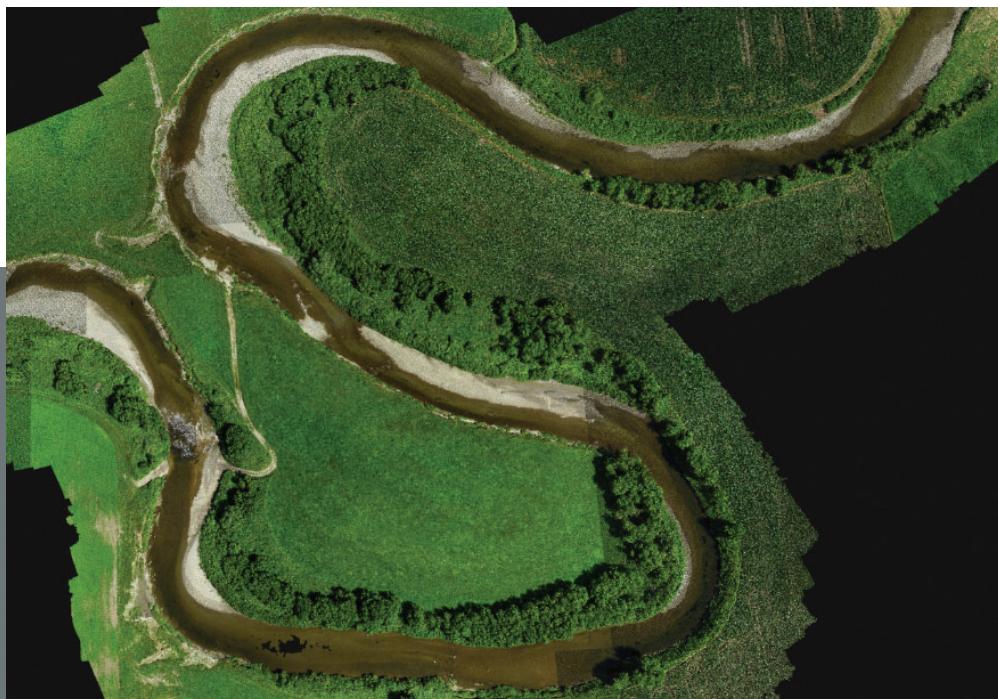


Ville de Victoriaville en collaboration avec l'OBV COPERNIC

Étude de la dynamique sédimentaire de la rivière Bulstrode entre les barrages Beaudet et Sainte-Sophie

Rapport final

HS00232



CIMA+

Numéro de projet CIMA+ : HS00232
Le 25 mars 2020 – Révision B

Ville de Victoriaville en collaboration avec l'OBV COPERNIC

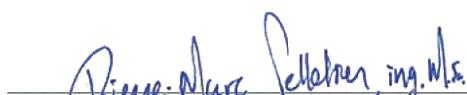
Étude de la dynamique sédimentaire de la rivière Bulstrode entre les barrages Beaudet et Sainte-Sophie

Rapport final

Préparé par :


Geneviève Lamont, ing. jr.
Nº de membre O.I.Q. : 5068613

Préparé par :


Pierre-Marc Pelletier, ing., M. Sc.
2020-03-27
Nº de membre O.I.Q. : 5019504

Vérifié par :


Mathieu Lemay, ing.
Nº de membre O.I.Q. : 130720



900-740, rue Notre-Dame Ouest,
Montréal QC H3C 3X6

Numéro de projet CIMA+ : HS00232
Le 25 mars 2020

REGISTRE DES RÉVISIONS ET ÉMISSIONS

Nº de révision	Révisé par	Date	Description de la modification et/ou de l'émission
A	ML	2020-02-28	Préliminaire pour commentaires
0	ML	2020-03-25	Final pour signature

Propriété et confidentialité

« À moins d'entente entre CIMA+ s.e.n.c. et son client à l'effet contraire, tous les documents, qu'ils soient imprimés ou électroniques, ainsi que tous les droits de propriété intellectuelle qui y sont contenus, appartiennent exclusivement à CIMA+ s.e.n.c., laquelle réserve tous ses droits d'auteur. Toute utilisation ou reproduction sous quelque forme que ce soit, même partielle, est strictement interdite à moins d'obtenir l'autorisation de CIMA+ s.e.n.c. »

Table des matières

Sommaire exécutif	9
1. Introduction	11
1.1 Contexte.....	11
1.2 Description du mandat et objectifs.....	11
1.3 Présentation du rapport.....	12
2. Contexte physique des principaux éléments à l'étude.....	13
2.1 Prise d'eau de la ville de Victoriaville	13
2.2 Tronçon de la rivière Bulstrode à l'étude	16
2.3 Description du bassin versant.....	17
2.4 Profil en long de la rivière Bulstrode sur le tronçon à l'étude	19
2.5 Barrage Beaudet et gestion du réservoir	20
2.5.1 Description du barrage Beaudet	20
2.5.2 Caractéristiques physiques du réservoir Beaudet.....	24
2.5.3 Mode de gestion du barrage et contraintes d'exploitation	25
2.6 Barrage Sainte-Sophie	26
2.7 Barrage Princeville	27
2.8 Autres structures hydrauliques	28
3. Données et observations hydro-sédimentaires	31
3.1 Résumé des sources d'information sur les sédiments présents dans le réservoir Beaudet et la rivière Bulstrode.....	31
3.2 Ensemble observé dans le réservoir Beaudet.....	32
3.3 Relevés de la charge sédimentaire en suspension (IRDA et MCR)	34
3.4 Relevés géotechniques dans le réservoir Beaudet (SMi - Laboratoires Shermont).....	36
3.5 Relevés par drone	37
3.6 Relevés hydrométriques	38
3.7 Relevés granulométriques	39
3.8 Caractérisation des berges.....	40
4. Hydrologie	44
4.1 Généralités.....	44
4.2 Information hydrométrique disponible.....	44
4.3 Approche pour la reconstitution des débits sur l'ensemble du bassin versant.....	45
4.4 Débits reconstitués à l'entrée du réservoir Beaudet.....	45
4.5 Débits quotidiens à l'entrée du réservoir Beaudet.....	46
4.6 Débits mensuels à l'entrée du réservoir Beaudet.....	47
4.7 Analyse fréquentielle des crues à l'entrée du réservoir Beaudet.....	48
5. Modélisation hydrodynamique de la rivière Bulstrode	51
5.1 Approche.....	51
5.2 Relevés bathymétriques, topographie et LiDAR	51
5.3 Relevés hydrométriques.....	53
5.4 Calibration et validation du modèle.....	54

6. Modélisation hydro-sédimentaire de la rivière Bulstrode	56
6.1 Généralités	56
6.2 Approche	57
6.3 Différenciation du transport par charriage et par suspension	60
6.4 Données utilisées	61
6.5 Calibration du modèle	62
6.6 Résultats de calibration	63
6.6.1 Accumulation de sédiments dans le réservoir Beaudet	63
6.6.2 Quantité de sédiments en suspension	63
6.6.3 Transport de sédiment en fonction du débit	65
6.6.4 Charge de fond	67
7. Analyse de l'impact de solutions pour la réduction de l'ensablement du réservoir Bulstrode	68
7.1 Réduction de l'ensablement du réservoir par laminage des débits de crue	68
7.1.1 Approche #1 : Approche « théorique » - Conservation du volume de l'hydrogramme	68
7.1.2 Approche #2 : Approche « théorique » - Réduction du volume de l'hydrogramme	69
7.1.3 Approche #3 : Construction d'un ouvrage de laminage des crues sur le cours de la rivière Beaudet	70
7.1.4 Approche #4 : Constructions de « petits » seuils dans le cours de la rivière Beaudet	71
7.2 Stabilisation des berges sur le tronçon Tr.H.2	74
7.3 Vidange des sédiments hors crue	74
7.4 Éclusage des crues	75
7.4.1 Opinions sur la viabilité de ces approches	76
8. Conclusions et recommandations	78
Références	80

Liste des tableaux

Tableau 2.1 : Description des ponts et des passerelles	28
Tableau 3.1 : Résumé des informations contenues dans les études sur la rivière Bulstrode	31
Tableau 3.2 : Comparaison des pertes de volumes du réservoir Beaudet et accumulation de sédiments (réf. 6)	33
Tableau 3.3 : Volume de sédiments accumulés pour différentes périodes	33
Tableau 3.4 : Stations de l'IRDA dans la portion aval du tronçon de rivière (Source : Rapport IRDA) ..	34
Tableau 3.5 : Granulométries des échantillons	42
Tableau 3.6 : Nature des sols	43
Tableau 4.1 : Caractéristiques des stations hydrométriques du MELCC à proximité	45
Tableau 4.2 : Caractéristiques des stations hydrométriques de l'IRDA dans la zone aval (réf. 5)	45
Tableau 4.3 : Résumé des analyses fréquentielles effectuées par Concordia, Idée-Eau et MELCC	49
Tableau 4.4 : Analyse fréquentielle et apports en pointe au réservoir Beaudet	50
Tableau 6.1 : Fonctions de transport de sédiments	59
Tableau 6.2 : Stations de l'IRDA utilisées pour le modèle hydrosédimentaire	61
Tableau 6.3 : Comparaison des volumes accumulés dans le réservoir Beaudet observés et modélisés	63
Tableau 6.4 : Volume total de sédiment en suspension modélisé et observé	63
Tableau 7.1 : Réduction de l'ensablement dans le réservoir Beaudet par suite de la réduction des pointes de crues – approche « théorique » avec conservation du volume	69
Tableau 7.2 : Réduction de l'ensablement dans le réservoir Beaudet par suite de la réduction des pointes de crues – approche « théorique » avec réduction du volume	70

