagnera cette réponse. Par exemple, les environnements qui tendent à produire un volume sédimentaire considérable comme dans les rivières de bassins versants très montagneux entraînent selon le modèle de Lane une aggradation du lit. Cette aggradation augmente la pente de manière à mieux évacuer la charge sédimentaire. En termes de styles fluviaux, ces paramètres tendent à produire un style fluvial divagant ou encore à tresses. Au Québec, les principaux styles fluviaux rencontrés sont : rectiligne, sinueux, à méandres et divagant. Il n'est cependant pas exclu que des environnements particuliers puissent produire d'autres styles fluviaux moins courants. Également, il est très courant – particulièrement pour les bassins versants fortement anthropisés, d'observer un style fluvial différent de ce qui devrait être attendu à l'état naturel.

L'analyse de documents historiques (photographies, cartes et autres) montrant un état se rapprochant des conditions naturelles tend à illustrer parfaitement ce type de perturbations. Ceci peut être dû à une intervention directe au niveau du chenal (p.ex. linéarisation) ou encore à des modifications majeures dans le bassin versant (p. ex. barrages, activités minières, forestières, agricoles, etc.). En somme, la considération du style fluvial est cruciale dans l'analyse d'un système fluvial et révèle souvent des indices clés sur la trajectoire hydrogéomorphologique pouvant être anticipée à court, moyen et long terme.

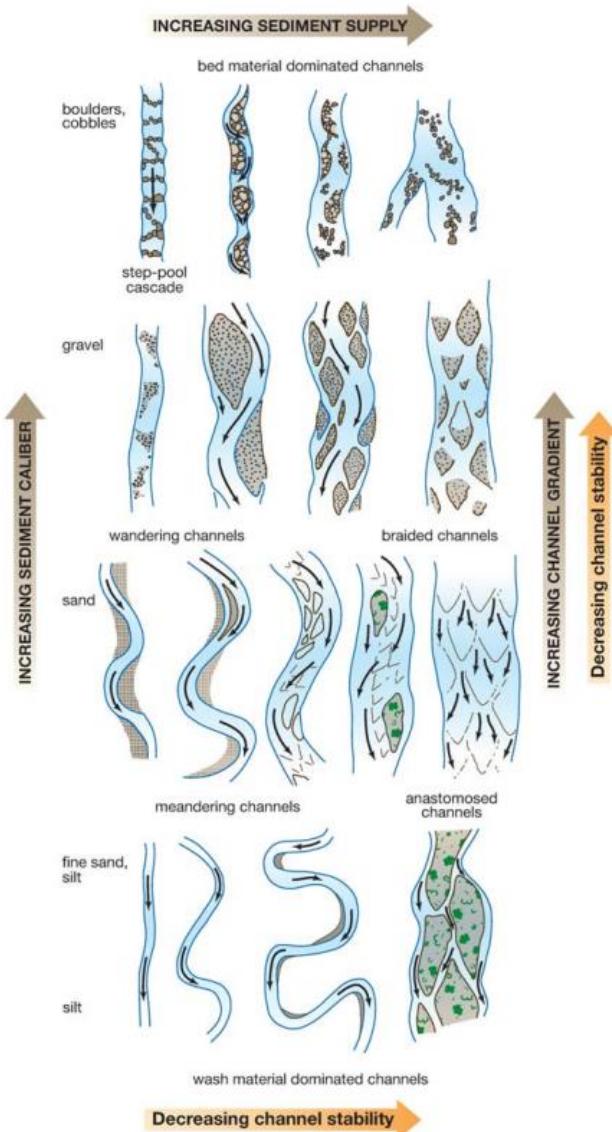


Figure 6 : Illustration conceptuelle des facteurs de contrôles sur le style fluvial (Church, 2006).

3.3 TRONÇONS HOMOGÈNES

L'hydrogéomorphologie aborde le milieu fluvial en tant que continuum, mais il est toujours pertinent pour l'esprit humain d'en faire une dichotomie afin de faciliter la compréhension des processus en cours. Les tronçons homogènes sont couramment appliqués afin de réaliser cet objectif. Il s'agit de segments de cours d'eau possédant des conditions uniformes sur une multitude de facettes (Figure 7). Parmi celles-ci figurent : les processus géomorphologiques dominants, les caractéristiques d'écoulement, le contexte pédologique et la végétation.

Dans le cadre de cette étude, les tronçons homogènes permettront ultimement d'aborder le territoire de façon ordonnée et d'apporter des solutions adaptées à chacune des catégories de tronçons.

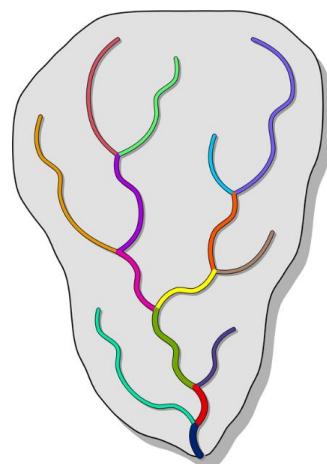


Figure 7 : Illustration conceptuelle de tronçons homogènes dans un bassin versant (Linke et al., 2019).

3.4 ÉLARGISSEMENT DE COURS D'EAU FORTEMENT ANTHROPISES

Les cours d'eau linéarisés sont particulièrement sensibles aux pressions hydrologiques issues d'un bassin versant anthropique. En effet, la capacité hydraulique supérieure au plein bord naturel fait en sorte que le cumul des altérations hydrologiques se manifeste d'une façon particulièrement énergique. Le modèle conceptuel d'évolution de cours d'eau linéarisé développé par Simon et Hupp (1986) s'applique particulièrement bien dans ce contexte (Figure 8). On y remarque une succession d'érosion régressive, puis d'élargissement dans le but d'atteindre un nouvel état d'équilibre. Évidemment, le concept de la balance de Lane présenté plus haut est intimement lié à cette trajectoire d'ajustements géomorphologiques. Le modèle conceptuel de Simon et Hupp (1986) est un incontournable dans les contextes anthropisés et servira de point d'appui essentiel lorsqu'il sera question d'élaborer des solutions adaptées aux dynamiques hydrogéomorphologiques en cours.

Alors que la balance de Lane permet de comprendre une perturbation dans un système à l'équilibre, ce modèle permet de suivre l'évolution d'un système perturbé.

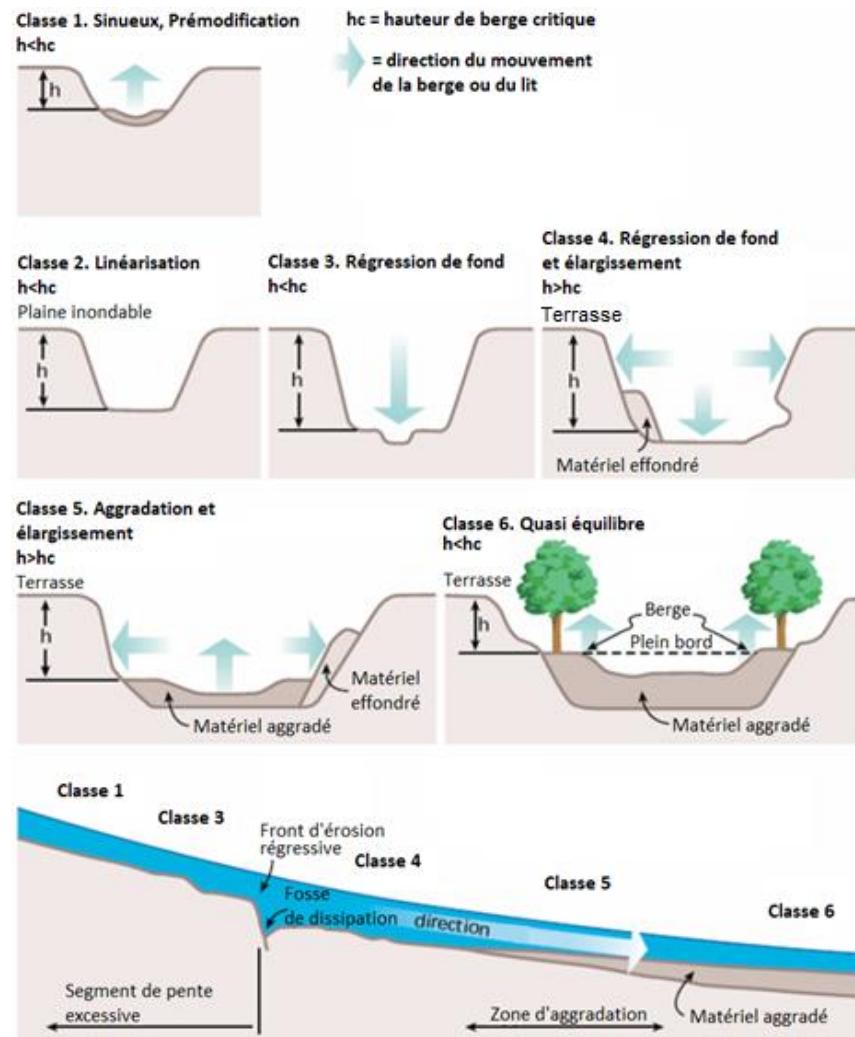


Figure 8 : Illustration conceptuelle d'évolution de cours d'eau fortement anthropisés (adapté de Simon et Hupp, 1986).

4 DÉMARCHE

Tel qu'évoqué précédemment, la démarche du présent projet s'appuie sur des analyses variées, généralement regroupées sous les *quatre H*, soit : historique, hydrologie, hydraulique et hydrogéomorphologie. Ces disciplines ont servi à produire une caractérisation détaillée de la rivière Bécancour et ainsi d'identifier les principaux enjeux liés au scénario de déviation. Une deuxième série d'analyses a ensuite été produite afin d'examiner plus attentivement les questions touchant directement le scénario de déviation proposé :

- 1) Capacité de rétention des sédiments dans la fosse Lac d'Amiante;
- 2) Dynamique fluviale dans l'affluent projeté de la fosse Lac d'Amiante;
- 3) Dynamique fluviale dans l'effluent projeté de la fosse Lac d'Amiante.

Sur la base de ces analyses, nous évaluerons d'abord la faisabilité de la déviation d'un point de vue hydrogéomorphologique. Ensuite, diverses recommandations ont pu être formulées afin entre autres d'orienter l'élaboration de critères de conception durant l'étude d'avant-projet. Les recommandations visent essentiellement à évaluer les contraintes et les opportunités permettant de concevoir des chenaux de déviation ayant une qualité géomorphologique permettant de supporter des fonctions écologiques.

Les prochaines sous-sections exposent plus en détail les différentes étapes réalisées.

4.1 DONNÉES RECUEILLIES

Les données numériques recueillies sont détaillées ci-dessous :

- ❖ Études pertinentes (GROBEC 2015-2021-2022-2023, Jacques et Pienitz 2022, FNX-Innov 2021, Chum 2020, RAPPEL 2018 et 2019)
- ❖ Données topographiques LiDAR de 2018 – MNT résolution 1 mètre (MRNF);
- ❖ Imagerie satellitaire du 29 septembre 2022 (Google);
- ❖ Photographies aériennes historiques de 1930, 1950, 1959, 1963, 1966, 1979 (Photothèque nationale de l'air, Géoselec et Université Laval – colligées par le GROBEC);
- ❖ Délimitation du bassin versant à l'étude ainsi que des principaux sous-bassins (GROBEC);
- ❖ Cartes pédologiques (Info-Sols).

Également, deux visites terrain effectuées le 6 septembre et le 17 octobre 2023 ont permis d'amasser les informations suivantes :

- ❖ Relevé d'arpentage effectué à l'aide d'un GNSS RTK de précision centimétrique (sections transversales, niveaux d'eau, marqueurs géomorphologiques (cicatrices glaciaires, érosion - Figure 9);
- ❖ Documentation qualitative de la granulométrie du lit et des berges (photographies avec échelle);
- ❖ Documentation quantitative de la granulométrie (*pebble count*) de deux bancs d'accumulation situés dans le tronçon intermédiaire (entre la 112 et le boulevard des Mineurs);
- ❖ Documentation générale de la dynamique fluviale dans le secteur à l'étude (notes et photographies).



Figure 9 : Exemple de marque d'érosion cohérente associée au débit plein bord mesurée sur le terrain (rive gauche, environ 200 mètres en amont du pont de la 112).

4.2 MODÉLISATION HYDRAULIQUE

4.2.1 VOLET HYDROLOGIQUE

L'Atlas hydroclimatique du Québec méridional est un outil cartographique présentant le régime hydrique des rivières du Québec méridional, en climat actuel et futur, rendu disponible par le ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les Changements Climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP). Les débits journaliers maximaux annuels pour les crues de récurrence 2, 5, 10, 20, 100 et 350 ans ont été extraits de l'Atlas pour deux points d'intérêts sur la rivière Bécancour délimitant les tronçons SLS000853 et SLS000851, séparés pour tenir compte de la contribution hydrologique du ruisseau Nadeau entre la rivière Blanche à l'amont et le ruisseau Poirier à l'aval (Figure 10). Le secteur à l'étude bénéficie de la proximité d'une station hydrométrique aujourd'hui fermée (CEHQ #024013) ayant couvert la période 1979-2010. Les débits présentés au Tableau 1 ont été colligés via l'Atlas hydroclimatique et sont donc le fruit d'une analyse fréquentielle des données de cette station hydrométrique, ajustées selon l'aire de drainage.

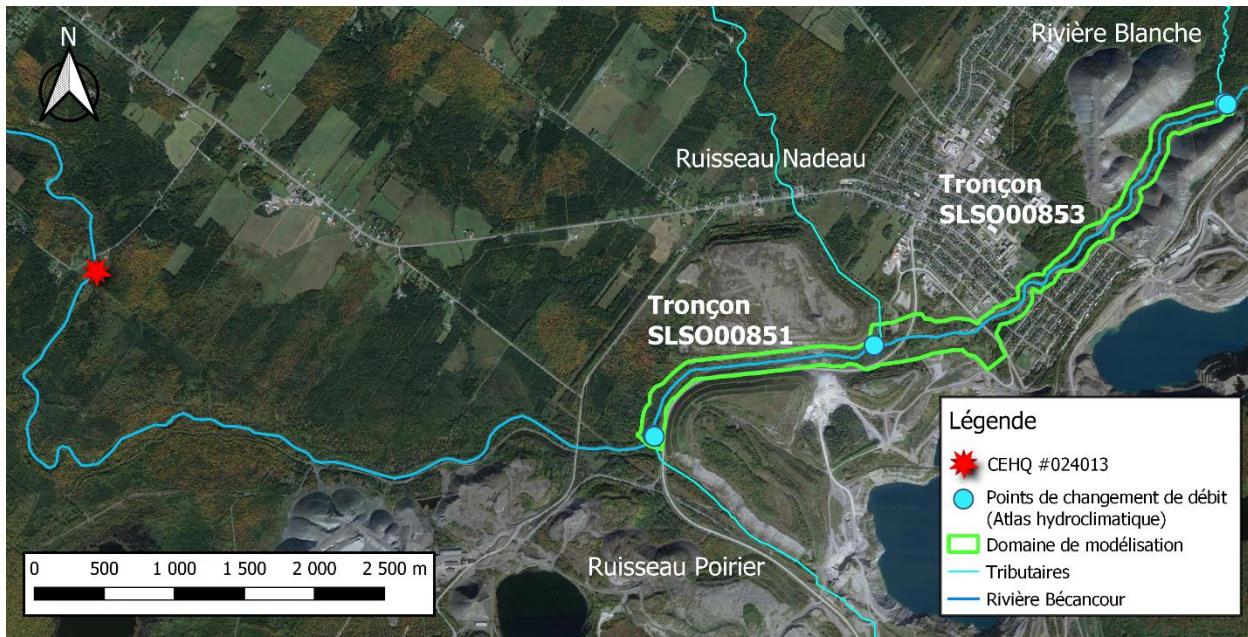


Figure 10 : Localisation des points de changement de débits et de la station hydrométrique dans le secteur à l'étude.

Tableau 1. Débits retenus pour la modélisation

Référence	2 ans	5 ans	10 ans	20 ans	100 ans	350 ans
Débit du tronçon SLSO00853 (m ³ /s)	50,59	67,20	77,98	89,14	112,66	130,66
Débit du tronçon SLSO00851 (m ³ /s)	60,72	80,83	93,56	106,79	134,94	157,06

Notons enfin que la ville de Thetford Mines alimente ses citoyens en eau potable en s'approvisionnant dans le Grand lac Saint-François, situé dans un bassin versant limitrophe. La consommation d'eau de la ville est estimée à environ 120 l/s ou 0,12 m³/s selon l'Association pour la protection du Grand lac Saint-François. Ainsi, considérant la taille du bassin versant et l'ordre de grandeur des débits qu'il génère au niveau de la rivière Bécancour, ce débit additionnel a été considéré comme négligeable et n'a pas été ajouté aux débits présentés au tableau 1.

4.2.2 MODÉLISATION HYDRAULIQUE

Afin de calculer diverses variables d'intérêt géomorphologique associées au débit plein bord (vitesse d'écoulement, contrainte de cisaillement, puissance spécifique, largeur, etc.), une modélisation hydraulique 1D a été effectuée avec le logiciel HEC-RAS (version 6.3.1).

La géométrie du chenal modélisé a été construite en intégrant plusieurs jeux de données topographiques. D'abord, les données LiDAR de 2018 (MRNF) ont servi à représenter les berges et les plaines inondables. Ensuite, des données bathymétriques estimées à l'aide d'une approche de modélisation utilisant LISFLOOD-FP ont permis de mieux représenter le lit d'écoulement sur l'ensemble du secteur à l'étude. Ces données sont issues du travail d'une équipe de recherche de l'université Concordia pour le compte du MELCCFP. Un article scientifique détaillant l'approche méthodologique développée a d'ailleurs été publié (Choné et al. 2021). Enfin, afin de valider les données bathymétriques de l'université Concordia et afin de représenter plus finement la bathymétrie sur certains secteurs critiques, des données récoltées par Avizo avec un GNSS RTK de précision centimétrique ont également été intégrées. La Figure 11 offre une vue d'ensemble des sections transversales générées dans le modèle hydraulique ainsi que les points récoltés durant la visite terrain.

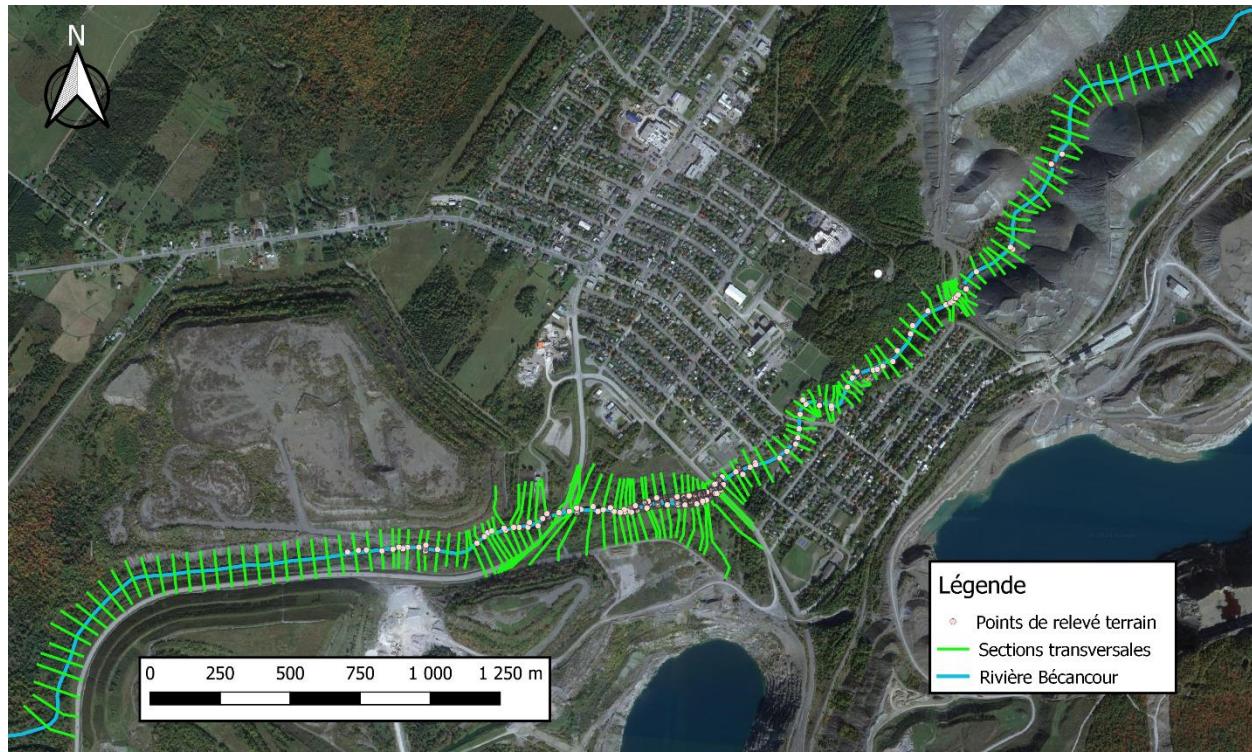


Figure 11 : Sections transversales intégrées au modèle hydraulique et points de mesure terrain.

En l'absence de mesures hydrométriques permettant de calibrer le modèle hydraulique (mesures de niveaux d'eau durant la période de fonctionnement de la station 024013 et/ou mesure de débit dans le secteur à l'étude durant la sortie terrain Avizo), les tables de Chow (1959) ont servi de référence afin de définir le coefficient de rugosité de Manning du lit et des berges. Pour le lit, trois valeurs ont été définies soit :

- ❖ 0.03 pour la portion en aval de la route 112, correspondant à un lit dégagé présentant peu de variabilité transversale et longitudinale;
- ❖ 0.04 pour le segment de cours d'eau situé entre la route 112 et le boulevard des Mineurs, afin de tenir compte de la présence de bancs d'accumulation;
- ❖ 0.05 pour le segment en amont du boulevard des Mineurs, correspondant à un lit de cours d'eau montagneux composé de cailloux et de blocs.