Liste des figures

Figure 2.1 : Localisation du réservoir Beaudet, de la prise d'eau et de la zone de refoulement (source : Google Earth)	14
Figure 2.2 : Localisation du réservoir Beaudet à Victoriaville	15
Figure 2.3 : Emplacement du tronçon modélisé de la rivière Bulstrode (source : Google Earth)	16
Figure 2.4 : Bassin versant de la rivière Bulstrode et occupation du territoire (source : Google Earth) ..	17
Figure 2.5 : Limite des sous-bassins versants (source : Google Earth)	18
Figure 2.6 : Profil en long du tronçon modélisé (Source : Modèle HEC-RAS – CIMA+)	19
Figure 2.7 : Ouvrage évacuateur du barrage Beaudet (source : Google Earth)	20
Figure 2.8 : Culée droite du barrage vue en plan (réf. 14)	21
Figure 2.9 : Élévations amont et aval du barrage (réf. 15)	22
Figure 2.10 : Culées du barrage (réf. 16)	23
Figure 2.11 : Topographie du réservoir lors de la construction (réf. 17)	24
Figure 2.12 : Vue de l'aval du barrage Sainte-Sophie (Réf : CIMA+ août 2019)	26
Figure 2.13 : Vue de l'amont du barrage Sainte-Sophie et pertuis (Réf : CIMA+, août 2019)	26
Figure 2.14 : Barrage de Princeville (Réf : CIMA+, août 2019)	27
Figure 2.15 : Deux ponts cyclistes	28
Figure 2.16 : Pont route 116 et pont route 263	29

Figure 2.17 : Pont 11 ^e rang E, 13 ^e rang.....	29
Figure 2.18 : Pont VTT et de la route Lambert.....	29
Figure 2.19 : Croquis du pont P-04776 (Réf. : CIMA+, août 2019)	30
Figure 3.1 : Localisation des stations de l'IRDA (source : Rapport IRDA)	35
Figure 3.2 : Concentrations de sédiments en suspension observées et débit à l'entrée du réservoir Période du 11 avril 2018 au 24 juillet 2019 (source : IRDA)	36
Figure 3.3 : Analyse des dépôts de sable et gravier dans le réservoir Beaudet (source : Smi).....	37
Figure 3.4 : Aperçu de l'envergure des relevés bathymétriques (source : Google Earth)	39
Figure 3.5 : Imagerie aérienne avec drone des méandres entre les PK-12 et 13 (source : CIMA+).....	41
Figure 4.1 : Emplacement des stations hydrométriques à proximité du tronçon à l'étude (source : Google Earth)	44
Figure 4.2 : Débits quotidiens à l'entrée du réservoir Beaudet	46
Figure 4.3 : Débits maximums mensuels à l'entrée du réservoir Beaudet de 1979 à 2019.....	47
Figure 4.4 : Débits moyens mensuels à l'entrée du réservoir Beaudet de 1979 à 2019	47
Figure 4.5 : Débits minimums mensuels à l'entrée du réservoir Beaudet de 1979 à 2019.....	48
Figure 5.1 : Modèle numérique d'élévation produit par Concordia (source : Figure 1 de la réf. 21)	52
Figure 5.2 : Modèle numérique de terrain utilisé dans le modèle hydrodynamique	53
Figure 5.3 : Calibration à l'aide des lignes d'eau obtenues avec le relevé LiDAR.....	55
Figure 6.1 : Écoulement quasi-transitoire utilisée dans Hec-Ras (réf. Hec-Ras)	58
Figure 6.2 : Particules en transports par charriage ou en suspension (source : EPFL (réf. 29))	60
Figure 6.3 : Concentration de sédiments en suspension modélisées et débit à l'entrée du réservoir – Période du 11 avril 2018 au 24 juillet 2019	64
Figure 6.4 : Comparaison des concentrations de sédiment en suspension modélisées et observées 11 avril 2018 au 24 juillet 2019.....	64
Figure 6.5 : Comparaison des volumes de sédiments en suspension modélisée (avec et sans injection de sédiments) et observée par l'IRDA- Période du 11 avril 2018 au 24 juillet 2019.....	65
Figure 6.6 : Transport de sédiments en fonction du débit - Période du 11 avril 2018 au 24 juillet 2019 – Modélisation HEC-RAS.....	66
Figure 6.7 : Volume de sédiments accumulé dans le réservoir Beaudet en fonction du débit - Période du 11 avril 2018 au 24 juillet 2019 – Modélisation HEC-RAS	66
Figure 7.1 : Profil en long de la rivière Bulstrode en amont du barrage Beaudet et localisation du barrage considéré pour la modélisation	71
Figure 7.2 : Profil en long de la rivière Bulstrode en amont du barrage Beaudet et localisation des seuils (5) considérés pour la modélisation	72
Figure 7.3 : Profil en long de la rivière Bulstrode en amont du barrage Beaudet et localisation des seuils (9) considérés pour la modélisation	72
Figure 7.3 : Profil en long de la rivière Bulstrode en amont du barrage Beaudet et localisation (en rouge) du secteur considéré pour la mise en place de protection contre l'érosion.....	74
Figure 7.4 : Profil en long du réservoir Beaudet et de la portion aval de la rivière Bulstrode du 24 juillet 2014 et du 24 octobre 2018	76

Liste des Annexes

- Annexe A - Caractérisation des sédiments de la rivière Bulstrode
- Annexe B - Relevé des ouvrages sur le tronçon de la Bulstrode
- Annexe C - Modèle numérique de terrain
- Annexe D - Sections transversales du modèle HEC-RAS
- Annexe E - Calibration des du modèle HEC-RAS

Sommaire exécutif

Dans le cadre du projet de restauration du réservoir Beaudet pour assurer l'alimentation en eau potable de la ville de Victoriaville, la ville et l'organisme de bassin versant COPERNIC cherchent à évaluer différentes stratégies d'intervention « durables » sur le bassin versant qui permettraient de limiter, voir éliminer la nécessité de recourir à des méthodes d'interventions dites « non définitives », des méthodes d'interventions qui requièrent d'être reproduites au fil du temps afin d'être efficaces. Les prémisses de cette étude identifient déjà les stratégies « durables » comme étant la réduction du transport sédimentaire à sa source même par des méthodes souvent employées en milieu urbain ou agricole, soit par la rétention du débit de ruissellement afin de réduire les pointes de crues, ou le captage des sédiments afin d'en éviter le transport. Une autre famille de solutions visant à faciliter le transit des sédiments dans le réservoir Beaudet par la modification des règles de gestion du barrage a également été considérée.

Afin d'évaluer l'efficacité de ces stratégies à réduire ou éliminer l'ensablement du réservoir Beaudet, CIMA+ a tout d'abord réalisé un modèle de la dynamique sédimentaire de la rivière Bulstrode, entre les barrages Beaudet et Sainte-Sophie. Cette modélisation est basée sur de multiples études préalables et sources de données, tel que les données LiDAR, des photographies aériennes, un relevé bathymétrique du tronçon à l'étude, de nombreuses sources de données hydrométriques, les données historiques du niveau d'eau dans le réservoir Beaudet, le plan de gestion du barrage, etc. Une campagne de relevés géotechniques ainsi qu'une campagne de relevés photographiques par drone a également été réalisée afin de permettre de caractériser la nature des matériaux sur l'ensemble des berges et du lit de la rivière du tronçon à l'étude.

Différentes stratégies pour limiter l'ensablement du réservoir Beaudet ont été testées au modèle. La première famille de solution consiste en la réduction des débits de crue ou la captation des sédiments. Cette famille de solution s'est avérée peu efficace pour les raisons suivantes :

- + La taille des sédiments présents et la pente de la rivière font en sorte que le transport sédimentaire dans la rivière Bulstrode débute pour des crues de faible importance. Ainsi, pour que ces solutions soient efficaces, il faudrait retenir de très grands volumes d'eau (plusieurs fois le volume du réservoir Beaudet), ce qui apparaît déraisonnable.
- + La quantité d'eau retenue est telle que la solution a probablement de grands impacts environnementaux sur l'ensemble de la rivière Bulstrode, voir même sur l'ensemble de la rivière Nicolet.
- + Malgré la construction d'ouvrages d'importance, le réservoir continue de s'ensabler, mais à un rythme moins rapide. Bref, malgré des investissements majeurs, la solution n'est pas entièrement durable.
- + L'ajout de protection contre l'érosion sur plusieurs kilomètres de rivière ne permet pas d'éliminer l'ensablement du réservoir Beaudet.

Pour ce qui est de la modification du mode de gestion du réservoir Beaudet, cette famille de solutions a montré un certain potentiel intéressant. Toutefois, la zone deltaïque sablonneuse localisée dans la zone de refoulement du réservoir probablement formée depuis la création du réservoir représente un enjeu important. Lors de l'abaissement des niveaux d'eau dans le réservoir nécessaire à la création de vitesses pour le transit sédimentaire, des vitesses importantes sont créées dans cette zone et les sédiments qui s'y trouvent sont transportés plus à l'aval dans le réservoir. Ainsi, sans le dragage préalable de cette zone, il serait difficile d'obtenir des résultats efficaces.

En conclusion, il nous apparaît que le transport sédimentaire dans la rivière Bulstrode soit un processus naturel d'envergure. Ainsi, l'application de méthodes similaires à celles utilisées pour réduire l'impact sur l'intensité du ruissellement et le transport sédimentaire additionnel créé par les modifications anthropiques de plus petite envergure nécessaires à l'aménagement du territoire semble être inefficace pour permettre d'éliminer de façon durable l'ensablement du réservoir Beaudet. Toutefois, certaines mesures simples, comme l'éclusage des crues par le barrage, ont le potentiel de réduire le rythme d'ensablement du réservoir, à condition que des travaux préalables soient effectués pour excaver les sédiments accumulés dans la partie amont du réservoir.

1. Introduction

1.1 Contexte

Le réservoir Beaudet, situé sur la rivière Bulstrode à Victoriaville, sert de réservoir principal d'eau brute pour l'usine de traitement d'eau potable. Depuis plusieurs années, la Ville de Victoriaville (ci-après « la Ville ») s'inquiète de l'ensablement du réservoir, qui réduit graduellement le volume d'eau disponible pour l'usine; selon la Ville, la réserve d'eau brute atteindra un volume tel que l'approvisionnement d'eau brute en période d'étiage sévère pourrait être compromise. Dans ce contexte, la Ville a entrepris de trouver des solutions afin d'assurer son approvisionnement en eau. À ce jour, de nombreuses études ont été entreprises par, entre autres, la Ville, l'organisme de bassin versant COPERNIC, l'IRDA et plusieurs chercheurs universitaires afin d'identifier les sources des sédiments et leurs caractéristiques, ainsi qu'étudier les solutions possibles pour résoudre le problème d'ensablement du réservoir.

Cette étude, réalisée en collaboration avec les autres études en cours, est l'une des nombreuses initiatives visant à présenter une vision globale de la dynamique sédimentaire sur l'ensemble du bassin versant, des tributaires et du cours principal de la rivière Bulstrode et de trouver les approches optimales pour la gestion durable du réservoir Beaudet et de son bassin versant. Celle-ci est limitée au cours principal de la rivière Bulstrode, entre les barrages de Sainte-Sophie et Beaudet. Les résultats des autres études en cours et passées sont prises en compte pour l'élaboration des analyses.

1.2 Description du mandat et objectifs

Dans le cadre de ce projet, CIMA+ a reçu deux mandats distincts mais complémentaires. Le premier mandat, attribué par l'organisme de bassin versant COPERNIC, vise à effectuer des relevés terrains relatifs à la dynamique hydro-sédimentaire de la rivière Bulstrode. Plus particulièrement, ce mandat consiste à procéder en :

- + un relevé bathymétrique;
- + un relevé de la ligne d'eau;
- + un relevé de débit;
- + un relevé de la géométrie des ponts;
- + la caractérisation des berges de la rivière Bulstrode, entre le barrage Beaudet (en aval), et le barrage de Sainte-Sophie (en amont), soit un tronçon d'environ 25 km.

En parallèle, la Ville de Victoriaville a mandaté CIMA+ afin de préciser, à l'aide d'un modèle hydro-sédimentaire du tronçon décrit ci-haut, la quantité et la saisonnalité des sédiments transitant dans la rivière Bulstrode. La présente étude vise à vérifier si une modification des volumes de crue pourrait réduire la sédimentation dans le réservoir. De plus, cette étude vise à localiser et à quantifier les interventions nécessaires sur les berges de la rivière afin de réduire l'ensablement du réservoir Beaudet.

Cette étude permettra également de répondre au Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC), qui désire comprendre la quantité relative des sédiments transportés par suspension et par charriage.

Enfin, la Ville souhaite utiliser ce modèle afin de vérifier si une gestion différente du réservoir Beaudet permettrait de réduire le dépôt de sédiments dans le réservoir. Les deux modes d'opération suivants sont envisagés :

1. un soutirage hors crue;
2. un abaissement du réservoir en période de crue (aussi appelé « éclusage »).

1.3 Présentation du rapport

Ce rapport fait état des relevés, hypothèses, analyses et calculs effectués en cours de mandat. Ses principaux chapitres sont :

- + La présente introduction;
- + La présentation du contexte physique des principaux éléments à l'étude;
- + Le résumé des données et observations hydro-sédimentaires;
- + L'analyse hydrologique;
- + La présentation de la modélisation hydrodynamique de la rivière Bulstrode;
- + La présentation de la modélisation hydro-sédimentaire de la rivière Bulstrode;
- + L'analyse de l'impact de solutions pour la réduction de l'ensablement du réservoir Bulstrode;
- + Le sommaire des principales conclusions et recommandations.

2. Contexte physique des principaux éléments à l'étude

2.1 Prise d'eau de la ville de Victoriaville

La prise d'eau de Victoriaville est située dans le réservoir Beaudet, situé aux abords de la ville de Victoriaville, entre le secteur des Éboulis et le parc industriel P.A. Poirier, comme présenté à la figure 2.1 et à la figure 2.2. Le réservoir Beaudet a été créé en 1976, par la construction du barrage Beaudet dans le cours principal de la rivière Bulstrode, avec l'objectif spécifique de permettre l'alimentation de la prise d'eau de la ville de Victoriaville et de l'usine Parmalat Canada inc. ainsi qu'à des fins récréatives et de villégiature. Le rehaussement local des eaux de la rivière par le barrage est contenu en partie par des digues érigées de part et d'autre de la rivière. Le réservoir d'eau ainsi créé permet, entre autres, d'assurer un volume suffisant pour alimenter l'usine de traitement d'eau potable Hamel, qui dessert une grande partie de la population locale.

Le rehaussement des eaux dans le réservoir engendre un ralentissement de l'écoulement de la rivière Bulstrode. Ce ralentissement de l'écoulement diminue localement la capacité naturelle de la rivière à transporter les sédiments, qui s'accumulent peu à peu dans le réservoir. Le volume de sédiments qui s'accumule ainsi dans le réservoir remplace progressivement le volume d'eau, réduisant graduellement le volume d'eau disponible pour les habitants de Victoriaville.

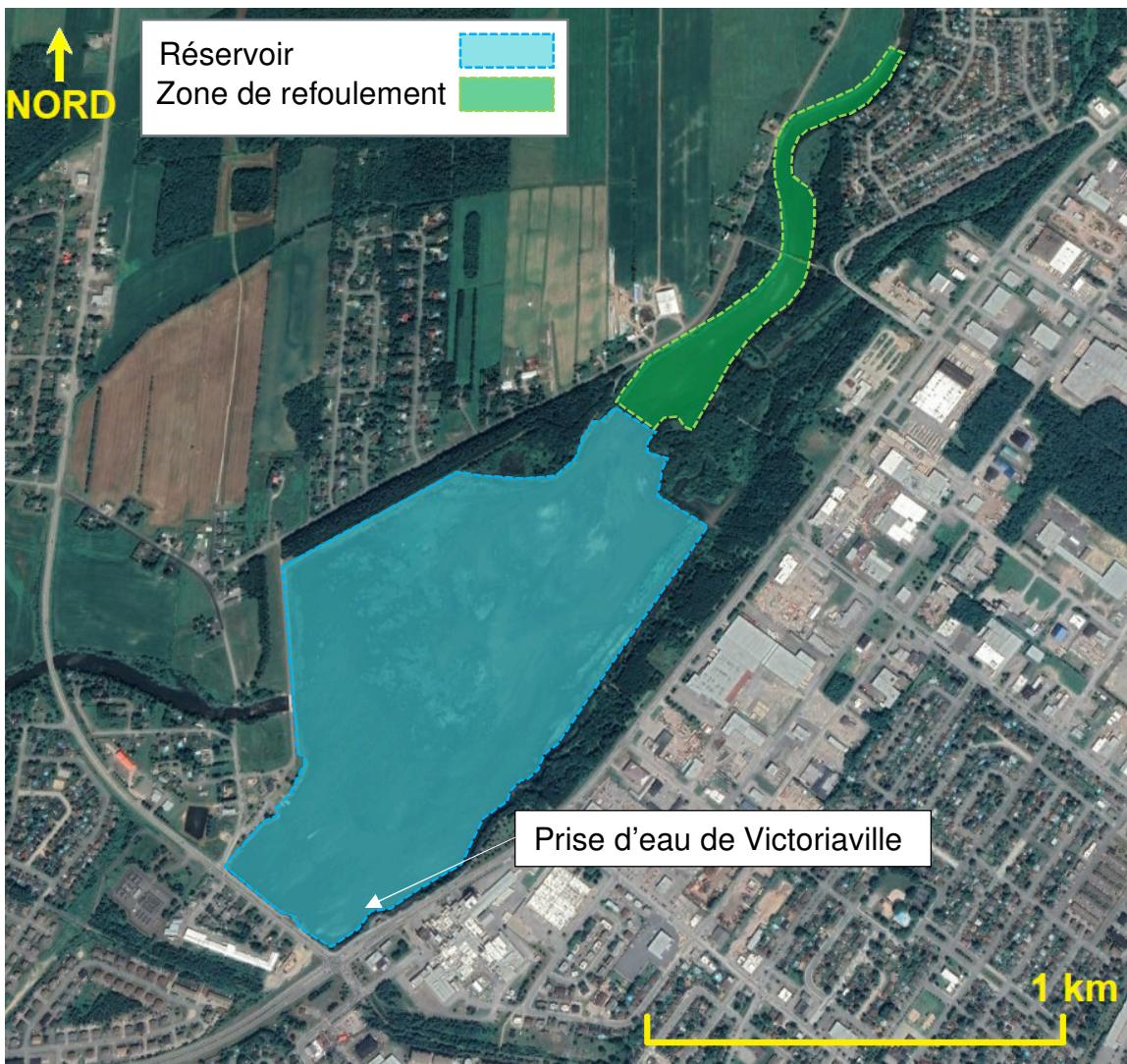


Figure 2.1 : Localisation du réservoir Beaudet, de la prise d'eau et de la zone de refoulement (source : Google Earth)



Figure 2.2 : Localisation du réservoir Beaudet à Victoriaville

2.2 Tronçon de la rivière Bulstrode à l'étude

En fonction des études réalisées précédemment (réf. 9, réf. 17, réf. 21, imagerie satellite Google Earth), il semble que la majeure partie des sédiments retrouvés dans le réservoir Bulstrode proviennent de la partie du bassin versant située en aval du barrage Sainte-Sophie. Ainsi, le présent mandat est limité entre le barrage de Sainte-Sophie, à l'amont et le barrage Beaudet, à l'aval.