Pour les berges, une valeur unique de 0.05 a été définie, car la composition était relativement uniforme sur l'ensemble du domaine de modélisation.

Le régime d'écoulement modélisé est mixte, afin de tenir compte des conditions d'écoulement contrastées entre l'amont possédant une pente forte (écoulement parfois supercritique) et laval possédant une pente faible (écoulement sous-critique). Les conditions frontières aval et amont ont été définies selon la profondeur définie par une pente d'énergie d'un écoulement normal (0.0089 à l'amont et 0.0001 à l'aval).

Il est bon de rappeler que l'analyse hydraulique réalisée dans le cadre de ce projet ne s'appuie sur aucune donnée hydrométrique. Ainsi, aucune validation ou calibration du modèle hydraulique s'appuyant sur ce type de données n'a été effectuée. Pour les besoins de l'étude, cette approche est suffisante, car elle permet tout de même de contraster les tronçons homogènes entre eux et d'avoir une approximation satisfaisante des variables d'intérêt géomorphologique contrôlant la dynamique fluviale.

4.3 ANALYSES HYDROGÉOMORPHOLOGIQUES

4.3.1 ANALYSE HISTORIQUE

Les photographies aériennes historiques mentionnées à la section 4.1 ont été géoréférencées par le GROBEC et Avizo. Celles-ci ont permis de documenter les principaux changements dans le secteur à l'étude depuis 1930. Les photographies de 1930 présentaient un nombre très limité de repères permettant le géoréférencement. Pour faire face à ce défi, un géoréférencement basé sur le tracé de la rivière Bécancour en 1950 (alors que les travaux d'assèchement du lac Noir débutaient) a été réalisé. Cet exercice n'est pas aussi précis, mais a tout de même produit un niveau de précision satisfaisant pour les besoins de l'étude. La limite du lac Noir, le tracé de la rivière Bécancour, le style fluvial, les processus géomorphologiques et les dimensions de différents tronçons ont pu être documentés grâce à cet exercice.

4.3.2 ANALYSES GRANULOMÉTRIQUES

La visite terrain a permis de documenter la granulométrie du lit de la rivière Bécancour à l'aide d'une combinaison d'approches. D'abord, en raison du volume sédimentaire important dans le secteur où la déviation est prévue, un échantillonnage plus détaillé a été réalisé. Deux bancs d'accumulation divisés en trois portions (amont, centre et aval) ont fait l'objet de mesures granulométriques selon le protocole de Wolman (*Wolman pebble count*) où 100 mesures aléatoires de grains ont été effectuées par portion. Puisqu'un léger armurage a été observé, 6 échantillons (1 par portion) ont été récoltés sous la surface afin de déterminer le ratio d'armurage. Également, afin de documenter la granulométrie plus fine en aval de la route 112, trois échantillons ont été récoltés. Aucun armurage n'a été observé dans ce secteur, ainsi aucun décompte de la surface n'a été effectué. La Figure 12 illustre l'emplacement des échantillons amassés. Enfin, pour la portion en amont du boulevard des Mineurs, des photographies avec un ruban à mesurer ont été récoltées en raison de la granulométrie plus grossière.

Cette documentation granulométrique a entre autres permis d'alimenter la délimitation de tronçons homogènes, mais également d'apporter de nouveaux éclairages quantitatifs sur la contribution sédimentaire des haldes minières.

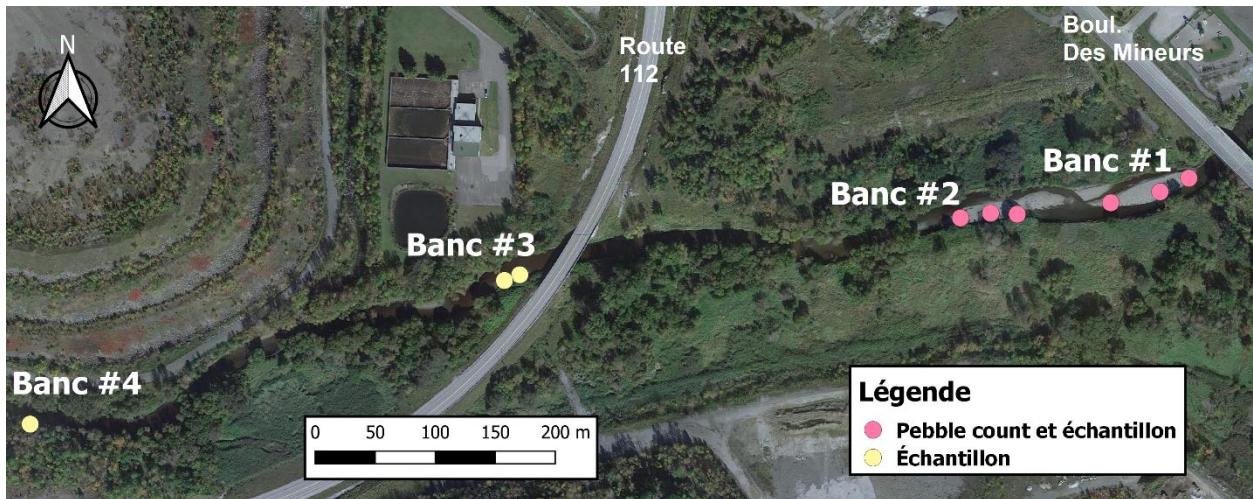


Figure 12 : Échantillonnage sédimentaire effectué dans le secteur à l'étude.

4.3.3 DÉLIMITATION DE TRONÇONS HOMOGÈNES

Sur la base de l'analyse historique, des résultats de modélisation hydraulique et des observations terrain (processus, granulométrie, etc.), une délimitation de tronçons homogènes a été effectuée dans le secteur à l'étude. Cette délimitation permet de différencier les processus géomorphologiques dominants, la trajectoire fluviale et ultimement d'identifier les principaux enjeux que ces éléments pourraient poser dans le cadre d'un scénario de déviation dans la fosse Lac d'Amiante.

4.3.4 INDICE DE CONNECTIVITÉ SÉDIMENTAIRE

Le modèle de « Sediment Delivery Ratio » (SDR) du logiciel InVEST (Natural Capital Project, 2024) a été utilisé pour obtenir l'indice de connectivité dans le bassin versant de la rivière Bécancour. InVEST est un logiciel qui inclut plusieurs modèles utilisés pour cartographier et évaluer les biens et services écologiques. L'objectif du modèle SDR est de quantifier et de cartographier les sources sédimentaires et leurs apports dans les cours d'eau. La première étape du modèle est de calculer l'indice de connectivité (IC) pour chaque pixel. C'est ce résultat intermédiaire qui nous intéresse plutôt que le résultat final du modèle. L'indice de connectivité décrit le lien hydrologique entre les sources de sédiments (provenant du paysage) et les puits (comme les cours d'eau).

L'intérêt de ce produit dans l'étude est d'évaluer s'il y a d'autres sources de sédiments que les haldes minières qui contribuent de manière significative aux apports dans la rivière Bécancour.

Pour fonctionner, le modèle requiert les données présentées au Tableau 2.

Tableau 2. Intrants nécessaires pour le modèle SDR de InVEST

INTRANT	FORMAT	SOURCE
Modèle numérique d'élévation	Raster	LiDAR - Modèles numériques : Feuilles 21L03NO, 21L03NE, 21E14NO, 21L03SO, 21L03SE (https://www.donneesquebec.ca/recherche/fr/datas-et/produits-derives-de-base-du-lidar)
Utilisation du sol	Raster	Utilisation du territoire 2020 (https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/utilisation-du-territoire/resource/562e43ed-bd4c-4303-8c4e-2dc807e8a7e7)
Facteur d'érosivité du sol (K)	Raster	Données inspirées du Tableau 3.2. « Indication de la sensibilité générale des textures des sols à l'érosion » dans Wall et al. (2002)
Indice d'érosivité des précipitations (R)	Raster	Global Rainfall Erosivity de la European Soil Data Centre (ESDAC) (https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/global-rainfall-erosivity)
Limites du bassin versant	Raster	Bassin versant de la rivière Bécancour dans la Géobase du réseau hydrographique du Québec (GRHQ) (https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/grhq)

Ensuite, les paramètres du modèle par défaut ont été utilisés :

- ❖ Drainages (facultatif) : aucun
- ❖ Threshold Flow Accumulation : 100
- ❖ Borselli K Parameter : 2
- ❖ Maximum SDR Value : 0,8
- ❖ Borselli IC0 Parameter : 0,5
- ❖ Maximum L Value : 122

Des valeurs plus élevées de IC indiquent qu'une plus grande fraction de sédiments érodés à partir d'un pixel en amont est acheminée vers un puits en aval tel qu'un ruisseau (c'est-à-dire qu'elle est plus connectée). Une connectivité élevée se produit généralement lorsque le chemin d'écoulement entre les sources de sédiments et les puits est raide, court et/ou peu végétalisé. Des valeurs inférieures de IC (c'est-à-dire une connectivité plus faible) sont associées à des zones plus végétalisées et à des pentes plus faibles.

La valeur d'indice de connectivité résultante (sans dimension) a ainsi permis de contraster les divers secteurs du bassin versant à l'étude en termes de connectivité à la rivière Bécancour. Évidemment, il va sans dire que l'indice sera élevé pour les haldes minières, mais cet exercice permet d'évaluer la contribution des autres secteurs du bassin versant.

4.3.5 INDICE DE QUALITÉ MORPHOLOGIQUE

L'Indice de Qualité Morphologique (IQM) est une mesure du degré d'altération de causes anthropiques dans le fonctionnement du milieu hydrique. Il a été développé par Rinaldi et coll. (2013) pour des cours d'eau en Italie afin de répondre à des directives législatives européennes. Une adaptation québécoise a été réalisée par Demers et coll. (2018) du Laboratoire de géomorphologie et de dynamique fluviale de l'Université du Québec à Rimouski en collaboration avec le MELCCFP afin d'appuyer la prise de décision dans le cadre d'analyses de projets hydrauliques.

La procédure pour calculer l'IQM est, en premier lieu, de délimiter le cours d'eau en tronçons de caractéristiques géomorphologiques homogènes. En deuxième temps, un score pour 28 indicateurs, divisés en 3 sections est attribué: Ajustements (trajectoire historique), Anthropisation (perturbations hydro-sédimentaires, artificialités et interventions) et Processus, forme et bandes riveraines. Ces indicateurs permettent d'évaluer la continuité longitudinale et latérale du cours d'eau, la configuration du chenal et de sa section transversale, la structure du lit et du substrat, ainsi que la qualité de la bande riveraine. Les caractéristiques analysées servent à interpréter le degré d'artificialité du cours d'eau, les processus géomorphologiques en cours attendus selon le style fluvial ainsi que la trajectoire spatiale et temporelle. L'indice est établi sur une échelle de 0 à 1, 0 étant complètement artificialisé et 1 étant naturel sans intervention humaine. Dans le cadre de ce projet, il est utilisé comme outil diagnostique (état avant la déviation historique et l'état actuel depuis la déviation) et comme outil de conception (propositions d'aménagement). De cette manière, l'indice permet de comparer les tronçons entre eux, mais aussi d'identifier les principaux points d'amélioration pouvant être considérés dans la conception des tronçons de déviation. L'état de référence précédant la déviation a été défini selon les photographies aériennes historiques de 1950 qui offrent un appui pour émettre des hypothèses de travail sur les différents critères à évaluer. Il existait déjà en 1950 quelques éléments anthropiques le long du corridor fluvial, mais ces perturbations sont généralement limitées. Il y a également lieu de mentionner que la contribution sédimentaire des activités minières était déjà importante à cette époque, ce qui en principe devrait nuire au score de l'IQM. Cependant, il est difficile de cerner avec précision l'ampleur des perturbations sédimentaires à cette époque. Par exemple, le lac Noir interceptait certainement une partie importante des sédiments, ce qui préservait le tronçon aval.

Également, le tronçon intermédiaire présentait un style fluvial correspondant davantage à ce qui est attendu dans ce secteur du bassin versant, suggérant une perturbation moins importante qu'aujourd'hui. Ainsi, malgré cette perturbation sédimentaire indéniable (visible dans les carottages de Jacques et Pienitz), il a été décidé d'analyser les tronçons avec les photographies aériennes de 1950 et donc de seulement identifier les perturbations directement visibles sur celles-ci. Cette décision rapproche le score de l'IQM des valeurs optimales associées à l'état naturel complet et permet de mieux sentir l'ampleur des perturbations cumulées jusqu'à aujourd'hui.

5 RÉSULTATS DE CARACTÉRISATION

5.1 PRINCIPALES OBSERVATIONS TERRAIN

L'annexe A présente une sélection de photographies représentatives du secteur à l'étude.

Les principaux constats faits durant la visite terrain sont les suivants :

- ❖ Dans l'ensemble, la rivière Bécancour présente peu de variabilité hydrogéomorphologique à l'intérieur de trois secteurs (aval de la 112, entre la 112 et le boulevard des Mineurs et amont du boulevard des Mineurs);
- ❖ Le segment de cours d'eau débutant en aval du boulevard des Mineurs présente une importante accumulation sédimentaire (composée d'une granulométrie allant du sable grossier aux cailloux) et un style fluvial divagant. Un processus d'élargissement semble également en cours puisque les deux rives étaient en érosion;
- ❖ L'armurage des sédiments semble inexistant dans la portion en aval de la route 112 et plutôt faible en amont de celle-ci ;
- ❖ Malgré une certaine cohésion des résidus amiantisés, ceux-ci subissent des processus de ravinement et de mouvement de masse majeurs. Ceci inclut un groupe de haldes associé à la mine Normandie, située en aval de la déviation proposée;
- ❖ La portion en aval de la route 112 possède une section d'écoulement trapézoïdale artificielle, mais les ajustements morphologiques y sont plutôt limités en raison de la pente généralement faible.

5.2 ANALYSE HISTORIQUE

La Figure 13 illustre les tracés de la rivière Bécancour en 1950, 1979 et 2021 pour le secteur à l'étude. Le principal changement notable est la déviation de la rivière associée à l'assèchement du lac Noir et la mise en place de la mine Lac d'Amiante. Outre cette modification anthropique majeure, les différences sont trop faibles pour y dégager une tendance claire au-delà de l'imprécision associée aux difficultés de géoréférencement nommées précédemment.

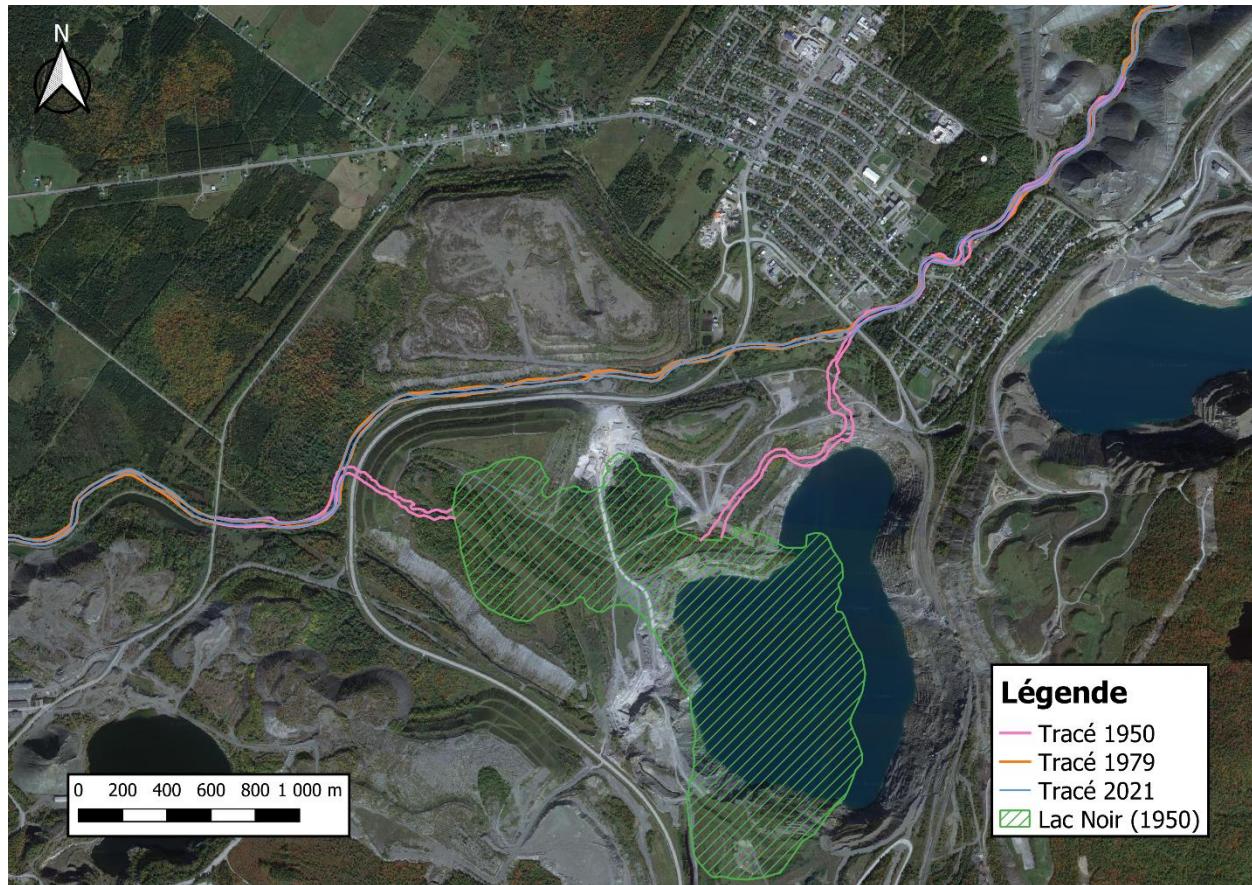


Figure 13 : Tracés de la rivière Bécancour pour les années 1950, 1979, 2021.

La mobilité naturelle assez faible de la rivière Bécancour s'explique en trois volets :

- 1) La portion en amont du boulevard des Mineurs est confinée et possède une très forte granulométrie (blocs) issue d'un tri naturel du till;
- 2) La portion en aval de la route 112 possède une pente faible ce qui limite la capacité érosive du cours d'eau;
- 3) L'ancien tronçon de 1950 entre le lac Noir et l'actuel boulevard des Mineurs semblait présenter une certaine capacité de mobilité avec un tracé à méandres actif mais est aujourd'hui disparu.

La figure 14 illustre la configuration des cours d'eau autour de la portion nord du lac Noir en 1950. On remarque d'abord que le ruisseau Nadeau a également fait l'objet d'une déviation considérable, afin notamment d'accorder les haldes de la mine lac d'Amiante sur la rive droite de la rivière Bécancour.

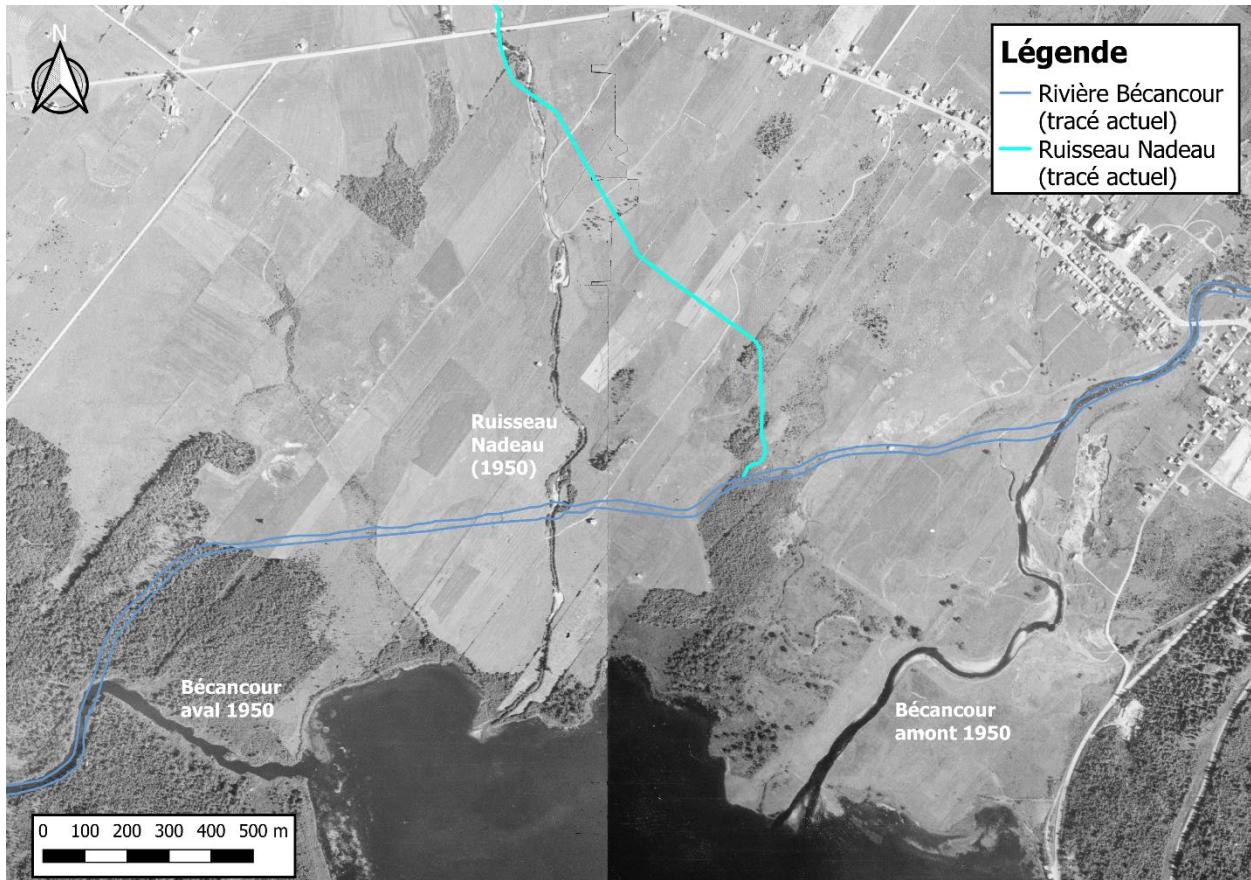


Figure 14 : Rivière Bécancour et ruisseau Nadeau à proximité du lac Noir (1950).