Le tronçon de la rivière Bulstrode à l'étude parcourt environ 27,4 km et traverse la ville de Victoriaville, les municipalités de Sainte-Sophie-d'Halifax, Saint-Norbert-d'Arthabaska, de Princeville dans les MRC d'Arthabaska et de L'Érable dans la région administrative du Centre-du-Québec, tel que présenté à la figure 2.3.

Trois barrages se trouvent le long du tronçon, soit les barrages Sainte-Sophie (X0001903), à l'amont, Princeville (X2059128) et Beaudet (X0002206) à la frontière aval.

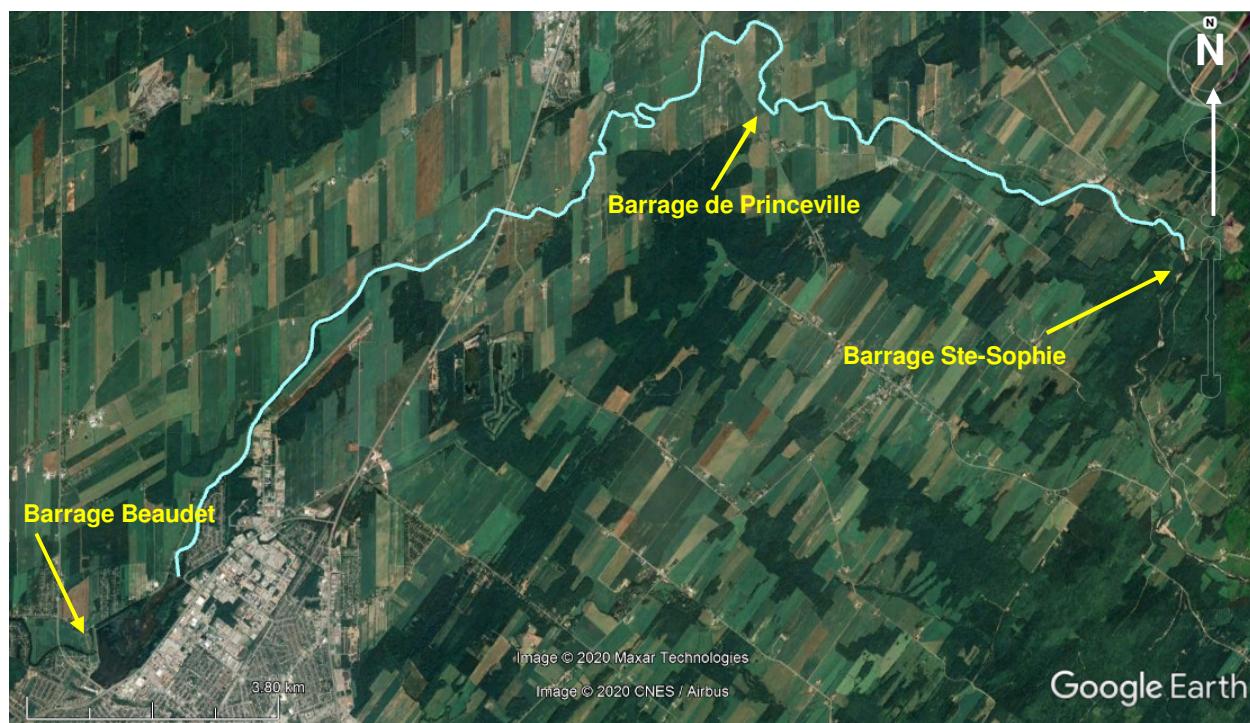


Figure 2.3 : Emplacement du tronçon modélisé de la rivière Bulstrode (source : Google Earth)

2.3 Description du bassin versant

Le bassin versant de la rivière Bulstrode est présenté à la figure 2.4. Le réservoir Beaudet est alimenté par le bassin versant de la rivière Bulstrode dont la superficie à l'amont du barrage est de 344 km². La portion amont du bassin versant de la rivière se trouve dans la région physiographique des Appalaches et l'occupation du territoire y est principalement forestière. La portion aval du bassin versant se trouve dans la région physiographique des basses terres du Saint-Laurent et l'occupation du territoire est principalement agricole avec des zones urbanisées. À l'aval du barrage Beaudet, la rivière Bulstrode rejoint la rivière Nicolet.



Figure 2.4 : Bassin versant de la rivière Bulstrode et occupation du territoire (source : Google Earth)

La figure 2.5 suivante présente la localisation des sous-bassins qui occupent la partie aval du bassin versant.

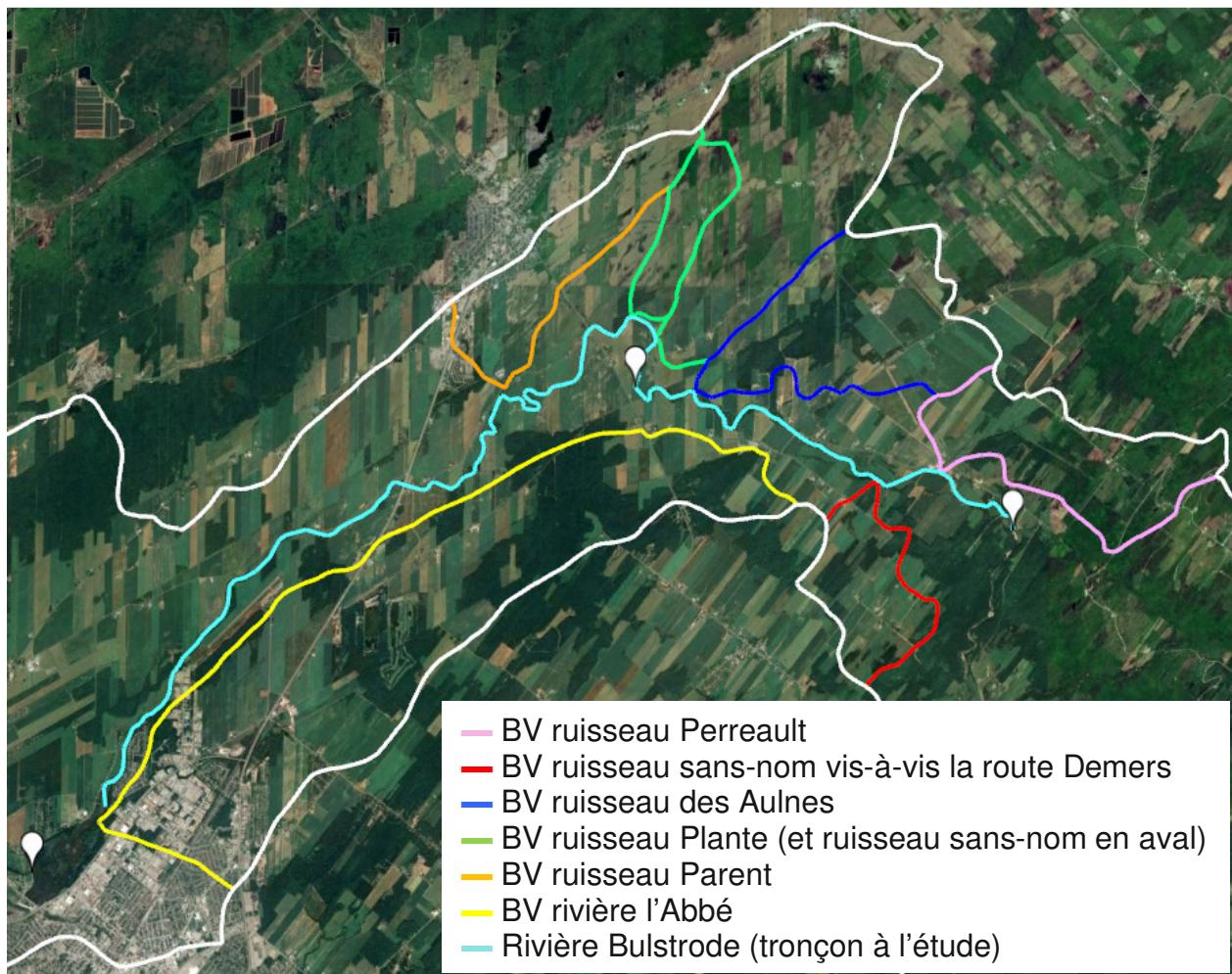


Figure 2.5 : Limite des sous-bassins versants (source : Google Earth)

2.4 Profil en long de la rivière Bulstrode sur le tronçon à l'étude

Le tronçon à l'étude est d'une longueur de 27,4 km. Tout au long du tronçon, plusieurs structures hydrauliques, soit des ponts, passerelles et barrages traversent la rivière, tel que présenté à la figure 2.6. Selon le système de référence utilisé par l'U. Concordia (réf. 21), le barrage Beaudet, situé à la limite aval, se trouve au PK -1560. Le PK 0 se trouve donc dans le réservoir Beaudet. Sur certaines figures de ce rapport, un autre système de référence sera utilisé, avec un chaînage débutant au barrage Beaudet, tel qu'illustré à la figure 2.6.