Il est également intéressant de noter la forme fluviale à méandres pour le tronçon amont, alors qu'aujourd'hui le tronçon intermédiaire correspondant est divagant. L'an 1950 précède la période d'activité maximale de l'industrie minière dans la région (cette dernière couvrant plutôt la période 1959-1980). Ainsi, les apports sédimentaires étaient assurément moins prononcés qu'aujourd'hui, où les haldes cumulées durant cette période font maintenant ressentir leur présence. La forme triangulaire et la présence d'un banc d'accumulation à l'embouchure suggèrent un apport sédimentaire tout de même considérable, capable de produire et soutenir un delta. Ce constat s'applique d'ailleurs également au ruisseau Nadeau. On remarque à proximité du tronçon amont de la rivière Bécancour un tracé à méandres abandonné, signe d'une possible avulsion typique d'un environnement deltaïque. Il est également possible que des travaux de linéarisation pour favoriser l'agriculture aient eu lieu dans le dernier segment aval de 300 mètres. La photographie aérienne présentait quelques formes suggérant un possible élément morphologique d'intérêt dans le secteur de la déviation amont (autour de l'actuel boulevard des Mineurs). Un examen stéréoscopique de photographies aériennes de la même série couvrant ce secteur a été réalisé et n'a pas confirmé la présence d'un élément topographique d'intérêt (p. ex. terrasse ou autre).

La largeur moyenne de ce tronçon était de 27 mètres alors qu'aujourd'hui, le tronçon intermédiaire correspondant est de 37 mètres (+37%) et semble faire l'objet d'un élargissement naturel actif.

Pour l'exutoire du lac Noir, la photographie aérienne montre un environnement d'eaux lentes, des berges bien végétalisées par des herbacées et des arbustes possiblement typiques de milieux humides. Considérant la capacité d'interception de sédiments grossiers dans la fosse Lac d'Amiate projeté, ainsi que les pentes faibles attendues avec le tracé projeté rallongeant la rivière Bécancour, une configuration similaire à l'exutoire du lac Noir pourrait être anticipée dans le scénario de déviation. Le rapport de Jacques et Pienitz (2022) mentionne que durant la période de détournement de la rivière Bécancour (1954-1959), la portion en aval des travaux a fait l'objet de retrait d'obstructions (matière ligneuse, bancs d'accumulation) et d'un élargissement sur plusieurs kilomètres pour faciliter l'évacuation des crues. L'aspect très homogène de ce secteur observé sur le terrain concorde bien avec les travaux de retrait d'obstructions. L'examen des photographies aériennes ne permet cependant pas de noter d'élargissement significatif. Ceci est en partie dû aux limitations du géoréférencement et à la présence d'arbres matures en rive. Il est également possible que l'élargissement en question soit plutôt associé à des travaux de surcreusage où les berges naturellement douces auraient été refaçonnées avec une pente plus abrupte. Ainsi, la capacité hydraulique aurait été augmentée à travers un approfondissement de la section d'écoulement, davantage que par son élargissement.

Considérant le potentiel de mobilité latérale du tronçon intermédiaire historique, il pourrait être attendu que le tronçon intermédiaire correspondant actuel, situé entre le boulevard des Mineurs et la route 112, présente également des signes de mobilité. Les observations terrain dénotent effectivement un style fluvial divagant avec de l'érosion sur les deux rives, suggérant une activité géomorphologique significative. Une attention particulière a donc été accordée à l'évolution de ce secteur présentant une forte déposition sédimentaire dans l'analyse historique (Figure 15). Malgré des bancs de sédiments actifs (dépourvus de végétation, peu armurés), l'analyse historique ne montre pas de progression nette, tant latérale que longitudinale, au fil des années à l'exception des photographies de 2015 et 2020. Certaines anomalies comme la régression de bancs entre 2007 et 2008 sont également observées. La principale hypothèse pouvant expliquer ces discordances temporelles est un possible dragage des sédiments. On remarque d'ailleurs une bande riveraine dépourvue de végétation en rive gauche en 1979. Cette bande correspond en tout point à une bande de terrain rehaussée, vraisemblablement issue des sédiments retirés du chenal, observable avec les données LiDAR les plus récentes (Figure 16). Le rapport de Jacques et Pienitz (2022) confirme effectivement que ce segment a fait l'objet d'un dragage annuel jusqu'en 1992 et plus espacé par la suite.



Figure 15 : Photographies aériennes illustrant l'évolution des bancs d'accumulation en aval du boulevard des Mineurs (photographies de 2007 à 2020 extraites d'Info-Sols).

Également, des correspondances plus récentes entre la MRC des Appalaches et le propriétaire des lots bordant ce tronçon de la rivière Bécancour ont été retracées par le GROBEC. Celles-ci montrent que la MRC exerçait une pression importante en 2013 et 2014 pour qu'un retrait urgent des sédiments soit effectué, citant notamment la célérité de l'ancien propriétaire (Lab Chrysotile) à obtenir les autorisations nécessaires dans le passé. La justification pour le retrait des sédiments était un rehaussement indésirable du niveau d'eau pouvant affecter la rue du Pont un peu en amont du boulevard des Mineurs. Une autre correspondance semble suggérer que le dernier dragage de ce tronçon ait effectivement eu lieu en 2009 après une tentative échouée d'obtenir une autorisation couvrant une période de 10 ans. Entretemps, le cadre réglementaire a considérablement changé en matière de gestion des cours d'eau au Québec et ce type d'intervention requiert maintenant des assises particulièrement solides pour en justifier l'application (particulièrement sur une base temporelle aussi régulière). Également, aucun débordement problématique ne serait survenu au niveau de la rue du Pont depuis le dernier dragage datant bientôt de 15 ans.

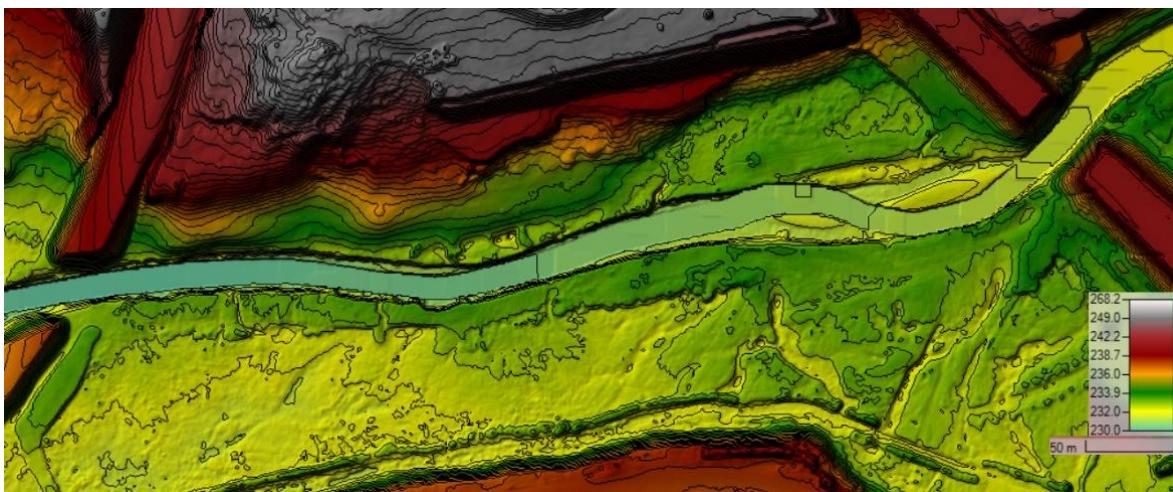


Figure 16 : Topographie du segment intermédiaire montrant un rehaussement artificiel du talus en rive gauche.

Sans représenter une analyse hydraulique définitive pouvant être citée directement, les résultats de modélisation qui intègrent la configuration actuelle des bancs d'accumulation montrent qu'aucun débordement en eau libre ne survient à la rue du Pont, même pour un débit de récurrence 350 ans. Toutefois, des responsables à la Ville de Thetford Mines ont informé le GROBEC que les débordements vécus à la rue du Pont survenaient avec la formation d'embâcles durant la période hivernale. La modélisation hydraulique réalisée dans le présent projet ne tient pas compte de ce type de dynamique et cette information ne peut donc pas être validée. Il sera important de considérer ce facteur dans les études subséquentes visant à mieux définir le concept d'aménagement.

L'arrêt des travaux de dragage depuis 2009 s'arrime bien à l'expansion des bancs d'accumulation observée entre 2015 et 2020. Cette trajectoire hydrogéomorphologique devrait donc se poursuivre dans le futur, ce qui revêt des implications tant au niveau du scénario de déviation que pour un

scénario de statu quo où aucune intervention n'est mise en place. Notons enfin que certaines des correspondances citées précédemment incluaient également des travaux de dragage au niveau du ruisseau Nadeau, suggérant que celui-ci possède une charge sédimentaire importante. Ces éléments seront abordés plus en détail à la section 6.

5.3 ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE

Il est important en premier lieu de définir les classes granulométriques constituant les différentes haldes présentes dans le bassin versant. Le rapport de Villeneuve (MDDEFP, 2013) offre une vue d'ensemble intéressante et décrit 4 types de dépôts dans la région :

- 1) **Rejets stériles** : Ces dépôts ont été générés à partir du matériel rocheux entourant les gisements d'intérêt. La granulométrie très hétérogène est constituée de blocs contenus dans une matrice millimétrique à centimétrique;
- 2) **Résidus fins** : Associés aux exploitations plus anciennes qui employaient le broyage pour extraire le minerai avant 1970. Ces résidus sont plutôt homogènes et possèdent une granulométrie inférieure à 6.3 mm (1/4 de pouce);
- 3) **Résidus grossiers** : Issus de la méthode d'extraction moderne employant des aimants. Ces résidus non magnétiques triés possèdent une granulométrie supérieure à 10 mm;
- 4) **Résidus moyens** : Issus de la recombinaison du matériel non magnétique et magnétique après extraction des fibres d'amiante. Les résidus moyens sont hétérogènes. Le rapport de Villeneuve ne propose pas de granulométrie, mais il s'agit approximativement d'un mélange de résidus fins et grossiers.

La Figure 17 ci-bas illustre les types de dépôts présents dans le bassin versant de la rivière Bécancour (secteurs Black Lake et Thetford Mines).

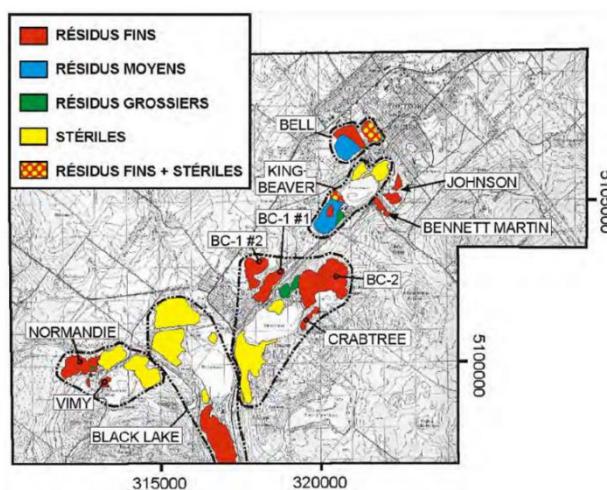


Figure 17 : Types de dépôts constituant les haldes du secteur à l'étude (MDDEFP, 2013).

On remarque la quantité plutôt limitée de résidus grossiers et une présence importante de résidus fins et de stériles. Ces deux derniers, ainsi que les résidus moyens associés aux mines King-Beaver et Bell, contiennent tous une fraction fine beaucoup plus susceptible d'être mobilisée vers le corridor fluvial de la rivière Bécancour et d'éventuellement atteindre les lacs fluviaux en aval. L'étude de Jacques et Pienitz (2022) détaille d'ailleurs la granulométrie des sédiments constituant la couche limnologique moderne associée aux activités minières. Pour les trois lacs présentant des taux d'accumulation sédimentaire anormaux (Étang Stater, Lac à la Truite et Lac William), les carottes prélevées étaient constituées de limons respectivement fins à grossiers ($6.6 \mu\text{m} - 24.3 \mu\text{m}$), moyens à très grossiers ($10.7 \mu\text{m} - 32.3 \mu\text{m}$) et fins à grossiers ($7.4 \mu\text{m} - 20.4 \mu\text{m}$). Il s'agit d'une information précieuse afin d'évaluer la capacité de la fosse lac d'Amiante connecté à la rivière Bécancour de retenir cette fraction sédimentaire critique.

Sur le plan des échantillonnages réalisés dans le cadre du présent projet, la Figure 18 offre un aperçu des résultats de mesures pour les deux bancs analysés dans le segment intermédiaire.

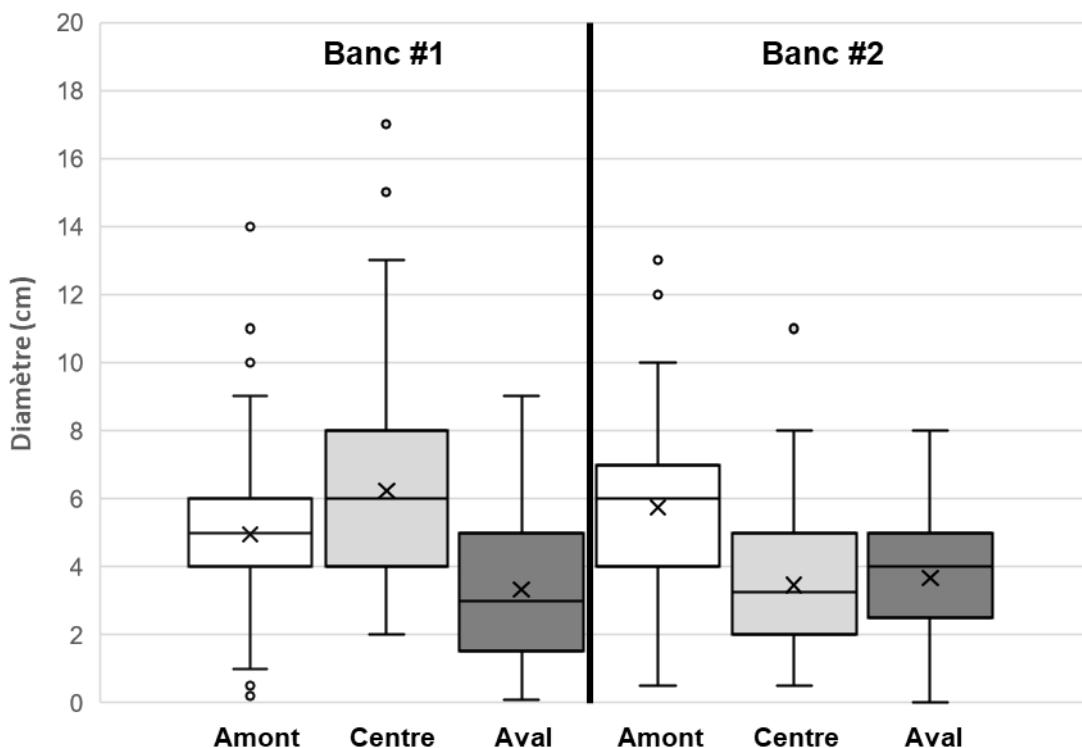


Figure 18 : Distribution granulométrique des deux bancs ayant fait l'objet d'un *pebble count*.

Les distributions montrent un affinage clair entre leur tiers amont et aval respectifs. Quant à la différence générale entre les bancs 1 et 2, leur moyenne respective est de 4.9 cm et 4.3 cm et le D₅₀ de 5 cm et 4 cm, montrant un léger affinage vers l'aval. Cependant, le prochain banc d'accumulation situé environ 25 mètres en aval du banc #2 montre une granulométrie soudainement beaucoup plus fine, s'apparentant davantage aux bancs 3 et 4. La granulométrie s'affine ainsi très soudainement dans le segment intermédiaire, signe d'une contribution sédimentaire dominante en provenance de l'amont. En effet, dans un système fluvial divagant naturel, il est plus courant d'observer une évolution beaucoup plus lente de la granulométrie ambiante de l'amont vers l'aval, avec la contribution sédimentaire générale des berges et l'apport ponctuel de tributaires réguliers.

La dernière portion de l'annexe A offre un aperçu des sédiments composant les bancs 1 et 2 en surface ainsi que les échantillons récoltés précédemment à la Figure 12. Pour les bancs 3 et 4, aucun armurage (ratio entre la granulométrie à la surface et celle en profondeur) n'est présent, avec une granulométrie uniforme allant du sable au gravier de 2 cm. Pour les bancs 1 et 2, un indice d'armurage allant de très faible à faible a été observé, avec la présence d'une matrice plus importante de sable grossier et gravier fin contenant des cailloux de taille similaire sous la surface.

L'indice d'armurage est un indicateur clair des sources sédimentaires du bassin versant. En effet, plus les sources sont abondantes, moins l'indice d'armurage est élevé et vice versa (Figure 19).

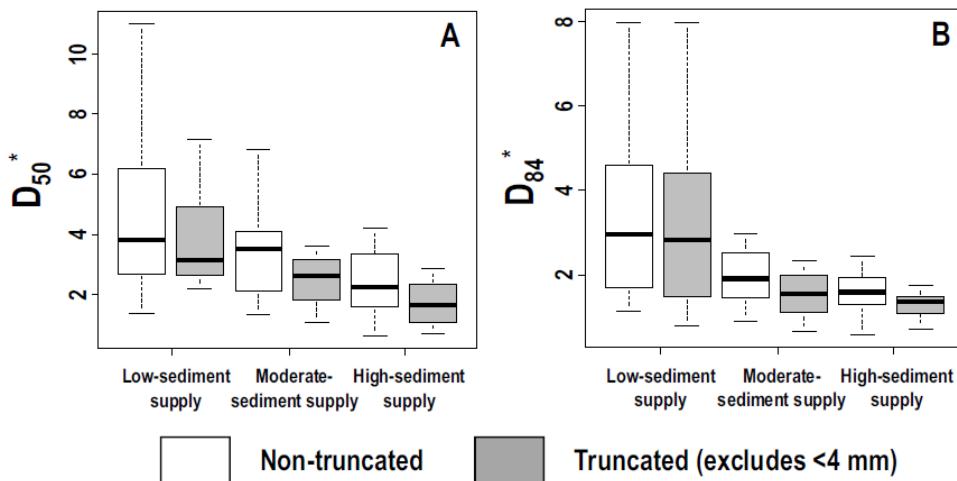


Figure 19 : Variation du ratio d'armurage en fonction des apports sédimentaires – Tarrío et al. (2020).

En somme, l'analyse granulométrique reflète les conditions du bassin versant qui façonnent les dynamiques fluviales de la portion amont de la rivière Bécancour. La granulométrie documentée aura également une utilité certaine à des étapes subséquentes de l'application du scénario de déviation proposé.

5.4 ANALYSE HYDRAULIQUE

La Figure 20 illustre le profil longitudinal de la rivière Bécancour pour le débit de récurrence 2 ans. On y remarque une bonne cohérence avec les marqueurs d'érosion du segment amont, alors qu'un écart en augmentation progressive est observé en aval du boulevard des Mineurs. Tel qu'indiqué précédemment, le tronçon amont possède une pente forte et une granulométrie très grossière. Ce résultat semble indiquer qu'en plus de son tracé en plan stable, le profil longitudinal ne semble pas non plus avoir été affecté par les activités anthropiques dans le bassin versant. La granulométrie généralement plus fine associée aux haldes minières est donc rapidement évacuée de ce secteur. Pour la portion aval, le rehaussement du niveau du lit associé aux excès sédimentaires du bassin versant pourrait expliquer cette différence d'élévation entre l'écoulement modélisé et les marqueurs relevés. Également, le tracé artificiel en aval du boulevard des Mineurs pourrait subir des ajustements morphologiques répondant à des crues de récurrence plus faible. Un dernier facteur pouvant expliquer cet écart est lié aux altérations hydrologiques qu'entraîne le réseau de drainage pluvial de la ville de Thetford Mines, qui produit souvent des événements de surverse. Le tronçon aval serait plus sensible à ces événements que l'amont, ce dernier étant protégé par une très forte granulométrie. Les débits s'alignant davantage avec les marqueurs d'érosion en aval du boulevard des Mineurs, déterminés de façon itérative, sont de 20 m³/s (SLSO00853) et de 24 m³/s (SLSO00851) soit 40% des valeurs associées à la récurrence 2 ans.

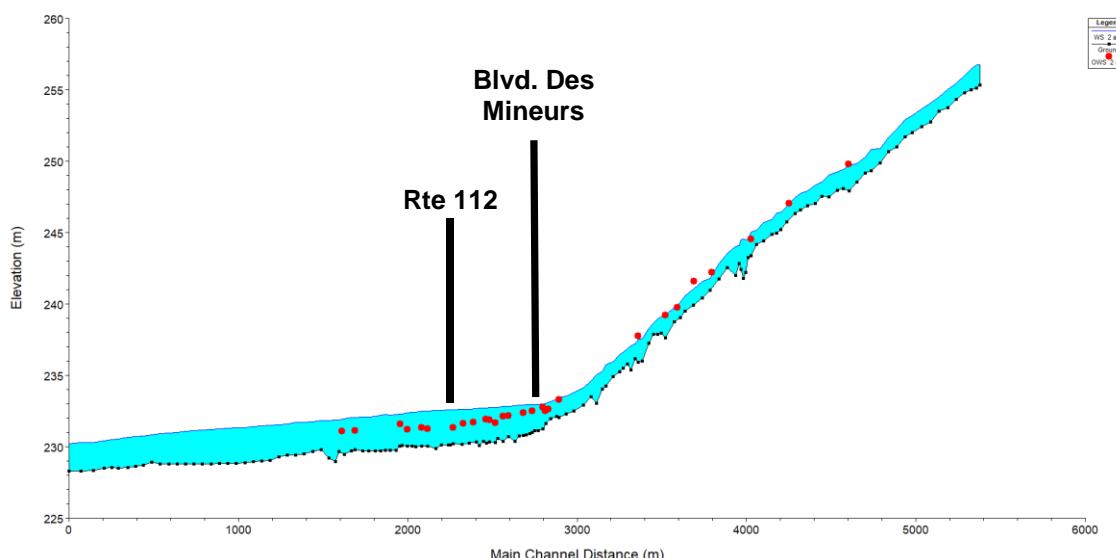


Figure 20 : Profil longitudinal extrait de HEC-RAS pour le débit de récurrence 2 ans et marqueurs d'érosion associés au débit plein bord (points rouges).