La morphologie du profil en long du bief étudié est décrite en détails dans le rapport de l'U. Concordia (réf. 21). Pour les fins de l'analyse de la dynamique sédimentaire, qui est l'objet de ce rapport, nous retenons que la rivière Bulstrode présente, à l'intérieur du domaine étudié, trois pentes distinctes. Soit la partie aval, appelée Tr.H.1, selon la nomenclature proposée par l'U. Concordia, et qui correspond approximativement aux zones homogènes 1 à 4 de la caractérisation des berges (réf. 2), le tronçon central, Tr.H.2, correspondant aux zones 5 à 18, et le tronçon amont, Tr.H.3, correspondant aux zones 19 à 31.

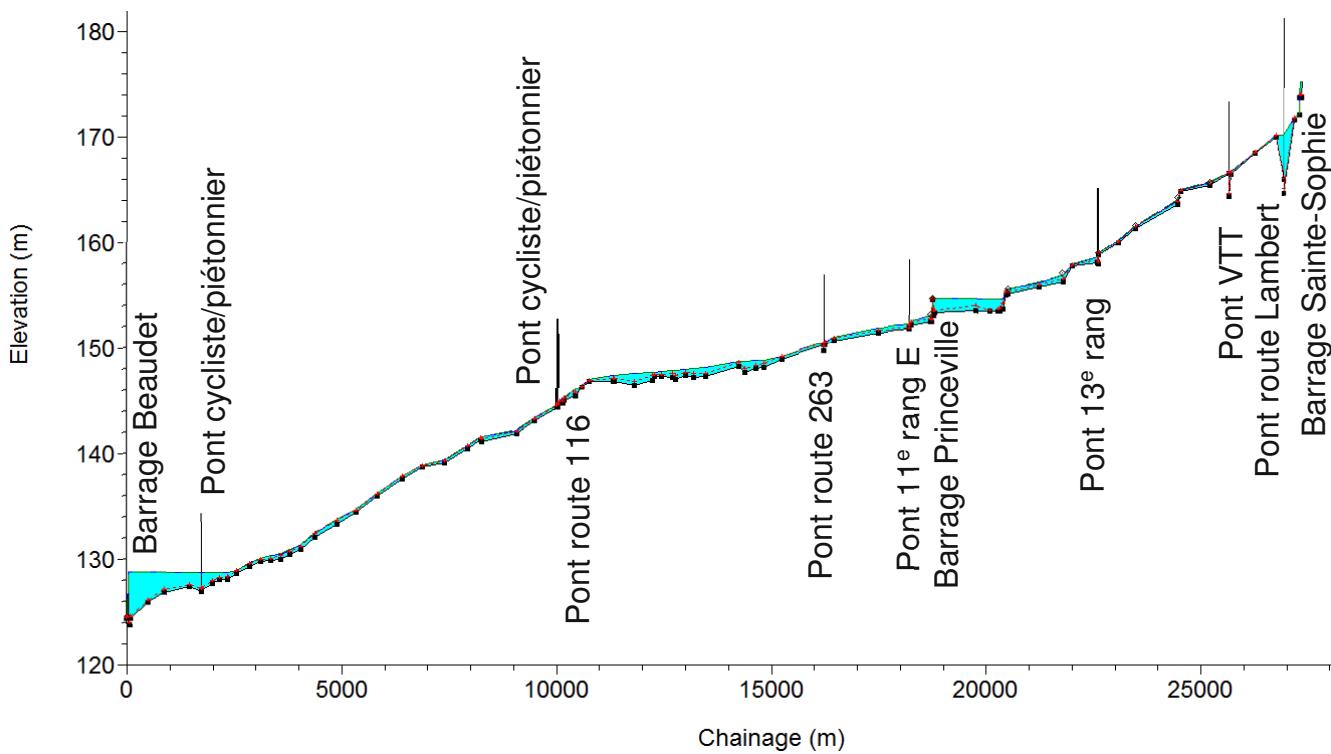


Figure 2.6 : Profil en long du tronçon modélisé (Source : Modèle HEC-RAS – CIMA+)

2.5 Barrage Beaudet et gestion du réservoir

2.5.1 Description du barrage Beaudet

Le barrage Beaudet, présenté à la figure 2.7, a été construit en 1976 et appartient à la Direction de la gestion des barrages (DGB) du Ministère de l'Environnement et de la Lutte aux changements climatiques du Québec (MELCC) et correspond au numéro X0002206 selon le répertoire des barrages du Québec. Il est localisé dans la zone amont du modèle au PK- -1560. Il consiste en un ensemble de digues et un ouvrage régulateur en béton d'environ 25,6 m de large équipé de 5 pertuis. Sa hauteur est d'environ 7,0 m, et il est catégorisé à forte contenance. Selon les plans datés de 1973, la largeur des pertuis est de 20 pieds, soit 6,1 m, et le seuil des 5 pertuis sont situés à l'élévation 409,5 pieds, soit 124,8 m.

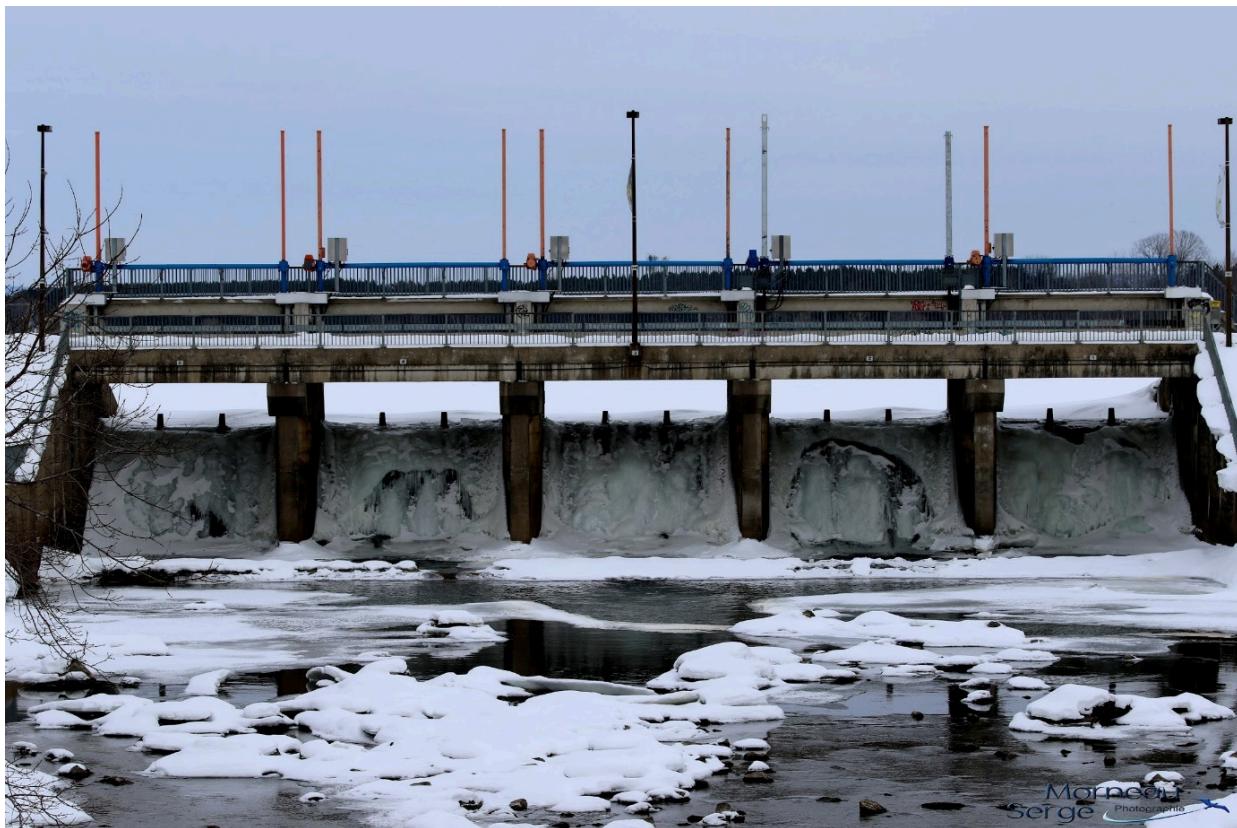


Figure 2.7 : Ouvrage évacuateur du barrage Beaudet (source : Google Earth)

Les pertuis sont équipés de vannes verticales déversantes pouvant évacuer l'eau à la fois par le dessus et par le dessous.

Le barrage comprend également une dalle d'approche et un bassin de dissipation, de sorte que l'ouvrage totalise 56,5 m environ dans la direction amont-aval. Le niveau de la dalle d'approche est environ 124,1 m, soit approximativement le même niveau que le sol naturel avant les travaux. La crête des blocs de dissipateurs d'énergie est à l'élévation 125,0 m et les creux entre les blocs dissipateurs sont à l'élévation 124,7 m, soit environ 1 m au-dessus du terrain naturel. Dans son ensemble, l'ouvrage représente donc un faible rehaussement par rapport au terrain naturel avant les travaux. Des dessins de l'ouvrage sont présentés aux figure 2.8, figure 2.9 et figure 2.10.