La Figure 21 illustre quant à elle le profil longitudinal pour des débits de 62 m³/s (SLSO00853) et 75 m³/s (SLSO00851) déterminés de façon itérative afin de se rapprocher de l'élévation des cicatrices glaciaires relevées. Ces débits se trouvent près de ceux associés à la récurrence 5 ans (-7%); cependant, considérant qu'une certaine épaisseur de glace est nécessaire pour produire des cicatrices, l'érosion glacielle semble essentiellement se produire autour de débits de récurrence 2 ans.

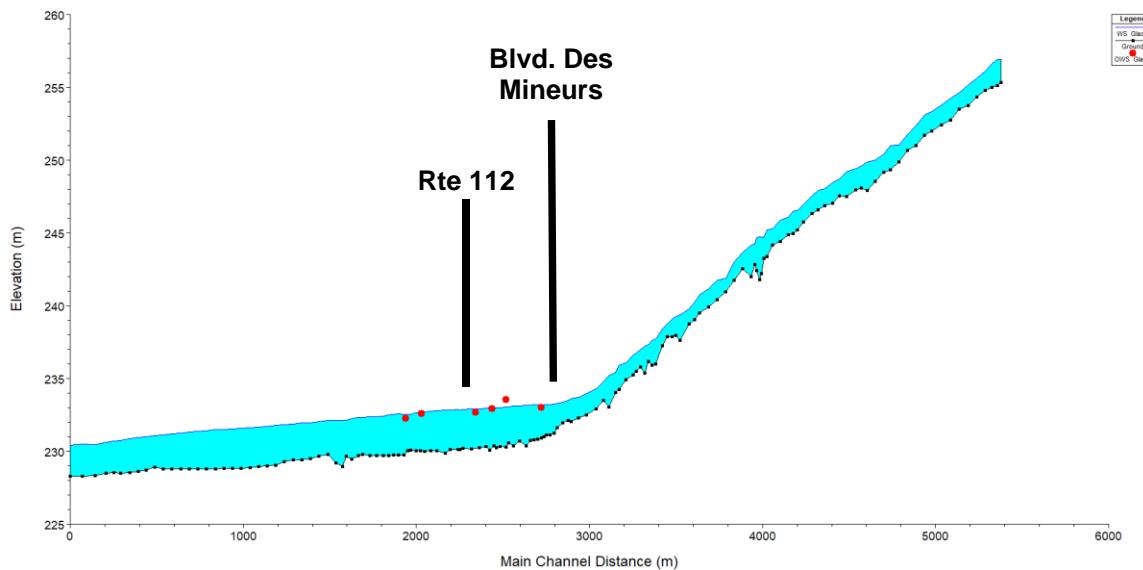


Figure 21 : Profil longitudinal extrait de HEC-RAS pour un débit de 62 m³/s (SLSO00853) et 75 m³/s (SLSO00851) et élévation de cicatrices glaciaires (points rouges).

La Figure 22 illustre quant à elle la puissance spécifique déterminée à chaque section transversale du modèle hydraulique pour le débit de récurrence 2 ans. La puissance spécifique (ω) est proportionnelle au produit de la pente (S) et du débit (Q) :

$$\omega = \frac{\rho g Q S}{W}$$

Où ρ est la densité de l'eau (1000 kg/m³), g l'accélération gravitationnelle (9,8 m/s²), et W la largeur de la rivière. La puissance spécifique est donc une mesure de l'énergie de l'écoulement par unité de surface (W/m²) qui sert d'indicateur pour le potentiel d'ajustement du chenal (Bagnold, 1966). On remarque sans surprise les valeurs élevées associées à la pente forte du segment amont. La transition brusque à l'aval du boulevard des Mineurs explique par ailleurs la présence d'une forte accumulation sédimentaire à cet endroit.

Par ailleurs, le travail de Brookes (1988) sur les cours d'eau linéarisés permet d'examiner les valeurs de puissance spécifique dans le segment de déviation de la rivière Bécancour face à des résultats clairs de seuils critiques à partir desquels des ajustements morphologiques significatifs peuvent se produire (Figure 23).

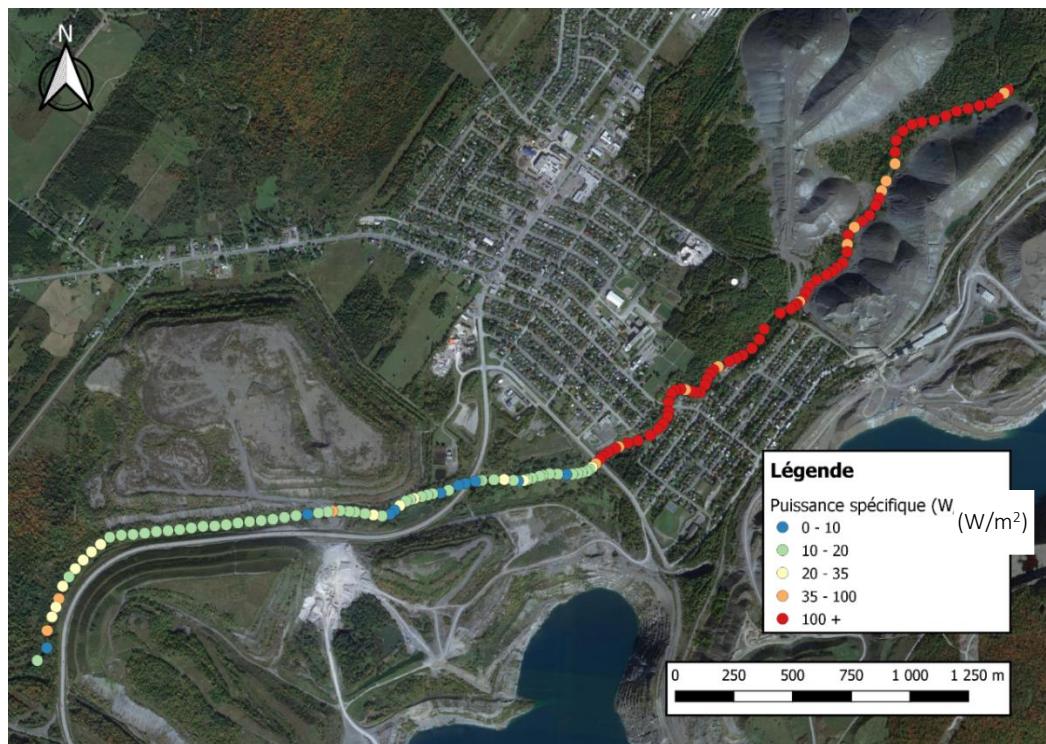


Figure 22 : Puissance spécifique calculée pour le débit de récurrence 2 ans.

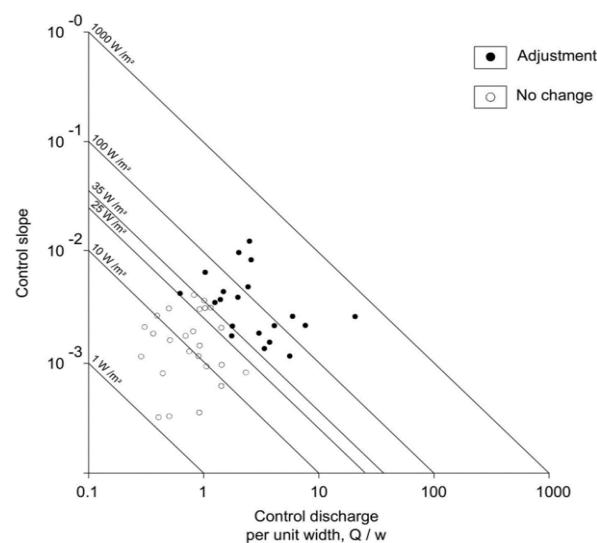


Figure 23 : Présence d'ajustement morphologique dans les cours d'eau linéarisés en fonction de la puissance spécifique (Brookes, 1988).

Le seuil de 35 W/m^2 n'est atteint qu'à deux sections transversales dans l'ensemble de ce secteur (représentant davantage un sursaut de modélisation qu'une tendance claire), renforçant les observations terrain voulant que les ajustements morphologiques y sont généralement limités.

La compétence (D_{max}), soit le calibre maximal de sédiments pouvant être mobilisés par le cours d'eau a été calculé avec les résultats de contrainte de cisaillement issus de la modélisation hydraulique, toujours pour une récurrence de 2 ans, selon la formule de Shields (Figure 24) :

$$D_{max} = \frac{\tau}{\tau_c * g(\rho_s - \rho)}$$

Où τ est la contrainte de cisaillement totale calculée dans le modèle hydraulique (N/m^2), τ_c^* est le seuil critique d'entrainement sans dimension (0.045), ρ_s est la densité des sédiments (2650 kg/m^3), ρ la densité de l'eau (1000 kg/m^3) et g l'accélération gravitationnelle (9.8 m/s^2).

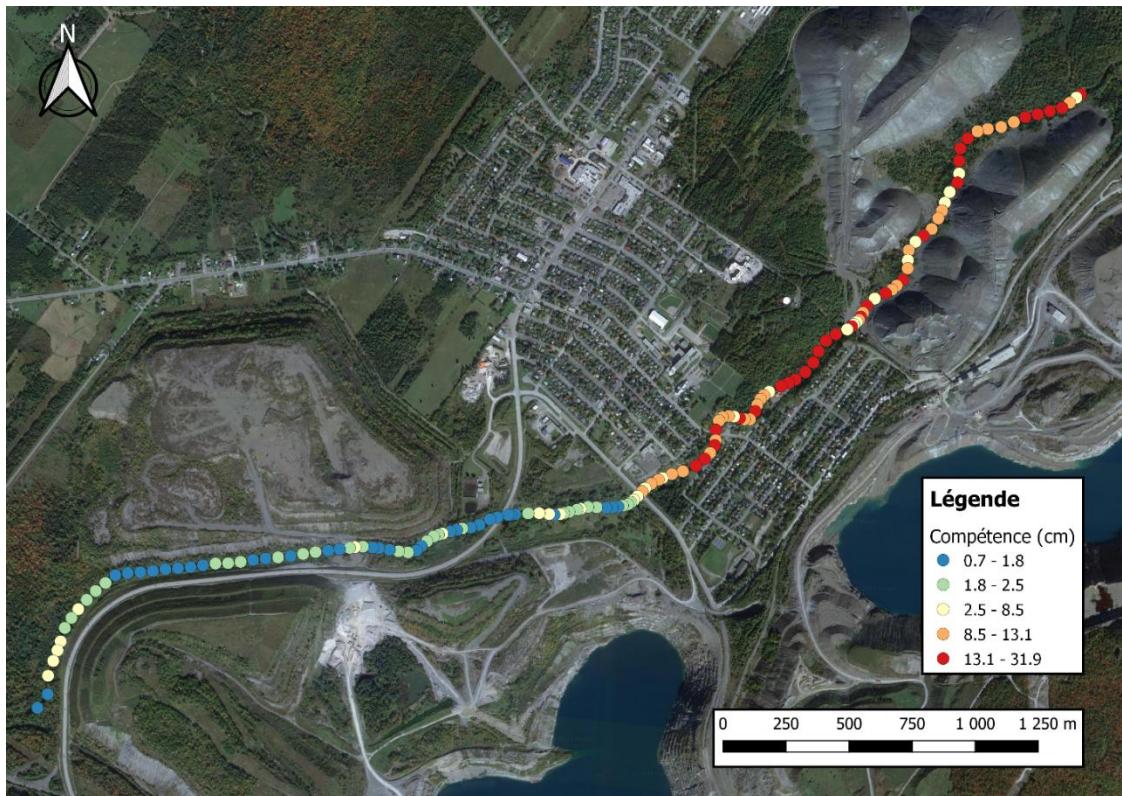


Figure 24 : Compétence de la rivière Bécancour au débit de récurrence 2 ans.

Il est intéressant de constater que l'ensemble des sédiments associés aux haldes de résidus fins (moins de 6.3 mm) peuvent être mobilisés dans le secteur à l'étude pour le débit de récurrence 2 ans malgré l'énergie plus modérée du segment aval.

Le lit d'écoulement dans ce secteur agit ainsi comme un véritable convoyeur hydraulique, dépourvu d'hétérogénéité. Les bancs d'accumulation documentés en aval de la route 112 concordent de façon générale avec la classe inférieure de compétence (0.7 cm – 1.8 cm). Pour la portion amont, les valeurs calculées confirment sa capacité à mobiliser la vaste majorité du matériel associé aux haldes minières vers l'aval. La granulométrie pouvant être mobilisée immédiatement en amont du boulevard des Mineurs (8.5 cm – 13.1 cm) correspond d'ailleurs assez bien aux quantiles supérieurs documentés par le *pebble count* dans les bancs d'accumulation à l'aval. La perte subite de compétence est aussi cohérente avec le rapide affinage des tailles de particules observé dans le tronçon intermédiaire.

5.5 TRONÇONS HOMOGÈNES

Tel que mentionné précédemment, le segment de la rivière Bécancour analysé présente peu de variabilité. En somme, selon les observations terrain et les analyses présentées jusqu'ici, trois tronçons homogènes ont été délimités (Figure 25) et sont présentés dans les prochaines sous-sections.



Figure 25 : Tronçons homogènes délimités dans la présente étude.

5.5.1 TRONÇON AVAL

Le tronçon aval débute à l'amont à partir de la route 112 et se poursuit bien au-delà du secteur à l'étude. En effet, son parcours est très homogène entre autres en raison des travaux historiques d'élargissement et de retrait d'obstructions mentionné précédemment. La pente moyenne de ce tronçon est de 0.1 %, produisant une puissance spécifique moyenne au débit de récurrence 2 ans de 20 W/m^2 ce qui en fait un tronçon avec peu de dynamisme géomorphologique. La Figure 26 ci-bas offre un exemple typique de ce tronçon avec un profil transversal trapézoïdal et un lit d'écoulement homogène, le lit est généralement plat et sans formes. Bien qu'alluvial, ce tronçon ne semble pas connecté activement avec sa plaine, la mobilité étant strictement sur le lit du cours d'eau où on observe beaucoup de sable et gravier fin en transit. La granulométrie illustrée à l'annexe A est généralement composée de sable et de gravier fin. Son style fluvial est rectiligne en raison de la déviation, peu de processus actifs sont observés, la dynamique est très passive en raison des travaux historiques de surcreusage visant à améliorer le drainage.

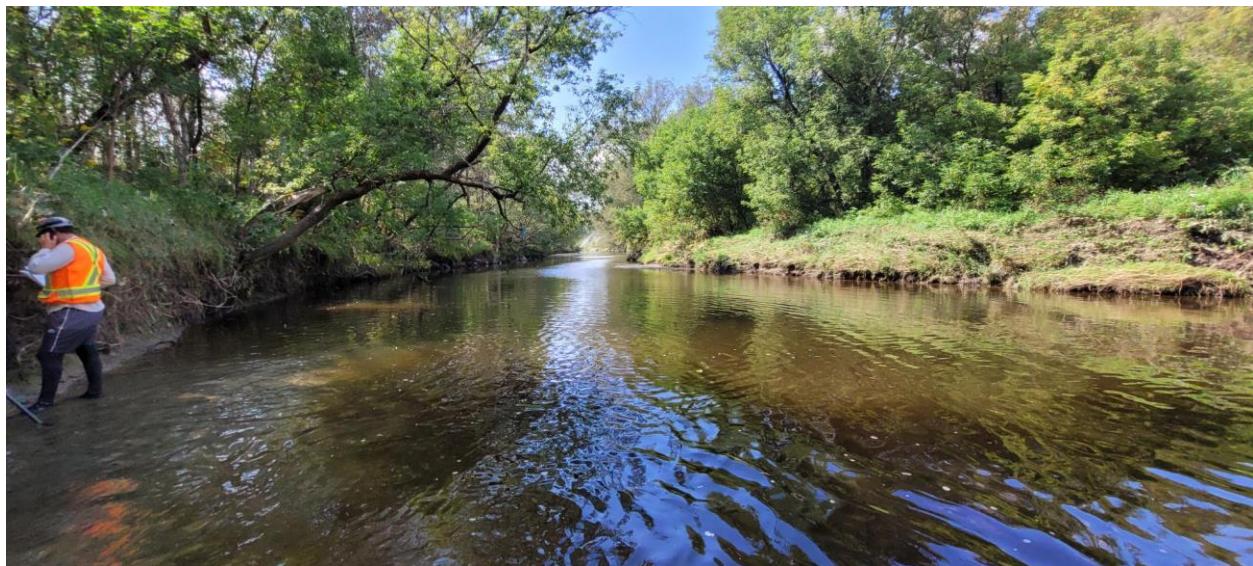


Figure 26 : Illustration représentative du tronçon aval.

5.5.2 TRONÇON INTERMÉDIAIRE

Le tronçon intermédiaire, illustré à la Figure 27 se situe entre la route 112 et le boulevard des Mineurs et possède une pente de 0.2%, produisant une puissance spécifique moyenne de 30 W/m^2 . Cette valeur est très proche du seuil de 35 W/m^2 qui indique le dynamisme géomorphologique. Celui-ci est caractérisé par une forte accumulation sédimentaire produisant un style divagant et une réaction de dragage historique très fréquent. Son évolution est limitée par sa capacité à transporter les sédiments abondants en provenance de l'amont.

Le style fluvial divagant et le contexte de linéarisation alimentent un processus d'élargissement actif, expliquant en partie la différence importante de largeur par rapport au tronçon correspondant précédent l'assèchement du lac Noir. La granulométrie varie du sable grossier aux cailloux et parfois un armurage léger.



Figure 27 : Illustration représentative du tronçon intermédiaire.

5.5.3 TRONÇON AMONT

Le tronçon amont possède un parcours généralement rectiligne en raison d'un confinement naturel par la forte granulométrie du till trié par la rivière et d'affleurements du substrat rocheux. Il ne s'écoule pas dans ses propres alluvions, ce qui en fait un chenal de transition dont la capacité de transport est supérieure aux apports en sédiments. La granulométrie est assez variable, mais se situe généralement entre le gravier fin et les blocs. La puissance élevée du cours d'eau à cet endroit (moyenne de 200 W/m^2 issue d'une pente moyenne de 1%) offre effectivement peu d'opportunité de déposition sédimentaire pour les sédiments plus fins. Le seul élément d'altération est la présence de haldes minières (BC, King-Beaver) dans la bande riveraine ce qui nuit à la qualité générale du corridor fluvial. Bien que cette valeur indique un potentiel de dynamisme géomorphologique, on observe peu de changements en raison de la forte granulométrie héritée du till.



Figure 28 : Illustration représentative du tronçon amont.

5.6 ANALYSE DU STYLE FLUVIAL

Tel que documenté jusqu'ici, le segment de la rivière Bécancour à l'étude présente des styles fluviaux très contrastés entre ses trois tronçons homogènes. La Figure 29 illustre une relation entre la pente et le débit plein bord qui permet de distinguer trois styles fluviaux (rectiligne, à tresses et à méandres). Cette relation définie par Leopold et Wolman (1957) offre également une courbe établissant la limite entre le style fluvial à tresses et celui à méandres. Les trois tronçons homogènes à l'étude ont ainsi pu être placés sur ce graphe, pour deux scénarios, soit le débit plein bord associé aux marqueurs géomorphologiques aval et le débit plein bord défini par la récurrence théorique 2 ans.

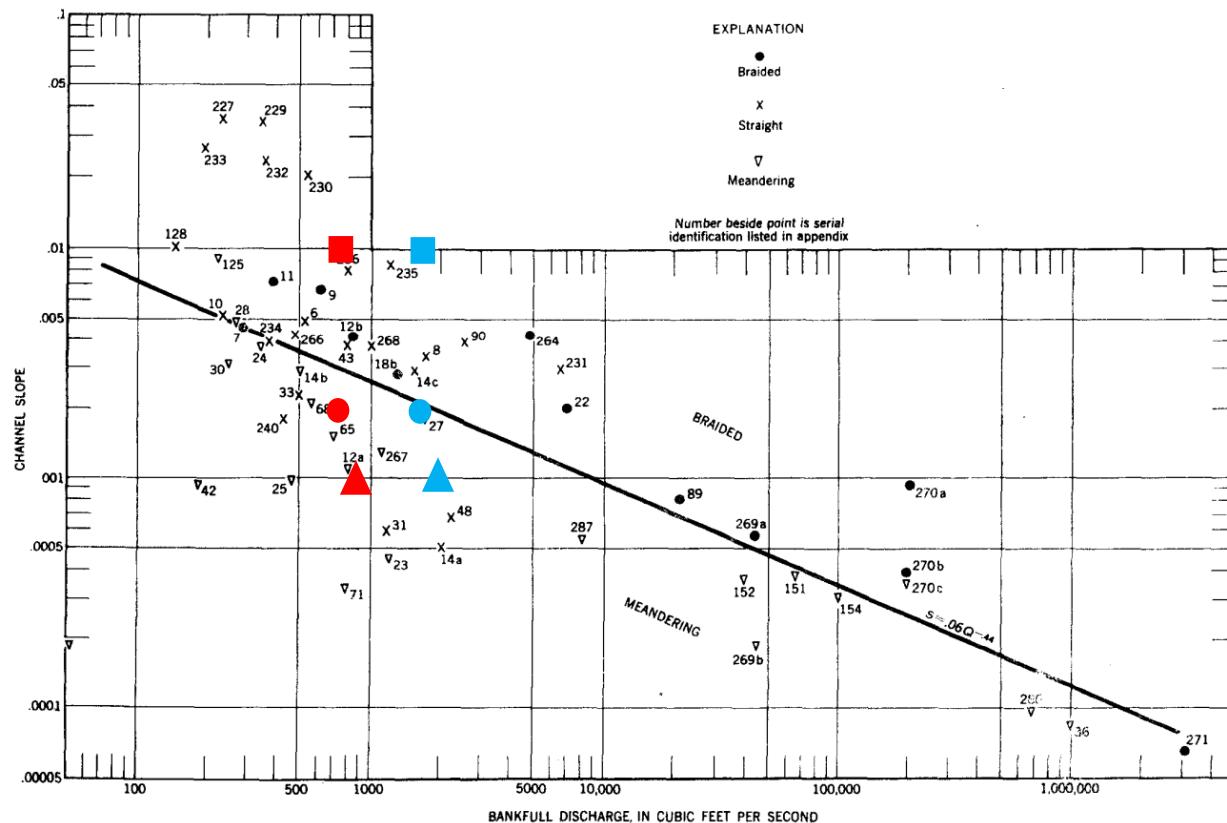


Figure 29 : Courbe de distinction du style fluvial tirée de Leopold et Wolman (1957) – les tronçons amont (carré), intermédiaire (cercle) et aval (triangle) du secteur à l'étude ont été ajoutés pour le débit plein-bord associé aux marqueurs présents en aval (rouge) et le débit de récurrence 2 ans (bleu).