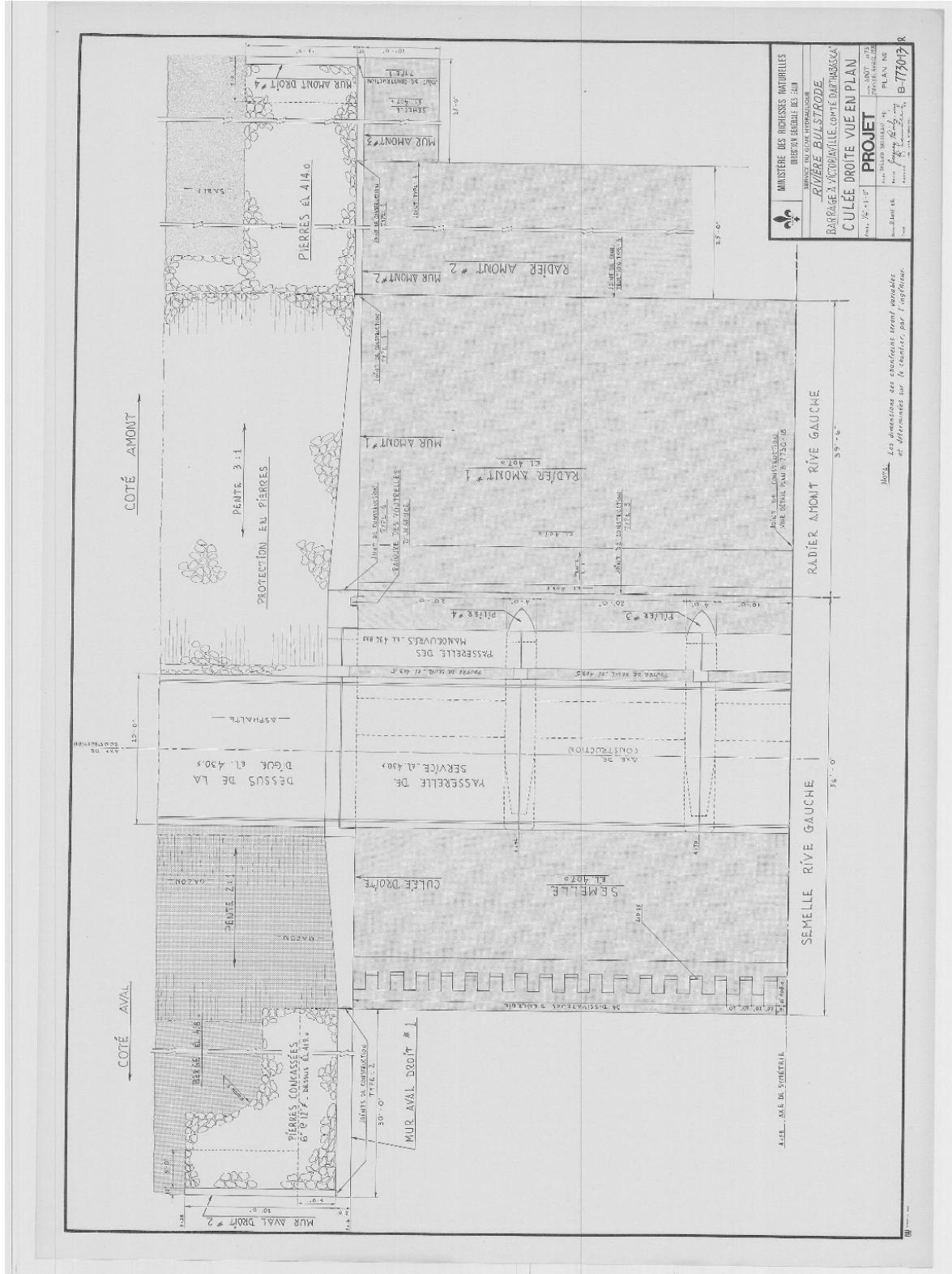


Figure 2.8 : Culée droite du barrage vue en plan (réf. 14)

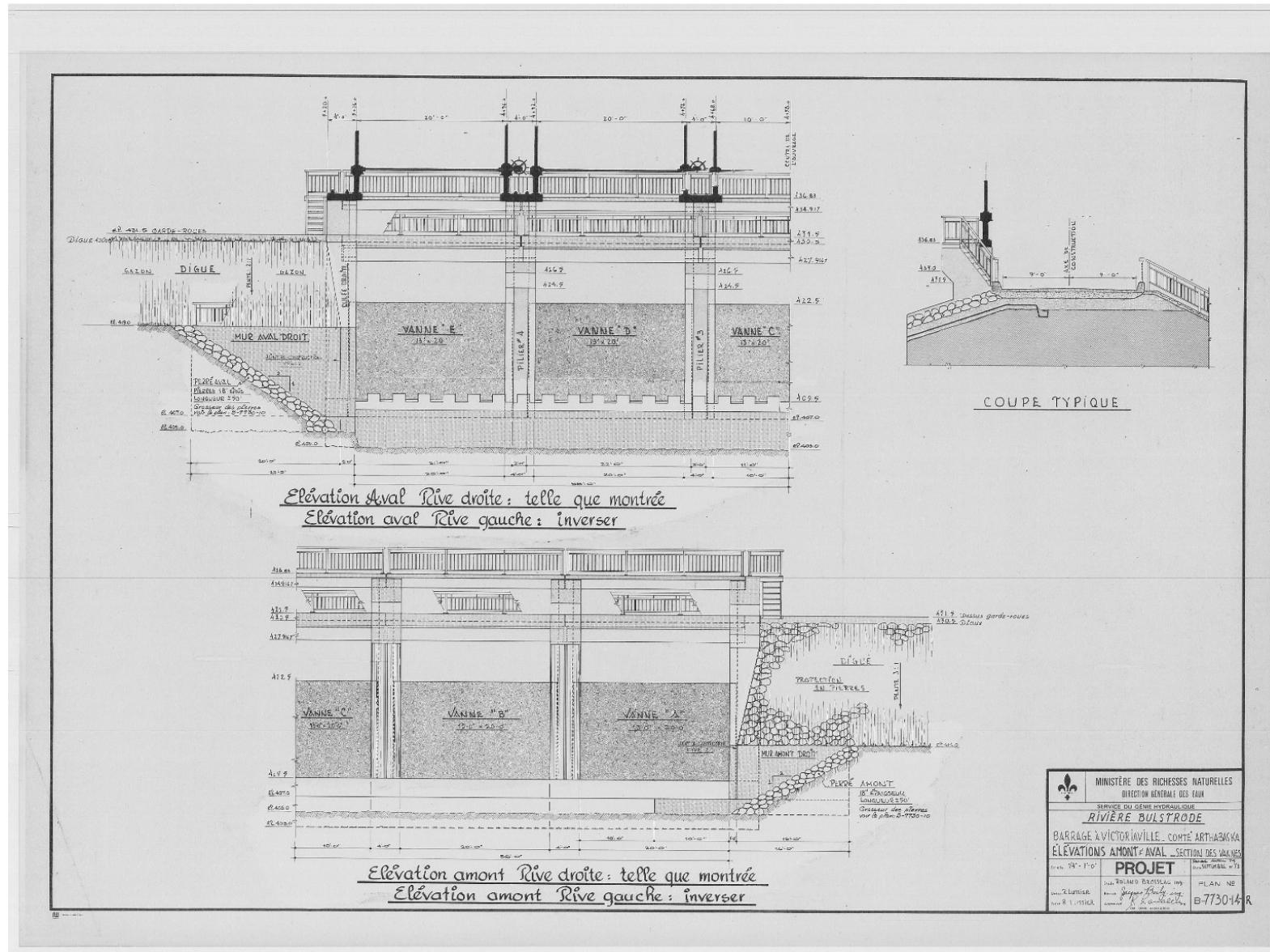


Figure 2.9 : Élévations amont et aval du barrage (réf. 15)