Le débit de récurrence 2 ans présente un résultat particulièrement intéressant pour le tronçon intermédiaire, celui-ci se trouve très près de la limite entre les styles à méandres et à tresses. Ceci vient confirmer la description morphologique du style fluvial de ce tronçon comme étant divagant. Les rivières divagantes constituent effectivement une transition entre le style à méandres et le style à tresses (Church, 1983). Également, considérant le retrait de sédiments effectué jusqu'à récemment (2009), il est probable que la pente soit en augmentation avec l'aggradation des sédiments, ce qui impliquerait que le tronçon intermédiaire est en transition active vers un style à tresses. Une documentation plus exhaustive de l'évolution du site à l'aide d'arpentages multiples permettrait de vérifier cette hypothèse.

Quant au tronçon amont, celui-ci se trouve parmi des chenaux rectilignes associés à un parcours confiné typique de milieux montagneux. Les deux débits analysés demeurent dans la portion du graphique associée à ce type de cours d'eau, montrant que ce tronçon est fermement ancré dans ce style fluvial.

Enfin, le tronçon aval se trouve du côté du style fluvial à méandres en raison de sa pente faible. On remarque également la présence de quelques sites rectilignes, assurément associés à des travaux de linéarisation. À l'état naturel, le tronçon aval aurait donc un tracé à méandres, correspondant aux observations faites dans l'analyse historique des photographies aériennes précédant la déviation de la rivière Bécancour. En somme, l'analyse du style fluvial révèle le caractère changeant du tronçon intermédiaire, ce qui revêt des défis particuliers pour la conception du tronçon amont du scénario de déviation. Ces éléments seront discutés en détail à la section 6.

5.7 INDICE DE CONNECTIVITÉ SÉDIMENTAIRE

L'indice de connectivité sédimentaire déterminé pour la portion amont du bassin versant de la rivière Bécancour révèle d'abord sans surprise la très forte connectivité des haldes minières (Figure 30). On remarque cependant une certaine nuance entre celles-ci : Les haldes ayant été générées par convoyeur ont un indice de connectivité plus élevé que celles produites par le transport par camion. Tel que mentionné précédemment, les haldes produites à l'aide de convoyeurs possèdent des pentes plus élevées, ce qui augmente l'indice de connectivité. Ainsi, les haldes minières pour lesquelles les solutions de retalutage et de végétalisation sont les plus impraticables, sont également celles qui en ont le besoin le plus criant. Pour les haldes du même type, aucune différence appréciable n'a été observée entre elles.

Par ailleurs, l'indice de connectivité sédimentaire montre que les parcelles possédant un couvert forestier sont beaucoup moins connectées au milieu hydrique, même lorsque les pentes sont plus élevées. Les utilisations agricoles et urbaines montrent quant à elles un niveau de connectivité plus important. Le milieu urbanisé est bien connecté à travers son réseau de drainage pluvial, mais possède en contrepartie une source plus limitée de sédiments avec, par exemple, le pavage des routes et le toit des bâtiments. Une réflexion sur les sources sédimentaires sur lesquelles il serait possible d'agir (p. ex. épandage de sable l'hiver sur les routes) de même que des mesures d'atténuation hydrologiques (p. ex. bassins de rétention, noues, etc.) seraient pertinentes pour minimiser les apports de ce secteur.

Pour le domaine agricole, les sources sédimentaires sont plus évidentes avec la présence de surfaces à nu durant certaines périodes critiques de l'année. Le travail de Jacques et Piénitz (2022), montre d'ailleurs une signature sédimentaire agricole claire dès la période de colonisation du territoire à travers leurs analyses paléo-limnologiques. Un travail concerté avec les acteurs du monde agricole afin de favoriser l'adoption de bonnes pratiques agroenvironnementales (p. ex. bande riveraine élargie, cultures de couverture, semi-direct, etc.) serait payant pour atténuer leur contribution sédimentaire dans le bassin versant.

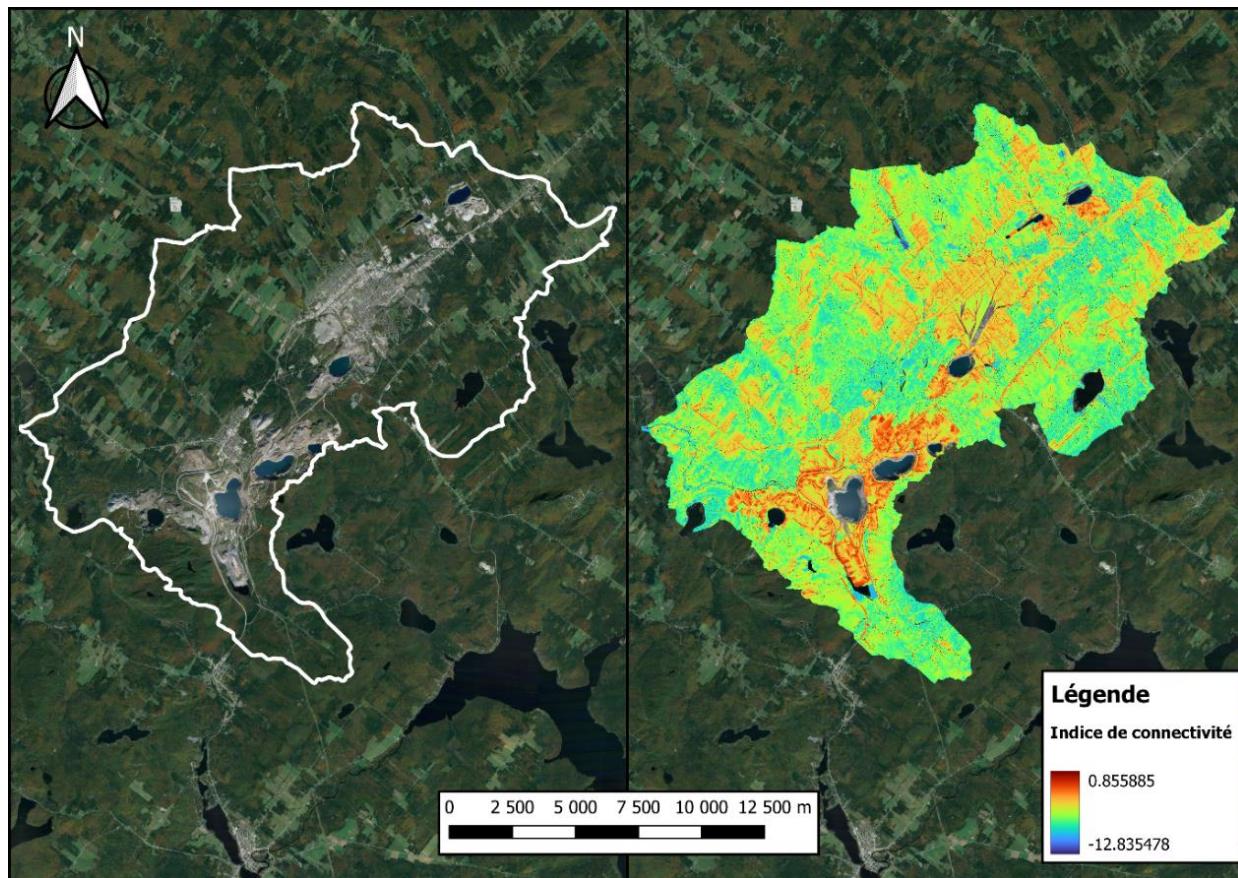


Figure 30 : Indice de connectivité sédimentaire du bassin versant amont de la rivière Bécancour – les valeurs élevées sont définies par une couleur rouge.

Il demeure au final que les haldes minières produisent un excès sédimentaire qui fait pâlir les autres sources anthropiques. La déviation de la rivière Bécancour apparaît comme une rare solution concrète face à ce problème majeur. Il est cependant important de mentionner que les haldes de la mine Normandie ainsi que celles rattachées au ruisseau Poirier sont également fortement connectées au corridor fluvial et se situent en aval de la déviation projetée. La contribution de ces haldes devra être considérée plus attentivement lors d'analyses subséquentes d'un scénario de déviation.

5.8 INDICE DE QUALITÉ MORPHOLOGIQUE

Les résultats complets de la détermination de l'indice de qualité morphologique sont présentés à l'annexe B. En résumé, les 6 scores (trois tronçons et deux états de référence) se déclinent ainsi :

- A- Tronçon amont actuel : IQM = 0.92;
- B- Tronçon intermédiaire actuel : IQM = 0.58;
- C- Tronçon aval actuel : IQM = 0.53;
- D- Section amont 1950 : IQM = 0.92;
- E- Section intermédiaire 1950 : IQM = 0.91;
- F- Section aval 1950 : IQM = 0.98.

Le Tableau 3 et le Tableau 4 présentent un résumé et une brève explication des indicateurs qui changent entre l'état en 1950 et l'état actuel pour les tronçons intermédiaire et aval (l'amont présentant peu de changements).

Tableau 3. Changements par rapport aux conditions en 1950 (C1-C3 et A1 – A12)

Indicateur de l'IQM	Changement depuis 1950	
	Intermédiaire	Aval
AJUSTEMENTS (TRAJECTOIRE HISTORIQUE)		
C1 Ajustement du style fluvial	Dégradation - Linéarisation et style fluvial divagant	Dégradation - Linéarisation
C2 Ajustement de la largeur	Dégradation - Élargissement	Dégradation - Lent élargissement
C3 Ajustement du niveau du lit	Dégradation - Accumulation sédimentaire	Dégradation - Accumulation sédimentaire
ANTHROPISSATION (PERTURBATIONS HYDRO-SÉDIMENTAIRES, ARTIFICIALITÉS ET INTERVENTIONS)		
A1 Altération des débits liquides (BV)	Neutre	Dégradation - Effet de laminage du Lac Noir disparu
A2 Altération des débits solides (BV)	Neutre	Neutre
A3 Infrastructures altérant le régime hydrologique (tronçon homogène)	Neutre	Neutre
A4 Infrastructures altérant les flux solides (tronçon homogène)	Neutre	Neutre
A5 Traverses de cours d'eau	Dégradation - Boulevard des Mineurs	Dégradation - route 112
A6 Protection contre l'érosion des berges	Neutre	Neutre
A7 Levées/digues	Dégradation - Déblais en rive gauche	Dégradation - Déblais en rive
A8 Rectification du tracé fluvial/dragage	Forte dégradation - Déviation et linéarisation	Forte dégradation - Déviation et linéarisation
A9 Infrastructures pour la stabilisation du lit	Neutre	Neutre
A10 Opérations de dragage des sédiments	Dégradation - Dragage ancien et récent	Dégradation - dragage ancien
A11 Opérations de nettoyage des débris ligneux	Dégradation - retrait partiel durant dragage	Neutre
A12 Gestion de la bande riveraine	Neutre	Neutre

Tableau 4. Changements par rapport aux conditions en 1950 (F1-F13)

Indicateur de l'IQM	Changement depuis 1950	
	Intermédiaire	Aval
PROCESSUS, FORME ET BANDES RIVERAINES		
F1 Continuité longitudinale dans le transport de sédiments et de bois	Neutre	Neutre
F2 Présence d'une plaine alluviale moderne	Dégénération - Linéarisation	Dégénération - Linéarisation
F4 Processus d'érosion des berges	Neutre	Dégénération - Peu d'érosion, décrochements dispersés
F5 Présence d'un corridor d'érodabilité potentiel	Neutre	Neutre
F7 Unités géomorphologiques et variabilité de la largeur (en plan)	Dégénération - Présence de bancs, mais largeur uniforme	Dégénération - lit homogène
F8 Unités géomorphologiques dans la plaine alluviale moderne	Dégénération - présence d'anciens méandres	Neutre
F9 Variabilité de la section transversale (profondeur)	Dégénération - encore en ajustement	Dégénération - lit homogène
F10 La structure du substrat	Neutre	Dégénération - enfouissement sous fins partiel
F11 Présence de bois mort	Neutre - Bois mort absent en 1950 également	Dégénération - retrait du bois avec le dragage
F12 Largeur de la bande riveraine	Amélioration - agriculture en 1950	Dégénération - route 112 et haldes
F13 Étendues linéaires de la bande riveraine	Amélioration - agriculture en 1950	Neutre

Outre la linéarisation qui est un facteur clair dans la détérioration considérable du score d'IQM pour les tronçons intermédiaire et aval, les éléments suivants émergent et constitueront des points d'amélioration pouvant être intégrés dans la conception des chenaux de déviation proposés :

- ❖ Présence d'une plaine alluviale moderne : Le chenal de déviation historique avait une simple forme trapézoïdale minimisant les possibilités d'accéder à une plaine de débordement ou d'en construire une à travers la déposition de sédiments. Une section transversale intégrant une plaine inondable devrait être considérée pour les tronçons de déviation.
- ❖ Unités géomorphologiques dans le chenal et variabilité de la largeur : Une certaine variabilité de largeur dans la conception du lit mineur pourrait être considérée. Dans le cas de l'affluent projeté de la fosse Lac d'Amiante, la variabilité devrait émerger naturellement avec la nature divagante du style fluvial. Il en va de même pour les unités géomorphologiques dans le chenal.
- ❖ Variabilité de la section transversale (profondeur) : Pour cet élément également, l'affluent projeté de la fosse Lac d'Amiante devrait produire naturellement cette variabilité. La conception de ce tronçon devrait simplement accommoder la présence d'un style fluvial divagant à long terme. L'affluent projeté de la fosse Lac d'Amiante présentant un faible

gradient pourrait quant à lui intégrer une variabilité de profondeur lors de son aménagement initial.

- ❖ Présence de bois mort : L'intégration de bois mort afin d'accéder plus rapidement aux bénéfices associés (p. ex. hétérogénéité) plutôt qu'à travers une succession végétale naturelle (décennies).

La Figure 31 offre un modèle conceptuel synthétisant les principaux points abordés en lien avec la trajectoire hydrogéomorphologique des trois tronçons de la rivière Bécancour. Pour le tronçon amont, la présence de haldes minières perturbant le milieu riverain est le seul élément ayant atténué sa qualité morphologique depuis son état naturel. Nous avons aussi assumé que son tracé en 1950 est celui d'origine. Le score demeure élevé et stable depuis, puisque les excès sédimentaires sont évacués vers les tronçons en aval.

Sans surprise, le principal événement ayant dégradé fortement les tronçons intermédiaire et aval est la linéarisation de ceux-ci à travers un détournement de la rivière Bécancour. Le score du tronçon intermédiaire a continué de s'abaisser ensuite en raison du dragage qui s'est poursuivi jusqu'en 2009.

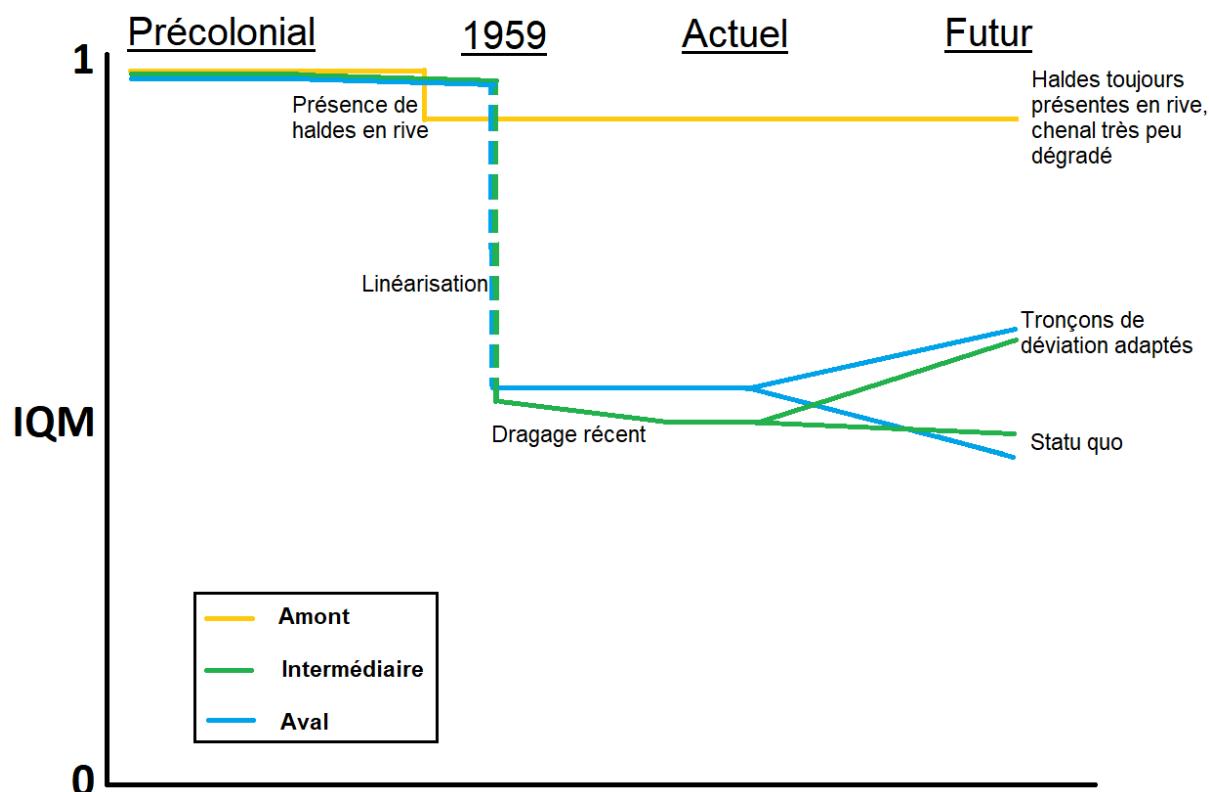


Figure 31 : Évolution temporelle de l'indice de qualité morphologique pour les trois tronçons à l'étude (passé, actuel, projeté).

Cette figure permet également d'aborder les choix d'intervention pour le futur. Tel que discuté précédemment, la déviation projetée est le seul aménagement possible afin de réduire les débits solides outre l'exploitation minière des haldes riches en magnésium. La figure propose ainsi deux scénarios, soit le statu quo et l'aménagement projeté. Il est apparent que le choix de ne pas intervenir comporte des impacts négatifs (sans compter la poursuite de l'eutrophisation des lacs fluviaux à l'aval) sur la trajectoire hydrogéomorphologique de la rivière Bécancour, particulièrement pour le tronçon aval. En effet la propagation du style divagant vers le tronçon aval est inévitable en l'absence d'un plan d'eau capable d'intercepter ces sédiments (tels le lac Noir et la fosse Lac d'Amiante projeté). Le tronçon aval est artificiellement fortement encaissé et offre ainsi peu de zones de débordements et donc de déposition sédimentaire. Ainsi, il peut être anticipé que l'arrivée d'une aggradation grossière risque d'entraîner une accélération prononcée du phénomène très lent d'élargissement actuellement en cours. Les conséquences sont d'abord l'entraînement d'un volume sédimentaire additionnel dans un corridor fluvial déjà abondant, mais également de potentiels risques aux infrastructures comme la station d'épuration des eaux usées de Thetford Mines.

6 ANALYSE DU SCÉNARIO DE DÉVIATION PROPOSÉ

Les scénarios de déviation visibles sur la Figure 2 sont basés sur la variante 2 des plans de l'étude de Chum. Ces plans présentent également une cote de 231.65 m au niveau de la fosse Lac d'Amiante projetée qui a été utilisée pour déterminer l'étendue pouvant être anticipée. Cette élévation correspond exactement au niveau d'eau modélisé au point de raccordement projeté en aval pour le débit plein bord correspondant aux marqueurs d'érosion de ce secteur. Évidemment, une modélisation détaillée des conditions actuelles et projetées sera requise afin d'identifier de façon définitive les différentes cotes d'inondations à anticiper. Pour les présentes analyses, la cote de 231.65 m est jugée suffisante.

Deux scénarios d'effluents projetés sont analysés afin d'évaluer sommairement les coûts-bénéfices d'un éloignement de l'exutoire du point d'entrée projeté de la rivière Bécancour dans la fosse Lac d'Amiante.

En somme, la présente section comporte 3 sous-sections, correspondant aux principaux enjeux pour la mise en place d'une déviation remplissant tous les objectifs souhaités :

- 1) Capacité d'interception des sédiments critiques dans la fosse Lac d'Amiante;
- 2) Conception de l'effluent projeté de la fosse Lac d'Amiante dans un secteur de pente faible;
- 3) Conception de l'affluent projeté de la fosse Lac d'Amiante dans un secteur présentant une aggradation importante et un style fluvial divagant.

Notons qu'une recherche de site analogue en aval du segment dévié en 1959 a été effectuée durant la visite terrain du 17 octobre. De tels sites sont particulièrement utiles afin de guider la conception d'un secteur perturbé possédant des caractéristiques similaires.

Malheureusement, en raison des travaux de retrait d'obstruction et d'augmentation de la capacité hydraulique mentionnés précédemment qui ont également touché l'aval de la déviation des années 1950, aucun site analogue de référence n'a pu être identifié et c'est pourquoi cette approche n'apparaît pas dans les sous-sections qui suivent.