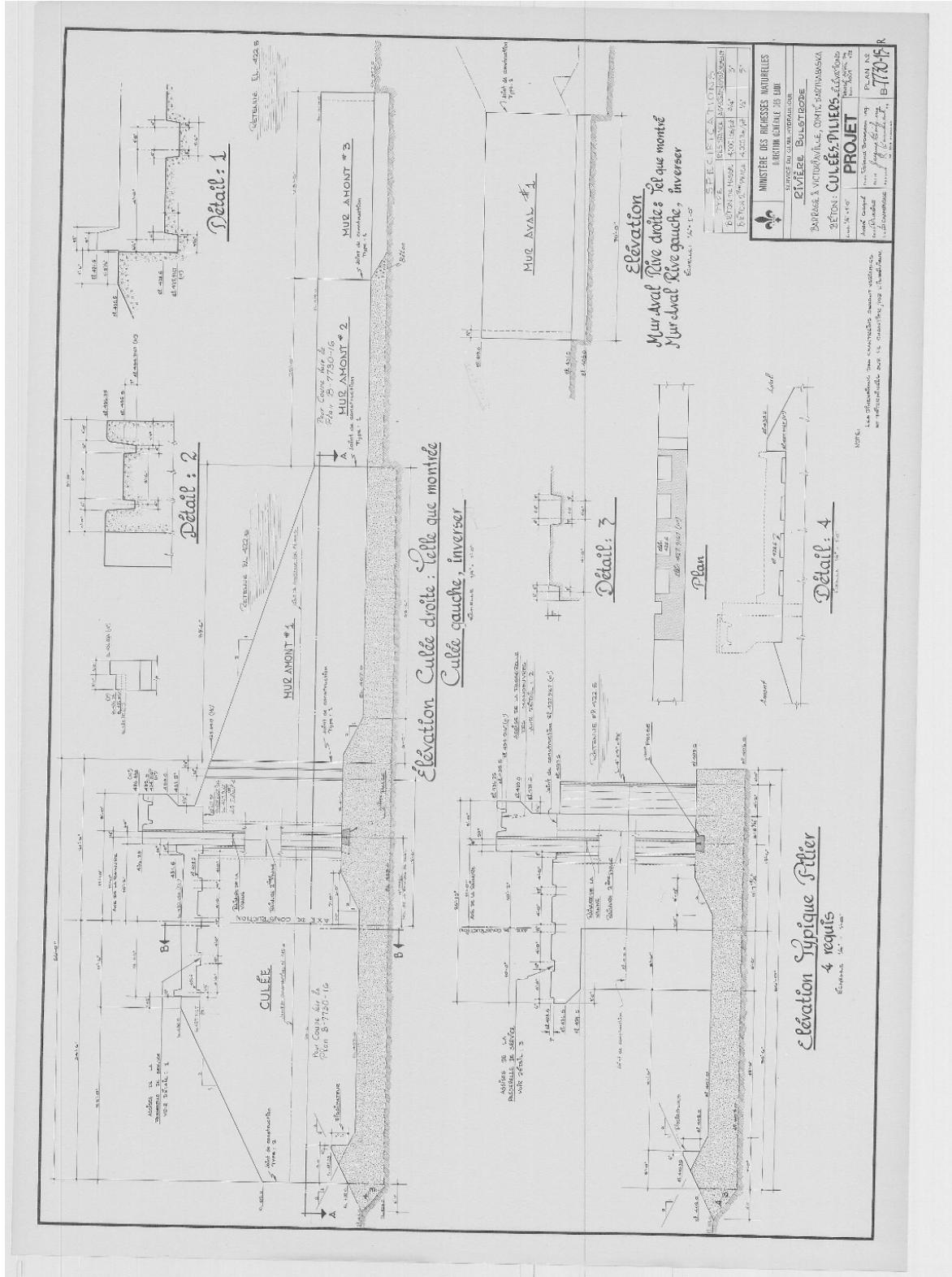


Figure 2.10 : Cuillées du barrage (réf. 16)

2.5.2 Caractéristiques physiques du réservoir Beaudet

Le réservoir Beaudet a été créé en même temps que le barrage Beaudet. De part et d'autre de l'ouvrage régulateur, le réservoir est fermé par des digues en terre homogène s'élevant au niveau 132,0 m environ, comme présenté à la figure 2.11.

Pour les fins de ce rapport, le « réservoir Beaudet » est la portion du plan d'eau localisé en amont du barrage Beaudet et en aval du boulevard Labbé Nord. À l'amont du boulevard Labbé Nord et jusqu'à 700 mètres en amont du pont couvert de la piste cyclable, cette portion de la rivière sera appelée « zone de refoulement », ou « zone de refoulement du réservoir », tel que présenté à la figure 2.1. Cette division du plan d'eau est effectuée afin de se conformer aux études précédentes, notamment aux relevés bathymétriques permettant d'observer l'évolution de l'ensablement du réservoir, principalement effectuée à l'aval du boulevard Labbé Nord.

La superficie du réservoir Beaudet est d'environ 73 hectares et celle de la zone de refoulement est d'environ 6,3 hectares. Le volume du réservoir diminue en fonction de l'ensablement graduel et est décrit au paragraphe 3.2.

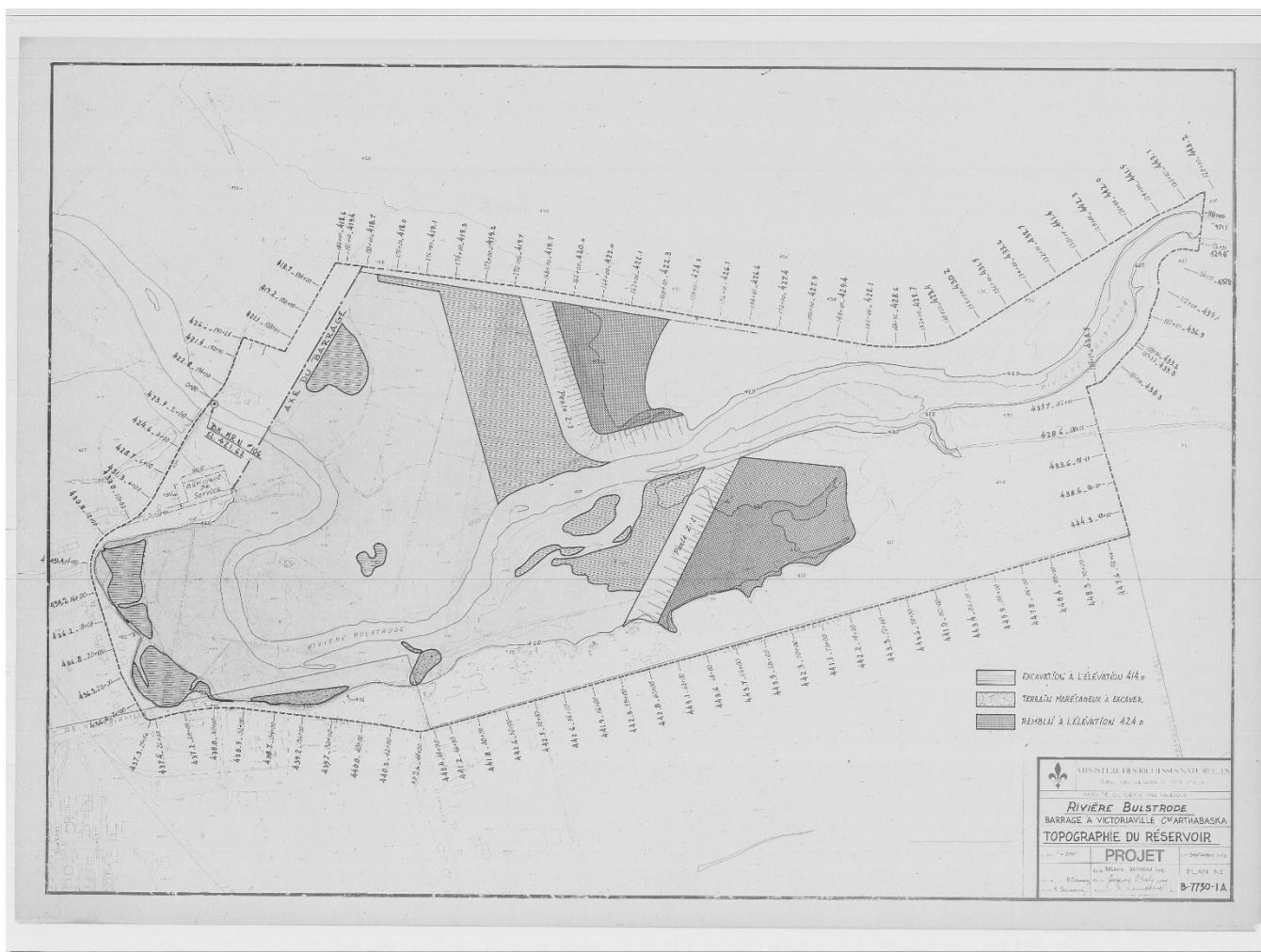


Figure 2.11 : Topographie du réservoir lors de la construction (réf. 17)

2.5.3 Mode de gestion du barrage et contraintes d'exploitation

Le barrage Beaudet fait l'objet d'une gestion quotidienne par la DGB. Les opérations du barrage sont décrites dans le Sommaire du plan des eau retenues – Barrage Beaudet (X0002206) produit par la DGB. Selon le plan de gestion :

La gestion des eaux retenues par le barrage Beaudet est effectuée quotidiennement afin d'assurer la sécurité des personnes et des biens qui se trouvent en amont et en aval de cet ouvrage. Les opérations au barrage sont assurées par le personnel de la Ville de Victoriaville attitré à l'usine d'eau potable ou par le personnel technique de la DGB basé au Centre de services de Weedon.

En conditions normales, le niveau du réservoir Beaudet est maintenu à l'élévation 128,80 m. En tout temps, le niveau du réservoir doit être supérieur à l'élévation 127,50 m afin de ne pas altérer la qualité de l'eau de la prise d'eau de la ville de Victoriaville. En période d'étiage, une vanne du barrage demeure ouverte de 1 cm pour assurer un débit minimal écologique dans la rivière Bulstrode.

En condition de crue, compte tenu de la faible capacité d'emmagasinement du réservoir Beaudet, aucune gestion des eaux retenues ne permet d'atténuer une crue importante. Par conséquent, il faut être en mesure de réagir rapidement afin d'ouvrir les vannes du barrage aussitôt l'arrivée d'une onde de crue afin de limiter le déversement par-dessus les vannes du barrage.

L'été et l'automne, deux des cinq vannes sont automatisées afin d'assurer une réaction rapide à toute augmentation du niveau d'eau. De plus, le personnel de la ville de Victoriaville attitré à l'usine d'eau potable est disponible en tout temps afin de faire les opérations au barrage.