Les trois sous-sections suivantes se terminent toutes par des recommandations en guise de synthèse pour guider avec clarté les étapes subséquentes.

6.1 CAPACITÉ DE SÉDIMENTATION DANS LA FOSSE LAC D'AMIANTE

Les calculs de sédimentation dans la fosse Lac d'Amiante présentés au Tableau 5 sont basés sur la loi de Stokes qui définit la force de traînée hydrodynamique s'exerçant sur une sphère en déplacement dans un fluide. Plus spécifiquement, la vitesse de chute (V) est déterminée par la formule suivante :

$$V = D^2(\rho_s - \rho)g / 18\mu$$

Où D est la taille de particule (m), ρ_s la densité des sédiments (2650 kg/m³), ρ la densité de l'eau (1000 kg/m³), g l'accélération gravitationnelle (9.81 m/s²) et μ la viscosité dynamique de l'eau (0.001 kg/m/s à 20°C).

La distance minimale séparant l'embouchure du tronçon amont de l'exutoire projeté de la fosse Lac d'Amiante, soit 520 mètres pour l'option 1 et 800 mètres pour l'option 2, a servi de critère dans le succès d'interception des sédiments. La distance de l'option 1 est jugée particulièrement conservatrice étant donné que les angles d'entrée et de sortie de la rivière projetée sont pratiquement parallèles. En réalité, il est peu probable que les sédiments s'orientent immédiatement vers l'exutoire. Un panache se propageant d'abord vers le sud est beaucoup plus probable, ce qui augmente la distance de sédimentation. En l'absence de modélisation du scénario de déviation, deux vitesses de propagation (0.1 m/s – réaliste et 1.0 m/s – conservatrice) dans la fosse Lac d'Amiante ont été testées. La vitesse conservatrice est basée sur les vitesses d'écoulement moyennes dans le tronçon intermédiaire au débit de récurrence 2 ans (celles-ci se stabilisent pour les crues de magnitude plus importante en raison du débordement en rive gauche). Également, deux profondeurs à l'exutoire ont été testées soit 1 mètre et 3 mètres afin de contenir la variation probable du niveau d'eau en fonction des conditions hydrologiques. Ces profondeurs sont basées sur les hauteurs d'eau modélisées au point de raccordement projeté pour les récurrences 2 ans et 100 ans, avec pour hypothèse que les conditions hydrodynamiques dans ce secteur de pente faible exercent un contrôle hydraulique sur le niveau de la fosse Lac d'Amiante (aspect abordé plus en détail à la section suivante). Ainsi, la distance de sédimentation se calcule de manière théorique en divisant la profondeur d'écoulement par la vitesse de chute d'une taille de particule donnée et en multipliant par la vitesse moyenne de l'écoulement.

Il est très intéressant de noter en premier lieu que l'option #2 d'effluent ne semble pas permettre d'intercepter une fraction plus fine que l'option #1. En effet, lorsque la distance de sédimentation devient trop grande pour l'option 1 (520 m), elle le devient également pour l'option 2 (800 m), dans tous les scénarios analysés. Ce résultat, ainsi que la probabilité faible que les sédiments se dirigent immédiatement vers l'exutoire #1, montrent que l'option #2 n'apporte pas de bénéfices clairs.

De surcroît, considérant les coûts additionnels liés à l'aménagement d'un chenal 60% plus long pour l'option #2 d'effluent, cette configuration devrait être rejetée.

Tableau 5. Calculs de sédimentation dans la fosse Lac d'Amiante (vert : interception des sédiments / rouge : non-interception des sédiments)

Sédiments		Taille (μm)	Vitesse de chute (m/s)	Profondeur: 1 m		Profondeur: 3 m	
				(V=1m/s)	(V=0.1m/s)	(V=1m/s)	(V=0.1m/s)
				Distance (m)	Distance (m)	Distance (m)	Distance (m)
Argile	Fine	0.2	3.59E-08	27829314	2782931	83487941	8348794
	Grossière	2	3.59E-06	278293	27829	834879	83488
Limon	Très fin	4	1.44E-05	69573	6957	208720	20872
	Fin	8	5.75E-05	17393	1739	52180	5218
	Moyen	16	2.30E-04	4348	435	13045	1304
	Grossier	31	8.63E-04	1158	116	3475	348
	Très grossier	63	3.57E-03	280	28	841	84
Sable	Très fin	125	1.40E-02	71	7	214	21
	Fin	250	5.61E-02	18	2	53	5
	Moyen	500	2.25E-01	4	0	13	1
	Grossier	1000	8.98E-01	1	0	3	0
	Très grossier	2000	3.59E+00	0	0	1	0

Quant aux fractions granulométriques critiques se déposant dans les lacs fluviaux à l'aval (identifiées en brun pâle au Tableau 5), la fosse Lac d'Amiante ne parviendrait pas à intercepter les limons fins et aurait plus de difficultés à intercepter les limons moyens avec un niveau d'eau plus élevé, pour les vitesses de transport plus faibles. Selon les mesures issues de l'étude de Jacques et Pienitz (2022), la moyenne des sédiments depuis la vidange du Lac Noir est d'environ 15 à 20 μm . La variabilité de classes granulométriques pouvant être interceptées selon les conditions montre la nécessité d'apporter un éclaircissement à l'aide d'une modélisation détaillée du transport sédimentaire. Les conditions les plus fréquentes et probables (profondeur de 1 m, vitesse de 0.1 m/s) interceptent la majorité des limons et une modélisation bidimensionnelle détaillée de la propagation des sédiments permettrait par exemple de valider avec précision la possibilité d'intercepter les limons fins. Un autre élément à valider est la capacité d'intercepter les sédiments en période de crues de forte magnitude. En effet, ces événements hydrologiques produiront un niveau d'eau supérieur et requerront donc des distances de sédimentation plus importantes pour éviter d'atteindre l'exutoire.

Il est bon de rappeler que la contribution sédimentaire du ruisseau Poirier et des haldes associées à la mine Normandie n'est certainement pas négligeable, mais il est également possible qu'elle soit minime par rapport à l'amont qui comprend les mines B-C et Beaver-King, fortement connectées à la rivière Bécancour. Une quantification des contributions sédimentaires respectives permettrait de mieux cerner le volume d'excès sédimentaire qui continuerait de se rendre aux lacs fluviaux à l'aval après la mise en place de la déviation proposée. Cet exercice pourra également intégrer les divers aménagements en cours de conception planifiés pour ces secteurs.

Recommandations :

Une modélisation hydrosédimentaire en 2D permettant d'évaluer précisément la capacité d'interception des fractions fines dans la fosse Lac d'Amiante projetée apportera l'éclairage nécessaire sur les bénéfices pour les lacs fluviaux en aval. Il est bon de rappeler que les distances séparant l'affluent de l'effluent (520 m et 800 m) sont jugées extrêmement conservatrices. Il est attendu que celles-ci soient en réalité beaucoup plus importantes, mais seule une modélisation détaillée permettra de le déterminer de façon définitive. Également, cette modélisation pourrait inclure un scénario où le ruisseau Poirier serait connecté au sud de la fosse Lac d'Amiante fin d'évaluer la capacité d'intercepter la charge sédimentaire de celui-ci.

Un bilan sédimentaire, appuyé notamment par la mesure en continu des matières en suspension (MES) dans la rivière Bécancour à des points d'échantillonnage stratégiques (p.ex. aval de la mine Normandie, aval du ruisseau Poirier, aval du ruisseau Nadeau, amont du ruisseau Nadeau) permettra de distinguer les apports en amont et en aval de la fosse Lac d'Amiante afin de s'assurer que la mise en place de la solution projetée soit véritablement efficace. Ici, il importe de quantifier les volumes de sédiments en provenance des différentes sources.

6.2 DYNAMIQUE HYDROGÉOMORPHOLOGIQUE À L'aval DE LA FOSSE LAC D'AMIANTE PROJETÉE

Les enjeux entourant l'effluent projeté de la fosse Lac d'Amiante sont définis par les caractéristiques de pente faible du tronçon aval actuel (0.1%) ainsi que l'allongement considérable du parcours projeté de la rivière Bécancour qui réduirait encore davantage ce gradient. La combinaison de ces facteurs fait en sorte qu'en l'absence de structure de contrôle, les conditions hydrodynamiques du tronçon aval exerçaient un contrôle du niveau de la fosse Lac d'Amiante. Ainsi, un rehaussement de l'exutoire du lac afin d'augmenter la pente d'écoulement n'aurait en réalité aucun effet hydraulique appréciable. L'augmentation de la pente serait motivée par une volonté d'introduire une géométrie hydraulique à l'équilibre, capable d'évacuer les sédiments en provenance de l'amont sans toutefois entraîner d'érosion de berge indésirable. Ce réflexe de conception peut être justifié en milieu purement fluvial; or, le contexte de l'exutoire projeté en est un où la fosse Lac d'Amiante intercepterait la majeure partie du débit solide en provenance de l'amont ce qui change considérablement les perspectives.

L'exutoire du lac Noir en 1950 présentait une allure d'eaux mortes couramment rencontrées aux extrémités de lacs. La Figure 32 illustre d'ailleurs un site analogue moderne, situé à proximité, soit le lac Bolduc, qui se trouve en amont du lac Saint-François. Ce type d'environnement, dominé par la sédimentation, tend à produire une écologie de qualité, favorisant entre autres la présence d'espèces végétales et fauniques typiques de milieux humides. Ainsi, sans représenter une restauration intégrale du lac Noir, l'exutoire de la fosse Lac d'Amiante dans le scénario de déviation projeté offre une opportunité de recréer un environnement similaire avec la panoplie de bénéfices écologiques qui en découlent.

La conception d'un tel lit d'écoulement, situé à la frontière entre le domaine fluvial et lacustre, se définit par une plaine inondable possédant une forte connectivité hydrologique. L'élévation de cette plaine pourrait initialement se trouver à une élévation très fréquemment inondée, de manière à laisser l'accumulation sédimentaire naturelle produire la configuration idéale au fil du temps. Le dimensionnement du lit d'écoulement pourra en premier lieu s'appuyer sur la largeur mesurable sur les photographies aériennes précédant l'assèchement du lac Noir. Également, les courbes régionales de géométrie hydraulique déterminées par Boulet et al. (2023) pourront être utilisées afin de valider cette dimension par rapport à celles qui sont attendues pour des environnements similaires. De façon préliminaire, une largeur de 20 à 25 mètres semble cohérente. La profondeur pourra quant à elle être définie de manière itérative en fonction des conditions hydrauliques modélisées. Une légère sinuosité pourrait être introduite dans le tracé de l'effluent afin de favoriser l'hétérogénéité du milieu. Notons que cette recommandation concerne strictement des bénéfices écologiques puisqu'il n'est pas attendu que de tels méandres soient mobiles. Évidemment, un tel milieu est favorable à la prolifération du roseau commun et toutes les mesures de mitigation afin d'empêcher sa présence devront être considérées. Par exemple, l'opportunité d'aménager ce secteur avant la mise en eau offre entre autres la possibilité d'introduire les végétaux qui rencontrent les objectifs de qualité écologique tout en réduisant les chances de prolifération de cette espèce invasive.

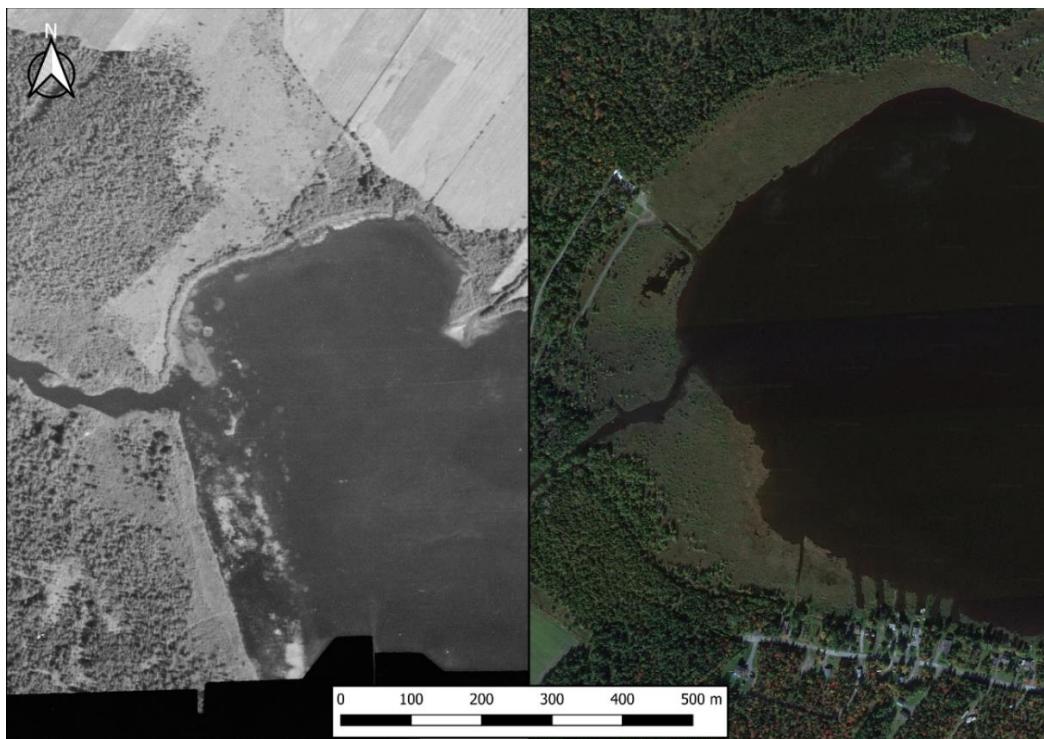


Figure 32 : Site analogue à l'exutoire du lac Noir en 1950 (gauche) visible au niveau du lac Bolduc en 2022 (droite).

Pour la largeur de la plaine de débordement, il est recommandé que celle-ci soit d'au moins 3 fois la largeur du lit mineur, soit 75 mètres.

Enfin, l'interception de la majeure partie du débit solide par la fosse Lac d'Amiante soulève un questionnement sur l'impact sur le tronçon aval actuel et plus particulièrement sur la possibilité de déclencher un phénomène de régression de fond. Or, la présence d'un banc d'accumulation important à la confluence du ruisseau Nadeau avec la rivière Bécancour, la présence d'un delta historique dans le lac Noir et le retrait de sédiments dans le ruisseau Nadeau jusqu'en 2009 sont autant d'indices suggérant que celui-ci est une source sédimentaire importante. Cet apport sédimentaire, autrefois intercepté par le lac Noir rend ainsi peu probable la possibilité d'une régression de fond significative. Toutefois, la réponse de ce tronçon reste incertaine considérant les altérations déjà subies et son faible dynamisme. Dans tous les cas, ce tronçon pourrait bénéficier de bonifications pour améliorer ses fonctions hydrogéomorphologiques.

Recommandations :

Il est possible que les courbes régionales de géométrie hydraulique ne contiennent pas suffisamment de sites présentant une pente très faible telle que celle qui est projetée. Dans cette éventualité, la recherche et la documentation de plusieurs sites analogues tels que le lac Bolduc, permettrait de construire des courbes régionales de géométrie hydraulique adaptées.

Une revue de littérature sur l'aménagement de sites comparables (exutoires de lac à pente presque nulle) devrait être menée afin de guider la conception et favoriser l'atteinte d'un état d'équilibre souhaitable. Pour le chenal, les dimensions pourraient être déterminées assez simplement en se basant sur les dimensions de la rivière Bécancour à l'aval tout en ajustant les dimensions pour s'assurer que les débits de crues souhaités soient contenus. Bien qu'on s'attende à un très faible dynamisme, il serait intéressant de prévoir une plaine de débordement afin d'assurer des fonctions écosystémiques dans le tronçon.

6.3 DYNAMIQUE HYDROGÉOMORPHOLOGIQUE EN AMONT DE LA FOSSE LAC D'AMIANTE PROJETÉE

L'affluent projeté de la fosse Lac d'Amiante correspond à l'actuel tronçon intermédiaire, pour lequel des dynamiques hydrogéomorphologiques particulières ont été identifiées. Le style fluvial divagant associé à une forte accumulation sédimentaire est incontournable dans les analyses qui mèneront à la conception du chenal de déviation. Ce processus est effectivement inévitable en raison de la transition abrupte de pente et du volume sédimentaire exacerbé en provenance de l'amont.

Une conception hydraulique traditionnelle visant à définir un chenal unique a de fortes chances d'échouer et possiblement d'entraîner des réactions indésirables de la rivière dans les années subséquentes. Bien que la rivière Bécancour ait déjà présenté un tel aspect dans le passé (tel qu'illustré par les photographies aériennes de 1950), les débits solides sont aujourd'hui trop importants pour espérer un retour à cette configuration historique.

De surcroît, les outils d'aide à la conception comme les courbes régionales de géométrie hydraulique mentionnées à la section précédente ne tiennent pas compte d'environnements fluviaux à branches multiples comme les rivières divagantes.

De manière générale, nous recommandons l'établissement d'un corridor fluvial large, capable de contenir le volume sédimentaire qui s'y déposera au fil de temps, de même que les processus d'avulsion qui surviendront subséquemment. L'état initial pourrait avoir la forme d'un cours d'eau à méandres avec un ratio largeur profondeur élevé permettant des débordements fréquents dans la plaine adjacente qui devra être excavée dans le terrain. La plaine alluviale devra permettre d'accompagner la forte accumulation sédimentaire qui s'en suivra et sa largeur sera au moins aussi importante que l'amplitude maximale des méandres historiques en amont du lac Noir (amplitude maximale de 85 mètres donc une largeur totale de 170 mètres). Le tracé initial pourra présenter des méandres d'une longueur d'onde de 220 mètres (ici aussi déterminée selon les méandres historiques) et d'une amplitude de 30 à 60 mètres (donc en deçà du maximum historique). La largeur proposée du cours d'eau est quant à elle de 25 à 30 mètres, soit l'ordre de grandeur du tracé actuel.

La fosse Lac d'Amiante projetée semble inonder un lobe qui est en grande partie contenu dans la plaine inondable projetée en rive droite (côté Ouest). Une réflexion autour de cet élément devra être faite, car dans la configuration actuelle les chances sont élevées que le cours d'eau aménagé très mobile rejoigne celui-ci à court terme, rapprochant l'embouchure de l'exutoire d'une centaine de mètres. Une possibilité serait de revoir le tracé du lit mineur pour rejoindre cette dépression immédiatement, réduisant du même coup la quantité de déblais. Une autre possibilité serait de remblayer cette dépression afin de maximiser la distance séparant l'affluent de l'effluent. En somme, les orientations gravitent surtout autour des résultats de modélisation 2D qui illustreront avec précision la sédimentation dans la fosse Lac d'Amiante projetée.

La végétalisation de la plaine devra être minimale afin de permettre l'ajustement rapide du nouveau chenal à la charge sédimentaire en provenance de l'amont puisqu'on pourra s'attendre à une évolution en méandres dynamiques suivie d'une probable morphologie divagante.

Par ailleurs, des embâcles de glace causant d'importants rehaussements du niveau d'eau sont survenus dans le passé et ont affecté le secteur de la rue du Pont. Il sera important de considérer cette dynamique dans les analyses subséquentes pour évaluer les risques et tenter de les mitiger par rapport à la situation actuelle.

En parallèle, il sera nécessaire de considérer la présence d'un exutoire de la fosse BC dans la conception; cet écoulement, dont le régime hydrologique n'est pas documenté, suit un tracé est-ouest au nord de la fosse Lac d'Amiante et au sud de la rivière Bécancour puis rejoint cette dernière environ 140 mètres en aval du ruisseau Nadeau. Ainsi, le tracé actuel de cet exutoire recoupe les tronçons de déviation amont et aval projetés. Au lieu de raccorder cet écoulement à la rivière Bécancour, il est recommandé de simplement le dévier directement dans la fosse Lac D'Amiante projetée. Ceci évite de potentiels problèmes liés au rehaussement anticipé du fond de l'affluent projeté de la fosse Lac d'Amiante et permet d'intercepter les sédiments transportés par cet écoulement directement dans la fosse. Le tracé projeté de l'écoulement dévié aurait une longueur d'environ 100 mètres à partir de l'ancienne route 112.

Il est suggéré de concevoir un chenal trapézoïdal d'une largeur totale de 20 mètres. Les talus pourront avoir une pente 1 :2 ce qui laisserait un lit d'écoulement d'une largeur de 10 mètres pour des talus d'une hauteur de 2,5 mètres. Cette largeur initiale importante vise à favoriser une réaction de sédimentation où le cours d'eau construira lui-même sa plaine inondable et un lit mineur ajusté aux conditions hydrosédimentaires. Cette approche correspond au concept de chenal sur-élargi et est considérée bien adaptée au contexte de l'exutoire de la fosse BC. Cette réaction s'est d'ailleurs déjà produite au niveau du segment situé en amont de l'ancienne 112 qui offre une largeur au fond importante qui permet au cours d'eau de former un lit mineur plus étroit évoluant dans une plaine formée par la forte charge sédimentaire. Il est également possible de construire le lit mineur lors de l'aménagement du cours d'eau pour éviter toute incertitude quant à son établissement naturel. On parle alors d'un chenal à deux niveaux, un concept intimement lié au chenal sur-élargi issu du Midwest américain. Les dimensions du lit mineur construit pourront être définies selon des courbes régionales de géométrie hydraulique, mais également des dimensions du cours d'eau actuel. Notons de façon plus générale qu'une investigation des sources sédimentaires permettra d'alimenter la réflexion quant au choix du concept d'aménagement.

Enfin, il y a lieu de rappeler l'élément discuté à la section 5.8 concernant les conséquences d'un laisser-faire à plus long terme. Si rien n'est fait, l'aggradation en cours dans le tronçon intermédiaire va se propager vers l'aval et pourrait entraîner des ajustements prononcés dans un secteur fortement encaissé. Ceci se produirait à moyen et long terme, donc il n'est pas recommandé de retirer les sédiments du tronçon intermédiaire pour éviter cette réaction en attendant la mise en place de la déviation proposée. Seul un problème majeur d'inondation dû aux embâcles pourrait justifier une telle intervention en raison des enjeux de sécurité publique.

Recommandations :

Une documentation exhaustive de l'évolution du tronçon intermédiaire (bancs d'accumulation, élargissement, etc.) à l'aide de relevés d'arpentage permettra de mieux entrevoir la trajectoire hydrogéomorphologique de ce tronçon et ainsi mieux guider la conception de l'affluent projeté de la fosse Lac d'Amiante. Il est bon de rappeler qu'il y a seulement 15 ans, ce tronçon faisait toujours l'objet de dragage, masquant ainsi sa trajectoire fluviale à plus long terme. Il serait aussi important de faire des mesures de transport en charge de fond qui pourront guider la conception de l'affluent projeté. Par exemple, des mesures du flux de transport en charge de fond permettent de raffiner les équations empiriques de charge sédimentaire (Wilcock et Crowe, 2003).

6.4 SYNTHÈSE

Le projet de restauration de la dynamique sédimentaire historique par la déviation de la rivière Bécancour dans la fosse Lac d'Amiante en est à ses débuts suite à une étude de faisabilité (Chum, 2020 pour l'APLTI). La présente étude, ainsi que les études de Jacques et Pienitz (2022), ont montré que les haldes minières situées en bordure de la rivière Bécancour dans le secteur de Black Lake sont un apport considérable de sédiments de toutes tailles qui provoquent une sédimentation active des sédiments plus grossiers du chenal entre le boulevard des Mineurs et la route 112, et une accumulation problématique des sédiments fins dans les lacs fluviaux de la rivière Bécancour situés plusieurs kilomètres en aval. En général, l'hydrogéomorphologie favorise le contrôle à la source des sédiments excédentaires générés par les activités anthropiques dans les systèmes fluviaux pour restaurer l'équilibre. Dans le cas particulier de la rivière Bécancour, le contrôle à la source des sédiments est difficilement envisageable pour ces raisons :

- (1) Apport sédimentaire excédentaire important et directement connecté au réseau hydrographique;
- (2) Complexité technique et coût pour stabiliser les pentes des haldes qui constituent les principales sources de sédiments;
- (3) Capacité de transport élevée de la rivière Bécancour en bordure des haldes.

En plus de la difficulté technique du contrôle des sédiments à la source, le secteur de la déviation proposée est lui-même déjà une déviation de la rivière Bécancour qui a été réalisée selon toute vraisemblance avec des considérations purement hydrauliques comme le démontre l'IQM assez faible de ce secteur. En effet, la déviation dans sa forme actuelle ne permet pas d'accommoder la charge sédimentaire à l'aval du boulevard des Mineurs où le chenal est en constant déséquilibre en raison du lourd historique de dragages répétitifs pour maintenir la capacité hydraulique. À l'aval de la 112, le faible dynamisme ne permet pas au chenal de récupérer ses fonctions morphologiques et de reconstruire des formes. Ainsi, cette nouvelle déviation de la rivière Bécancour dans la fosse Lac d'Amiante est un projet porteur de solutions selon les résultats de cette étude et plusieurs bénéfices découlent de sa réalisation éventuelle:

- (1) Réduire l'apport sédimentaire excédentaire dans les lacs fluviaux de la rivière Bécancour;
- (2) Recréer des chenaux fonctionnels en fonction du contexte hydrosédimentaire;
- (3) Éviter la gestion du tronçon intermédiaire dans son état actuel.

Ce projet reste une idée pertinente même si on arrivait à contrôler une partie des sources de sédiments excédentaires puisqu'il permet de restaurer la séquence d'origine du profil en long de la rivière Bécancour qui était interrompu par un grand lac fluvial avant sa vidange complète pour exploiter le minerai d'amiante du secteur. Les différentes orientations de conception, les contraintes, les risques et les recommandations sont résumés au Tableau 6.

Sur un plan plus global, bien que le projet proposé soit une déviation d'un cours d'eau en termes de conception, ce projet est aussi un projet de restauration, et se distingue sur plusieurs aspects :

- (1) L'objectif principal du projet est la restauration de la dynamique sédimentaire historique de la rivière Bécancour sur un tronçon de plusieurs kilomètres;
- (2) Un objectif secondaire du projet est d'utiliser la déviation pour réhabiliter le chenal de la rivière Bécancour même s'il n'est plus possible de restaurer le tracé historique;
- (3) Les initiateurs du projet souhaitent baser la conception du nouveau chenal sur des principes hydrogéomorphologiques permettant la création d'un milieu hydrique fonctionnel et à l'équilibre;
- (4) Le projet a une envergure unique qui a le potentiel de devenir un projet phare où les apprentissages potentiels seront riches pour le Québec, qui en est encore à ses balbutiements dans l'application de l'hydrogéomorphologie pour la conception des cours d'eau déviés et/ou restaurés;
- (5) Le projet s'inscrit dans une volonté gouvernementale d'accélérer les actions en lien avec la minimisation des conséquences de l'exploitation de l'amiante dans le Centre-du-Québec.

L'envergure du projet, qui, déjà à ce stade, génère à la fois de grandes attentes et de grandes inquiétudes, devra donc être exemplaire dans sa réalisation. En effet, un projet de cette ampleur doit se décliner en différentes étapes qui doivent toutes être réalisées avec autant de soin :

- (1) Analyse des options, de la faisabilité conceptuelle et des stratégies (cette étude et l'étude de Chum (2020));
- (2) Études d'avant-projet et de la faisabilité technique – prochaine étape à planifier;
- (3) Conception détaillée;
- (4) Construction;
- (5) Suivi post-projet.

Bien sûr, le projet comporte aussi des risques qui devront être mieux cernés par les études d'avant-projet. Sur le plan strictement hydrogéomorphologique, les risques que nous pouvons entrevoir à ce stade sont résumés au Tableau 6. Nous pensons toutefois que les bénéfices anticipés outrepassent les risques du projet. Le succès de ce projet hors norme reposera en partie sur la définition d'objectifs, qui devraient suivre l'acronyme SMART (spécifique, mesurable, atteignable, réaliste et temporel). Ces objectifs pourront être définis quand les options, les impacts et les pressions du projet seront mieux compris. Une partie de cette compréhension est fournie par cette étude. Les études d'avant-projet permettront de compléter la compréhension des implications géomorphologiques, hydrauliques, biologiques et environnementales du projet sur le milieu hydrique.

Pour supporter les études d'avant-projet à venir, il est essentiel de mettre en place un programme de mesure et/ou de suivi du transport de sédiments en suspension et en charge de fond dans la rivière Bécancour dans les tronçons d'intérêts afin d'établir un bilan sédimentaire sommaire qui alimentera le processus de conception afin de diminuer l'incertitude, mais qui servira aussi d'état de référence pour la définition des cibles du suivi post-travaux. En guise de synthèse visuelle, l'ensemble des recommandations sur le dimensionnement de chaque aménagement fluvial est illustré à la Figure 33).

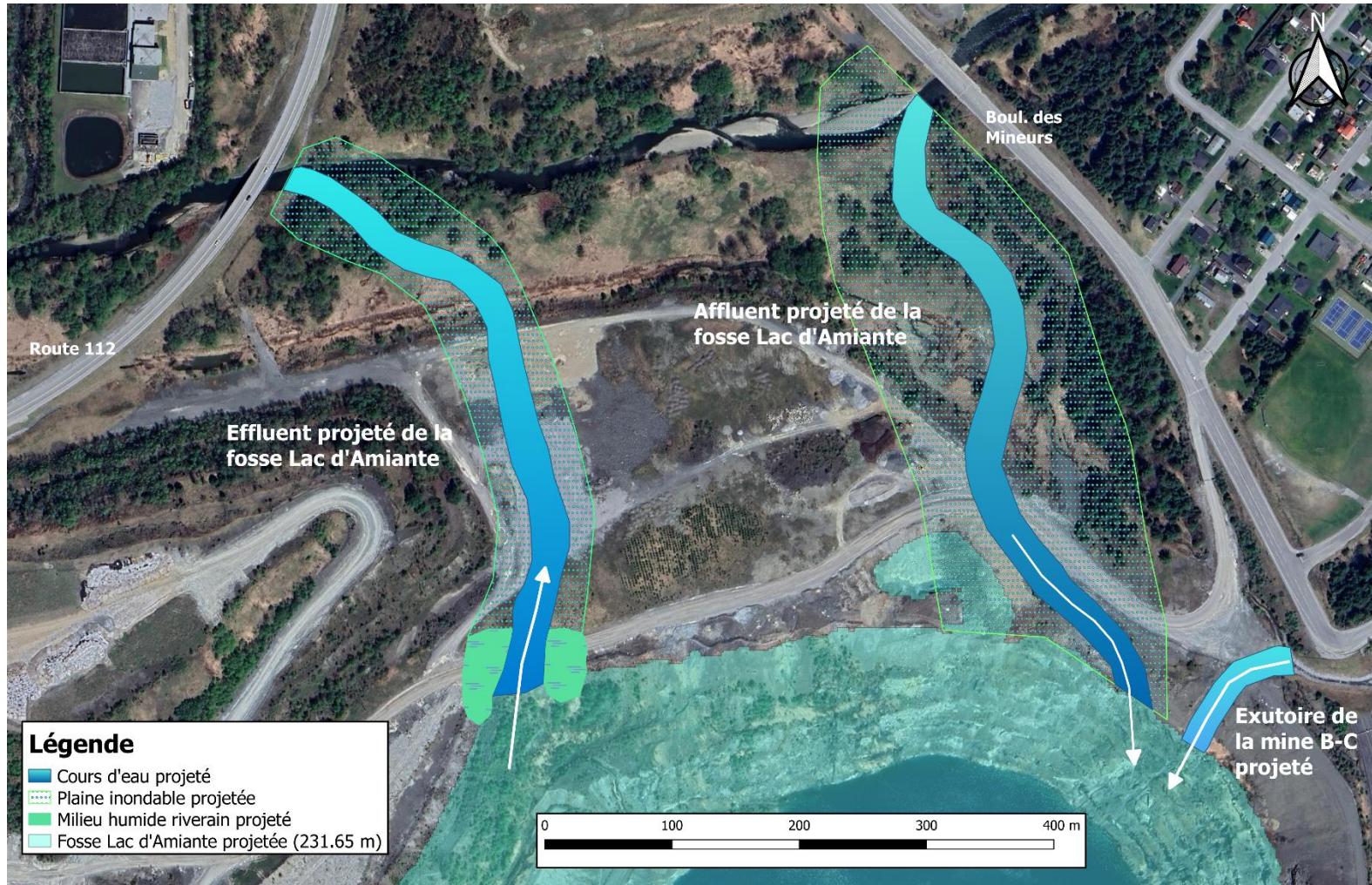


Figure 33 : Projection de l'étendue de chaque aménagement de cours d'eau projeté.

Tableau 6. Orientations de conception du projet de déviation de la rivière Bécancour dans la fosse Lac d'Amiante d'un point de vue hydrogéomorphologique. Les autres enjeux (écologiques, biophysiques, financiers, sociaux, etc.) ne font pas l'objet de cette étude et devront être considérés dans des étapes ultérieures

Secteur	Orientations de conception	Contraintes	Risques	Recommandations pour la suite
Affluent projeté de la fosse Lac d'Amiante	<p>Favoriser le tracé le plus direct/maximiser la pente afin de maximiser la capacité de transport.</p> <p>Conception structurelle initiale : chenal à méandres peu profond avec variation de la profondeur dans une large plaine alluviale. Dimensions et caractéristiques basées sur les principes hydrogéomorphologiques.</p> <p>Ajout de bois mort à considérer.</p> <p>Objectif fonctionnel final : évolution naturelle vers un style fluvial de méandres dynamiques ou divagant.</p>	Peu de possibilités dans le tracé et la pente.	Mauvaise conception menant à un chenal dysfonctionnel et des problématiques d'inondation.	<p>Mesures de transport en charge de fond dans le tronçon intermédiaire afin de bien doser la capacité de transport du chenal de déviation en fonction des apports sédimentaires.</p> <p>Mesure du transport en suspension (mesures de la turbidité en continu et courbe de calibration concentration/turbidité).</p> <p>Modélisation hydrodynamique 2D du chenal projeté.</p> <p>Modélisation hydrosédimentaire 2D axée sur le transport en suspension.</p> <p>Évaluation de la dynamique de la plaine inondable (i.e. outil Exzeco).</p>
Fosse Lac d'Amiante projetée	<p>Niveau d'eau à 231.65 m (à confirmer).</p> <p>Distance d'environ 500 m entre l'entrée et l'exutoire.</p> <p>Connecter la décharge de la mine BC dans la fosse Lac d'Amiante.</p>	Localisation de la fosse Lac d'Amiante en lien avec le réseau hydrographique et les infrastructures actuelles.	<p>Sédimentation moindre qu'attendue, notamment au niveau des limons.</p> <p>Niveau d'eau inadéquat provoquant des inondations.</p>	<p>Déterminer les élévations du lac pour différentes récurrences hydrologiques, afin de pouvoir concevoir la pente des chenaux de déviation.</p> <p>Modélisation hydrosédimentaire 2D axée sur le transport en suspension.</p>
Exutoire projeté de la fosse Lac d'Amiante (transition aval du lac vers la rivière)	<p>Conception inspirée des exutoires naturels de lacs, présentant un écoulement très lent et une forte connectivité à la plaine inondable.</p> <p>Restauration inspirée des techniques de création de milieux humides (espèces végétales et fauniques), basée sur les photos historiques/sites analogues.</p>	Pente très faible.	<p>Sédimentation plus rapide / plus lente qu'anticipée.</p> <p>Espèces exotiques envahissantes lors de la reprise végétale.</p>	<p>Modélisation hydrodynamique 2D du chenal projeté.</p> <p>Détermination des dimensions optimales (sites analogues, courbes régionales de géométrie hydraulique).</p> <p>Détermination des mesures de mitigation pour une saine reprise végétale.</p>
Effluent projeté de la fosse Lac d'Amiante	<p>Favoriser la connexion la plus directe/maximiser la pente pour diminuer la sédimentation potentielle.</p> <p>Conception structurelle initiale : chenal à méandres passifs dans une plaine inondable avec une sinuosité modérée pour maintenir une vitesse d'écoulement. Les berges du chenal pourront être fortement végétalisées pour favoriser la stabilité du tracé. Dimensions et caractéristiques basées sur les principes hydrogéomorphologiques et/ou des sites analogues.</p> <p>Objectif fonctionnel final : chenal permettant le transit de l'eau et des sédiments avec très peu de mobilité latérale.</p>	Peu de possibilités dans le tracé et la pente.	Mauvaise conception menant à un chenal dysfonctionnel et des problématiques d'inondation.	<p>Modélisation hydrodynamique 2D du chenal projeté servant à dimensionner la taille des sédiments du chenal.</p> <p>Modélisation hydrosédimentaire 2D axée sur le transport en suspension.</p>
Autres sources sédimentaires	<p>Ruisseau Nadeau.</p> <p>Ruisseau Poirier.</p> <p>Haldes du secteur de la mine Normandie.</p> <p>Autres (à évaluer).</p>	Pas de données quantitatives sur la contribution sédimentaire.	Sources importantes d'apports sédimentaires excédentaires en aval de la déviation proposée.	<p>Bilan sédimentaire visant à quantifier les principales sources de sédiments anthropiques pouvant se déposer dans les lacs fluviaux en aval.</p> <p>Mesure du transport en suspension (mesures ponctuelles de l'amont vers l'aval lors d'épisodes de crues) visant à isoler les sources sédimentaires entre la déviation et les lacs fluviaux et, au besoin, installation d'autres turbidimètres pour la mesure en continu selon les résultats.</p> <p>Contrôler les apports sédimentaires à la source lorsque possible.</p>

7 CONCLUSION

Le détournement du tronçon amont de la rivière Bécancour dans le secteur de Black Lake est certainement une solution qui sort de l'ordinaire (du moins en contexte québécois) pour atténuer la pression sédimentaire sur les lacs fluviaux en aval. Cependant, le tronçon intermédiaire où cette déviation se mettrait en place est lui-même issu d'un détournement anthropique majeur, qui a permis d'assécher le lac Noir. L'indice de qualité morphologique calculé montre d'ailleurs la qualité assez piètre de ce tronçon en raison de cet historique. De plus, la déviation dans la fosse Lac d'Amiante, sans rétablir intégralement l'environnement original du lac Noir, restaurerait minimalement la fonction d'interception sédimentaire que ce dernier assurait autrefois. Enfin, les analyses menées dans la présente étude montrent que le statu quo revêt lui-même un potentiel de conséquences allant au-delà de la continuité de la dégradation des lacs fluviaux en aval.

Sur le strict plan hydrogéomorphologique, la présente étude a permis de conclure que la déviation proposée est viable et permettra de restaurer une partie de la dynamique sédimentaire historique. Cependant, plusieurs analyses détaillées devront être menées afin notamment de modéliser avec précision les écoulements actuels et projetés de même que de quantifier les flux sédimentaires du bassin versant. Une modélisation hydraulique complète et un bilan sédimentaire (appuyé par des données terrain exhaustives) figurent parmi ces analyses subséquentes jugées cruciales pour l'acceptabilité et la réussite générale d'un tel projet. D'autres expertises seront également nécessaires, notamment au niveau des caractérisations du milieu naturel et des caractérisations environnementales. Le présent rapport constitue un pas important dans cette direction et offre plusieurs éclaircissements qui seront utiles aux différents acteurs impliqués dans les prochaines étapes.

8 LIMITATIONS

Les principales limitations de la présente étude sont les suivantes :

- ❖ Les débits extraits de l'atlas hydroclimatique sont issus d'une station hydrométrique aujourd'hui fermée. Un facteur intégrant les changements climatiques n'a pas été intégré;
- ❖ La modélisation hydraulique est dite en eau claire et ne tient pas compte des débits solides;
- ❖ Aucune mesure hydrométrique n'a été effectuée ou n'était disponible dans le cadre de ce projet. Ainsi, le modèle hydraulique n'a pas fait l'objet d'une calibration pouvant s'appuyer sur ce type de mesure;
- ❖ Les ponts traversant le domaine de modélisation n'ont pas été intégrés à la modélisation hydraulique;
- ❖ Les échantillons récoltés n'ont pas fait l'objet d'analyses granulométriques. Les analyses en lien avec la granulométrie dans le présent projet sont un mélange de données quantitatives (pebble count) et qualitatives (échantillons);

Les analyses réalisées ont tenu compte de ces limitations pour tirer des conclusions solides dépourvues d'extrapolations douteuses.

9 RÉFÉRENCES

- Annable, W.K. (1996). Morphologic relationships of rural watercourses in southern Ontario and selected field methods in fluvial geomorphology: Toronto, Ontario Ministry of Natural Resources. 92 p.
- Bagnold RA (1966) – *An approach to the sediment transport problem from general physics*, dans: Thorne CR, MacArthur RC et Bradley JB, *The Physics of Sediment Transport by Wind and Water*, American Society of Civil Engineers, New York, 231–291.
- Boulet Yan, Boivin Maxime et Biron Pascale. (2023). Rapport final sur le développement de courbes de géométrie hydraulique adaptées à différents contextes physiographiques au Québec présenté au ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP). Laboratoire d'expertise et de recherche en géographie appliquée (LERGA-QAC).
- Brookes, A. (1988). Channelized rivers – Perspectives for Environmental Management. Wiley, Chichester. 326 pages.
- Charrais J. et al. (2014). Note méthodologique pour l'utilisation de la grille d'évaluation du caractère sauvage d'un cours d'eau. Révision de mai 2019. Rivières Sauvages. 62 p.
- Choné, Guénolé & Biron, Pascale & Buffin-Bélanger, Thomas & Mazgareanu, Julia & Neal, Jeff & Sampson, Christopher. (2021). An assessment of large-scale flood modelling based on LiDAR data. *Hydrological Processes*. 35. 10.1002/hyp.14333.
- Chow, V.T. (1959) Open Channel Hydraulics. McGraw-Hill, New York.
- Chum, M. (2020) Analyse de faisabilité de la remise en eau de l'ancien lit de la rivière Bécancour. Rapport d'analyse professionnelle pour le compte de l'APLTI. 25 p.
- Church, M. (1983) Pattern of instability in a wandering gravel bed channel. *Special Publications of the International Association of Sedimentologists*, vol. 6, p. 169-180.
- Church, Michael. (2006). Bed Material Transport and the Morphology of Alluvial Rivers. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 34. 325-354. 10.1146/annurev.earth.33.092203.122721.
- Demers, S., M.A. Roy, S. Massé, C. Besnard et T. Buffin-Bélanger. (2018). Outils d'aide à la décision pour l'analyse des projets hydriques à partir de concepts en géomorphologie fluviale, Université du Québec à Rimouski, Laboratoire de géomorphologie et de dynamique fluviale. Réalisé pour le compte du ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques.

Elliott, A., Spigel, R., Jowett, I., Shankar, U., Ibbitt, R. (2010). Model application to assess effects of urbanisation and distributed flow controls on erosion potential and baseflow hydraulic habitat. *Urban Water Journal*. 7. 91-107. 10.1080/15730620903447605.

IRDA (2023), études pédologiques disponibles gratuites en ligne (téléchargé le 13 novembre 2023) : <https://www.irda.qc.ca/fr/services/protection-ressources/sante-sols/information-sols/etudes-pedologiques/>

Jacques, O. et R. Pienitz. 2022. Projet d'études paléolimnologiques des lacs du bassin de la rivière Bécancour : rapport final. Laboratoire de paléoécologique aquatique, Université Laval, Québec, 229 pp.

Lachance-Cloutier, Simon & Turcotte, Richard & Ricard, Simon & Cyr, Jean-François. (2013). Atlas hydroclimatique du Québec méridional.

Lane, E. W. (1955). The importance of fluvial morphology in hydraulic engineering. *Proceedings, American Society of Civil Engineers*, Vol. 81, Paper 745, July.

Leopold, L.B. and Wolman, M.G. (1957) River Channel Patterns, Braided, Meandering and Straight. U.S. Geol. Surv. Paper. 282-B.

Linke, S., Lehner, B., Ouellet Dallaire, C. et al. Global hydro-environmental sub-basin and river reach characteristics at high spatial resolution. *Sci Data* 6, 283 (2019).

MAPAQ (2022). Info-sols – Montérégie Ouest, <http://www.info-sols.ca/carte.php>

MDDEFP (2013). Rapport de caractérisation des résidus miniers Région de Thetford Mines. Martin Villeneuve. 218 p.

MELCC (2021). Cartographie de l'utilisation du territoire du Québec 2019. Données de SIG [ArcMap, ESRI Canada]. Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Gouvernement du Québec, Québec.

Natural Capital Project, 2024. InVEST 3.14.1. Stanford University, University of Minnesota, Chinese Academy of Sciences, The Nature Conservancy, World Wildlife Fund, Stockholm Resilience Centre and the Royal Swedish Academy of Sciences.

<https://naturalcapitalproject.stanford.edu/software/invest>

Simon, A., Hupp, C.R. (1986). Channel evolution in modified Tennessee channels. *Proceedings, Fourth Federal Interagency Sedimentation Conference*, Las Vegas, March 24–27, 1986, vol. 2, pp. 5–71–5–82.

Tarrío, D., Piégay, H. & Menendez-Duarte, R. (2020). Textural signatures of sediment supply in gravel-bed rivers: Revisiting the armour ratio. *Earth-Science Reviews*. 207. 103211. 10.1016/j.earscirev.2020.103211.

Wall, G.J., D.R. Coote, E.A. Pringle and I.J. Shelton (editors). 2002. RUSLEFAC — Revised Universal Soil Loss Equation for Application in Canada: A Handbook for Estimating Soil Loss from Water Erosion in Canada. Research Branch, Agriculture and Agri-Food Canada. Ottawa. Contribution No. AAFC/AAC2244E. 117 pp.

Wilcock, P. R., & Crowe, J. C. (2003). Surface-based transport model for mixed-size sediment. *Journal of hydraulic engineering*, 129(2), 120-128.

ANNEXE A
Reportage photographique

Tronçon aval



Photo 1 : Sédiments en provenance des haldes de la mine Normandie déposés dans la fosse de sédimentation Vézina.



Photo 2 : Rivière Bécancour dans le secteur de la mine Normandie.

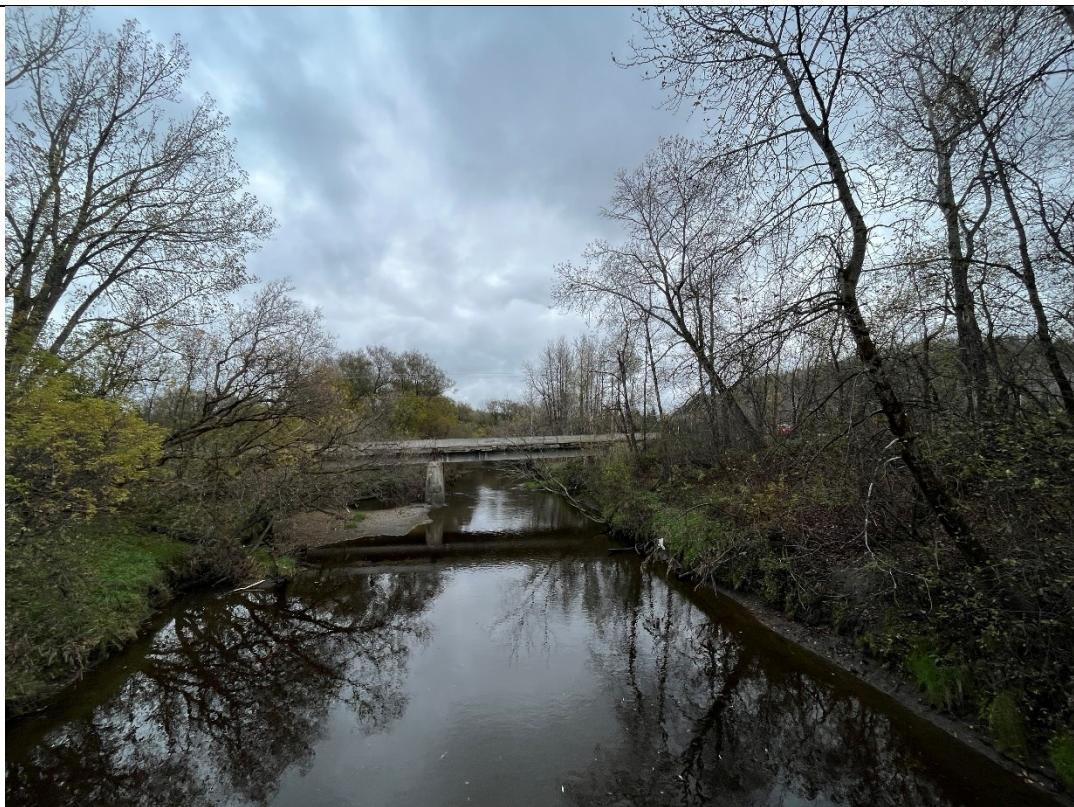


Photo 3 : Rivière Bécancour au droit du pont du chemin de Vimy.



Photo 4 : Rivière Bécancour environ 2 km en amont du chemin de Vimy.



Photo 5 : Jonction de la rivière Bécancour et du ruisseau Nadeau.



Photo 6 : Rivière Bécancour à l'exutoire de la station de traitement des eaux usées
Thetford Mines.



Photo 7 : Pont de la route 112 (côté aval) et banc #3 en rive gauche.



Photo 8 : Sédiments du banc #4



Photo 9 : Sédiments du banc #3, portion aval



Photo 10 : Sédiments du banc #3, portion amont

Tronçon intermédiaire



Photo 11 : Portion aval du tronçon intermédiaire vue du pont de la route 112.



Photo 12 : Rivière Bécancour, environ 250 mètres en amont de la route 112.



Photo 13 : Vue vers l'aval à partir du banc #2.



Photo 14 : Vue vers l'aval à partir de l'extrémité aval du banc #1.



Photo 15 : Vue vers l'amont à partir de l'extrémité aval du banc #1.



Photo 16 : Portion amont du tronçon intermédiaire vue à partir du pont du boulevard des Mineurs (banc #1 à l'avant-plan).



Photo 17 : Sédiments à la surface du banc #2, portion aval



Photo 18 : Sédiments sous la surface du banc #2, portion aval



Photo 19 : Sédiments à la surface du banc #2, portion intermédiaire



Photo 20 : Sédiments sous la surface du banc #2, portion intermédiaire



Photo 21 : Sédiments à la surface du banc #2, portion amont



Photo 22 : Sédiments sous la surface du banc #2, portion amont



Photo 23 : Sédiments à la surface du banc #1, portion aval



Photo 24 : Sédiments sous la surface du banc #1, portion aval



Photo 25 : Sédiments à la surface du banc #1, portion intermédiaire



Photo 26 : Sédiments sous la surface du banc #1, portion intermédiaire



Photo 27 : Sédiments à la surface du banc #1, portion amont



Photo 28 : Sédiments sous la surface du banc #1, portion amont

Tronçon amont



Photo 29 : Début aval du tronçon amont, vu à partir du pont du boul. Des Mineurs.



Photo 30 : Vue vers l'amont, environ 125 mètres en aval de la rue Saint-Désiré.



Photo 31 : Vue vers l'amont, secteur du parc Saint-Charles.



Photo 32 : Vue vers l'amont, environ 500 mètres en amont de la rue Saint-Désiré.



Photo 33 : Début du secteur de la mine B-C, vue vers l'amont.



Photo 34 : Bande riveraine recouverte de sédiments en provenance des haldes.



Photo 35 : Banc d'accumulation à la fin amont du relevé terrain.



Photo 36 : Fin amont de la visite terrain.



Photo 37 : Sédiments du banc situé sous le pont de la rue Saint-Désiré (rive gauche)



Photo 38 : Sédiments du banc situé dans le secteur du parc Saint-Charles (rive gauche)

ANNEXE B

Grille de calcul de l'IQM

Indice de qualité Géomorphologique

Adaptation de : Demers S, Roy MA, Massé S, Besnard C, Buffin-Bélanger T (2018). Application pour le calcul de l'indice de qualité géomorphologique adapté pour le Québec, UQAR, Laboratoire de géomorphologie et de dynamique fluviale, v.02, juin 2018.

Référence: Rinaldi M, Surian N, Comiti F et Bussetti M (2013). A method for the assessment and analysis of the hydrogeomorphological condition of Italian streams: the Morphological Quality Index (MQI). Geomorphology, 180, 96-108.

	A Amont - actuel	B Intermédiaire - actuel	C Aval - actuel	D Amont - 1950	E Aval - 1950	F Intermédiaire - 1950	G Aval - 1950
Confiné (1) ou non confiné (0)	1	0	0	1	0	0	0
Scores communs	8	26	25	8	8	0	0
Score selon cf/nfc	2	34	42	2	5	3	
Somme des scores	10	60	67	10	13	3	
Somme des maximums	124	142	142	124	142	142	
IQM (1-(score/max))	0.92	0.58	0.53	0.92	0.91	0.98	

Ajustements (trajectoire historique)

Cf	Ncf		Scores	Amont	Int.	Aval	Amont	Int.	Aval
C1 Ajustement du style fluvial									
A pas de changement			0	0			0	0	0
B changement vers un style similaire			3						
C changement vers un style différent			6		6	6			
C2 Ajustement de la largeur									
A < 15%			0	0			0	0	0
B 15-35% (non-confiné) ou ≥ 15% (confiné)			3			3			
C ≥ 35%			6		6				
C3 Ajustement du niveau du lit									
A ≤ 0.5 m			0	0			0	0	0
B > 0.5 – 3 m			4		4	4			
C1 > 3 m			8						
C2 > 6 m			12						

Anthropisation (perturbations hydro-sédimentaires, artificialités et interventions)

			Scores	Amont	Int.	Aval	Amont	Int.	Aval
A1 Altération des débits liquides (BV)									
A pas d'altération du débit plein bord ou des débits de crue		débit plein bord = récurrence 1.5 année; débit de crue = récurrence >=10 ans	0	0	0		0	0	0
B altération significative des débits de crue	> 10%		3			3			
C altération significative du débit plein bord	> 10%		6						
A2 Altération des débits solides (BV)									
A présence négligeable d'infrastructures susceptibles d'intercepter le flux sédimentaire			0	0	0	0	0	0	0
B1 présence de barrages	aire d'alimentation 5-33%		3						
B2 présence de barrages	aire d'alimentation 34-66%		6						
C1 présence de barrages	aire d'alimentation > 66%		9						
C2 présence d'un barrage à la limite amont du tronçon homogène			12						
A3 Infrastructures altérant le régime hydrologique (échelle du tronçon homogène)									
A pas d'altération du débit plein bord ou des débits de crue	débit plein bord = récurrence 1.5 année; débit de crue = récurrence >=10 ans		0	0	0	0	0	0	0
B altération significative des débits de crue	> 10%		3						
C altération significative du débit plein bord	> 10%		6						
A4 Infrastructures altérant les flux solides (échelle du tronçon homogène)									
A pas d'infrastructures pouvant intercepter le flux sédimentaire	barrages ou seuil rigides		0	0	0	0	0	0	0
B présence d'infrastructures transversales à des intervalles inférieurs à 200/1000 m	S>1% ou S<1%, respectivement		4						
C présence d'infrastructures transversales à des intervalles supérieurs à 200/1000 m	S>1% ou S<1%, respectivement		6						
Si les infrastructures transversales sont plus nombreuses que 1 tous les d1			6						
P Si les infrastructures transversales sont plus nombreuses que 1 tous les d2	d1 = 150 m et d2 = 100 m (S>1%), d1 = 750 m et d2 = 500 m (S<1%)		12						
A5 Traverses de cours d'eau									
A pas de traverses de cours d'eau	(ponts & ponceaux)		0					0	0
B présence ponctuelle de traverses de cours d'eau	<1 tous les 1000 m en moyenne		2	2	2	2			
C présence généralisée de traverses de cours d'eau	>1 tous les 1000 m en moyenne		3						
A6 Protection contre l'érosion des berges									
A pas ou présence limitée	Long <5% (somme des deux berges)		0	0	0	0	0	0	0
B présence	Long <33% (somme des deux berges)		3						
C présence significatives	Long > 33% (somme des deux berges)		6						
P Long > 50%			6						
P Long > 80%			12						
A7 Levées/digues									
A levées absentes ou distantes	Long <5% (somme des deux berges)		0					0	0
B présence de levées situées à proximité du chenal	Long < 50% (somme des deux berges)		3		2	2			
C présence de levées situées à proximité du chenal	Long ≥ 50% (somme des deux berges)		6						
P longueur > 66%			6						
P longueur > 80%			12						
A8 Rectification du tracé fluvial/dragage									
A pas d'altération dans le tracé du cours d'eau			0					0	0
B altération du tracé sur une longueur limitée	Long < 10%		2						
C altération du tracé sur une longueur significative	Long > 10%		3		3	3			
P longueur > 50% (si une pénalité à A6 et/ou A7 n'est pas déjà appliquée)			6						
P longueur > 80% (si une pénalité à A6 et/ou A7 n'est pas déjà appliquée)			12		12	12			

A9 Infrastructures pour la stabilisation du lit							
A pas de revêtements artificiels sur le lit ou de seuils rigides	0	0	0	0	0	0	0
présence de revêtements artificiels ou de seuils rigides seuils :							
B <1 à tous les 200/1000 m en moyenne ($S < 1\%$ & $> 1\%$, respectivement); revêtement sur une surface $< 15/25\%$ (substrat imperméable & perméable, respectivement)	3						
C1 présence de revêtements artificiels ou de seuils rigides seuils rigides: $> 1n$; revêtement $< 33/50\%$	6						
C2 présence généralisée d'un revêtement artificiel revêtement $> 33/50\%$	8						
P Si la surface du revêtement du lit est supérieur à 50/80%	6						
Si la surface du revêtement du lit - imperméable - est $> 80\%$	12						

A10 Opérations de dragage des sédiments							
A pas de dragage (< 20 ans)	0	0			0		
B dragage à un site sur le tronçon (< 20 ans)	3						
C dragage sur plus d'un site sur le tronçon (< 20 ans)	6						
A absence de dragage dans un passé récent (< 20 ans) et ancien (> 100 ans)	0				0	0	
B1 dragage dans un passé ancien, mais pas récent	3			3			
B2 dragage dans un passé récent, mais pas ancien	4						
C dragage dans un passé récent et ancien	6		6				

A11 Opérations de nettoyage des débris ligneux							
A pas de retrait (< 20 ans)	0	0		0	0	0	0
B retrait partiel (< 20 ans)	2		2				
C retrait total (< 20 ans)	5						

A12 Gestion de la bande riveraine							
A pas de coupe de la végétation riveraine dans un passé récent (< 20 ans)	0	0	0	0	0	0	0
B coupe sélective/totale de la végétation riveraine dans un passé récent < 50 %	2						
C coupe totale de la végétation riveraine dans un passé récent $\geq 50\%$	5						

Processus, formes et bandes riveraines

								Scores	Amont	Int.	Aval	Amont	Int.	Aval
F1 Continuité longitudinale dans le transport de sédiments et de bois														
A pas d'altération	0	0	0	0	0	0	0							
B légère altération obstacles aux flux sédimentaires et ligneux sans interception complète	3													
C altération significative interception complète des sédiments et du bois	5													
F2 Présence d'une plaine alluviale moderne														
A présence continue et large Long > 66 % & Lar > 2 x Lar du cours d'eau	0											0	0	
B1 présence discontinue Long 10-66% & Lar > 2 x Lar du cours d'eau OU Long > 66% & Lar < 2 x Lar du cours d'eau	2													
B2 présence discontinue Long 10-66% & Lar < 2 x Lar du cours d'eau	3													
C présence négligeable d'une plaine alluviale moderne Long < 10%	5		5	5										
F3 Connectivité entre le corridor fluvial et les versants														
A Connectivité complète Long > 90%	0	0							0					
B connectivité significative Long 33-90%	3													
C faible connectivité Long < 33%	5													
F4 Processus d'érosion des berges														
A érosion des berges dispersée Long > 10%, distribué sur > 33% de la Long	0		0						0	0				
B érosion des berges limitée/localisée ou érosion des berges par mouvements de masse Long 2-10% OU érosion sur une Long > 10%, mais concentré sur < 33 % de la Long OU mouvements de masse sur une Long 25-50%	2						2							
C pas d'érosion des berges ou érosion des berges significative par mouvements de masse Long < 2% OU mouvements de masse sur une Long > 50%	3													
F5 Présence d'un corridor d'érodabilité potentiel														
A présence d'un corridor long et large Long > 66 % & Lar > 2 x Lar du cours d'eau	0	0	0						0	0				
B présence d'un corridor court ou étroit Long > 66 % & Lar < 2 x Lar du cours d'eau OU Long 33-66 % & Lar > 2 x Lar du cours d'eau	2													
C présence d'un corridor limité Long < 33%	3													
F6 La configuration du lit														
A les formes du lit sont cohérentes avec la pente de la vallée	0	0							0					
B les formes du lit ne sont pas cohérentes avec la pente de la vallée	3													
C altération complète des formes du lit ou la présence d'un lit artificiel	5													
F7 Unités géomorphologiques dans le chenal et variabilité de la largeur (en plan)														
A pas d'altération Long d'altération < 5%	0								0	0				
B altération sur une longueur limitée Long d'altération < 33%	3		3											
C altération sur une longueur significative Long d'altération > 33%	5			5										
F8 Unités géomorphologiques dans la plaine alluviale moderne														
A présence de formes alluviales - méandres abandonnés, chenaux secondaires, autres	0													
B présence d'ancienne formes alluviales pouvant être réactivées	2										2			
C pas de formes alluviales	3		3	3							3			
F9 Variabilité de la section transversale (profondeur)														
A pas d'altération de l'hétérogénéité de la section transversale Long d'altération < 5%	0	0							0	0	0			
B altération sur une longueur limitée Long d'altération < 33%	3		3											
C altération sur une longueur significative Long d'altération > 33%	5			5										
F10 La structure du substrat														
A hétérogénéité naturelle du lit sans colmatage	0	0							0					
B présence discontinue de colmatage interstitiel ($\leq 50\%$)	2													
C1 enfouissement par des sédiments fins ($> 2\text{cm}$; $\leq 50\%$ de la surface du lit)	5													
C2 absence de sédiments naturels en surface (alluvions)	6													
A hétérogénéité naturelle du lit sans colmatage	0		0								0	0		
B présence discontinue de colmatage interstitiel ($\leq 50\%$) pavage consolidé	2													
C1 enfouissement par des sédiments fins ($> 2\text{cm}$; $\leq 50\%$ de la surface du lit) présence occasionnelle d'affleurement rocheux due à une incision récente (Long $\leq 33\%$)	5						5							
C2 absence de sédiments naturels en surface (alluvions)	6													
C2 enfouissement par des sédiments fins ($> 2\text{cm}$; $> 50\%$ de la surface du lit) présence significative d'affleurements rocheux due à une incision récente (Long $> 33\%$)	6													
F11 Présence de bois mort														
A présence significative de bois dans le tronçon	0											0		
B présence négligeable de bois dans une partie du tronçon Long < 50%	2						2							
C présence négligeable de bois dans une grande partie du tronçon Long > 50%	3	3	3	3					3	3				
F12 Largeur de la bande riveraine														

A	bande riveraine large	couverture végétale > 90% sur 50 mètres sur chaque berge	0					
B	bande riveraine intermédiaire	couverture végétale 33-90% sur 50 mètres sur chaque berge	2	2			2	
C	bande riveraine étroite	couverture végétale < 33% sur 50 mètres sur chaque berge	3					
A	bande riveraine large	Lar > 2 x la Lar du cours d'eau	0		0			0
B	bande riveraine intermédiaire	Lar 0.5 - 2 x la Lar du cours d'eau	2			2		
C	bande riveraine étroite	Lar < 0.5 x la Lar du cours d'eau	3				3	
F13 Étendues linéaires de la bande riveraine								
A	présence d'une bande riveraine sur toute la longueur	Long > 90%	0		0	0		0
B	présence d'une bande riveraine sur une longueur intermédiaire	Long 33-90%	3	3			3	
C	présence d'une bande riveraine sur une courte longueur	Long < 33%	5				5	

avízo

EXPERTS-CONSEILS

AVIZO EXPERTS-CONSEILS

Depuis plus de 25 ans, notre prestation de services en ingénierie-conseil couvre principalement le domaine des infrastructures civiles de distribution en eau potable, collecte et traitement des eaux usées et du génie végétal. Nous accompagnons nos clients à travers différentes études à caractère environnemental dans le domaine de l'eau, des sols ainsi qu'en écologie et biologie pour les milieux naturels. Au fil du temps, nous nous sommes entourés d'une équipe de professionnels variée. Nous comptons sur le savoir-faire d'ingénieurs, de biologistes, de maîtres en environnement, d'agronomes, de chimistes, d'urbanistes, de géomaticiens, de géographes, de technologues, de techniciens ainsi que notre personnel administratif. Notre gamme de services nous permet de répondre aux attentes d'une clientèle variée.

NOTRE MISSION

Afin d'assurer le lien de confiance auprès de notre clientèle, nous avons déterminé notre mission en phase avec les besoins de celle-ci. Nous nous engageons donc à vous offrir une expérience client supérieure par des solutions durables et par la qualité de nos services en ingénierie, en environnement et en construction, en assurant la protection des milieux naturels et la pérennité des infrastructures municipales, commerciales, industrielles et privées

AVIZO.CA

T. 1 800 563-2005

F. 1 833 878-4114

SIÈGE SOCIAL

1125, rue de Cherbourg
Sherbrooke (Québec) J1K 0A8

MONTRÉAL

1595, rue Bégin
Montréal (Québec) H4R 1W9.

QUÉBEC

891, boul. Charest Ouest, bureau 201
Québec (Québec) G1N 2G9

GRANBY

126, rue Principale, bureau 201
Granby (Québec) J2G 2V2

DRUMMONDVILLE

330, rue Cormier, bureau 201
Drummondville (Québec) J2C 8B3