En aval, le seuil mineur d'inondation sur la rivière Bulstrode se situe entre 125 et 145 m³/s. Toutefois, le barrage Beaudet n'a pas vraiment d'influence sur les débits de la rivière Bulstrode étant donné que cet ouvrage est un barrage en rivière et que le réservoir en amont du barrage ne possède qu'une faible capacité d'emmagasinement.

À la lumière de ces informations, il apparaît que la gestion des sédiments ne soit pas une contrainte d'exploitation pour l'ouvrage. Ainsi, le présent rapport cherchera à déterminer si une gestion différente des eaux au réservoir Beaudet pourrait s'avérer être une solution intéressante pour éviter l'ensablement du réservoir.

2.6 Barrage Sainte-Sophie

Le barrage Sainte-Sophie, localisé dans la zone amont du modèle au PK 25+855, consiste en un seuil de béton en arc d'une épaisseur moyenne de 0,7 m, construit en 1934, tel que présenté aux figure ci-dessous (réf. 18). Un ancien pertuis qui n'est plus en fonction se trouve en rive gauche. Aucune opération du barrage est effectuée. Deux portions du seuil déversant sont lourdement endommagées et en période de faible débit, comme sur les photos ci-dessous, l'eau transite via ces zones. Le relevé du barrage est présenté à l'Annexe B.



Figure 2.12 : Vue de l'aval du barrage Sainte-Sophie (Réf : CIMA+ août 2019)



Figure 2.13 : Vue de l'amont du barrage Sainte-Sophie et pertuis (Réf : CIMA+, août 2019)

2.7 Barrage Princeville

Le barrage de Princeville, construit en 1999 et localisé dans la zone centrale du modèle au PK 17+312, consiste en un déversoir en enrochements. La fonction du barrage présenté aux figures suivantes est de créer un réservoir pour la prise d'eau municipale de Princeville. La hauteur de retenue est de 1,35 m (réf. 19). Le barrage n'est pas doté d'organe de régulation du débit. Le relevé du barrage est présenté à l'Annexe B.



Figure 2.14 : Barrage de Princeville (Réf : CIMA+, août 2019)

2.8 Autres structures hydrauliques

En plus des barrages décrits ci-haut, plusieurs ponts et passerelles enjambent le tronçon étudié de la rivière Bulstrode. La description, les photos, les croquis de ces ponts se trouvent au tableau 2.1 et de la figure 2.15 à la figure 2.19. Les relevés des ouvrages sont présentés à l'Annexe B.

Tableau 2.1 : Description des ponts et des passerelles

PK	Route	Nom	N ^{bre} piliers	Largeur (m)	Élévation soffite (m)
0+128	Cycliste, piétonnier	-	3	167	134,3
8+388	Cycliste, piétonnier	P-10617	1	61	148,7
8+418	Route 116	P-16501	0	54	148,4
14+775	Route 263	P-00572	1	50	155,1
16+774	11e rang E	P-16141	0	31	157,0
21+141	13e rang	P-04776	1	32	162,9
24+180	VTT	-	0	20	172,2
25+465	Route Lambert	P-04778	0	243	176,3



Figure 2.15 : Deux ponts cyclistes



Figure 2.16 : Pont route 116 et pont route 263



Figure 2.17 : Pont 11^e rang E, 13^e rang



Figure 2.18 : Pont VTT et de la route Lambert

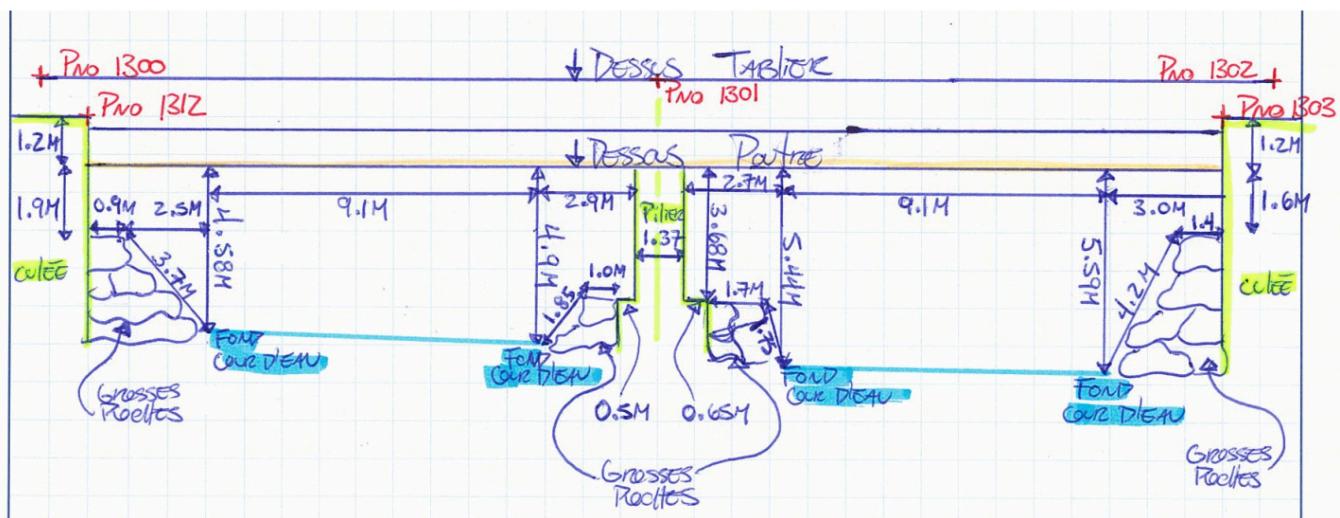


Figure 2.19 : Croquis du pont P-04776 (Réf. : CIMA+, août 2019)

3. Données et observations hydro-sédimentaires

3.1 Résumé des sources d'information sur les sédiments présents dans le réservoir Beaudet et la rivière Bulstrode

De nombreuses sources d'information hydrologique, hydraulique et sur la dynamique sédimentaire de la rivière Bulstrode sont disponibles dans des études antérieures et actuelles. Le tableau 3.1 résume l'information utilisée dans le cadre de nos travaux.

Tableau 3.1 : Résumé des informations contenues dans les études sur la rivière Bulstrode

Auteur	Document	Information utilisée
IRDA	Suivi hydrométrique du bassin versant de la rivière Bulstrode – 9 août 2019	<ul style="list-style-type: none">Concentration de sédiments en suspension mesurée aux stations Perreault et Parent du 1^{er} avril 2018 au 24 juillet 2019;Concentration de sédiments mesurée à la station Bulstrode en amont du réservoir Beaudet;Concentration de sédiments mesurée à la station Lambert (en aval du barrage Sainte-Sophie);
MCR	Procédés & Technologies – Étude de restauration du réservoir Beaudet et de son bassin versant – Décembre 2014	<ul style="list-style-type: none">Concentration de sédiments en suspension mesurée lors de la crue du 3 septembre 2013 à la passerelle à l'entrée du réservoir Beaudet;
EXP	Relevés bathymétriques 2019 – Restauration du réservoir Beaudet – 17 décembre 2019	<ul style="list-style-type: none">Date de réalisation des relevés;Accumulation de sédiments entre chaque relevé réalisé de 1979 à 2019;Localisation du secteur considéré pour la comparaison des accumulations de sédiments dans le réservoir entre les différents relevés;
Groupe HBA Experts-Conseils SENC	Étude d'impact sur l'environnement – Rapport principal – septembre 2004 ;	<ul style="list-style-type: none">Mois de réalisation du relevé bathymétrique de 1994;
Lemay+DDA	Étude de restauration du réservoir Beaudet – Rapport final préliminaire – 30 novembre 2014;	<ul style="list-style-type: none">Date de réalisation du relevé bathymétrique de 2014;Mention que le relevé bathymétrique de 1979 est moins précis que ceux de 2003 et 2014;
Les Laboratoires Shermont inc.	Caractérisation des sédiments – 9 avril 2004;	<ul style="list-style-type: none">Caractérisation granulométrique de 25 forages réalisés dans le réservoir Beaudet;
POLY-GÉO inc	Étude du bassin versant de la rivière Bulstrode à l'amont du réservoir Beaudet, Victoriaville – août 2012;	<ul style="list-style-type: none">Majorité des sédiments dans la rivière Bulstrode proviendrait du tronçon entre le barrage Sainte-Sophie et la route 116.

Auteur	Document	Information utilisée
Mémoire – Christina Lachance daté de 2017	Sources de sédiments dans un réservoir d'eau potable par la technique de traçage de sédiment.	<ul style="list-style-type: none">Le tronçon le plus actif de la rivière Bulstrode en ce qui a trait aux transports en sédiments serait situé entre le 11^e rang et le réservoir Beaudet;Les particules provenant de l'amont du bassin versant ne sont pas transportées jusqu'au réservoir;Apport mineur des berges indique que l'érosion survient en conditions normales et non en condition de crue.

3.2 Ensablement observé dans le réservoir Beaudet

Le rapport de EXP (réf. 6) présente au tableau 3.2 (tableau 4.2 du rapport d'EXP) un résumé de l'information tirée des relevés bathymétriques du réservoir réalisés de 1979 à 2019. Ces informations comprennent le volume disponible du réservoir, les pertes de volume pour différentes périodes ainsi que l'accumulation moyenne de sédiments par année pour différentes périodes.

Notons que des dates plus précises que ce qui est présenté au tableau 4.2 ont pu être obtenues pour certains des relevés :

- + Le relevé de 1994 a été réalisé en décembre (réf. 25);
- + Le relevé de 2014 a été réalisé les 24 et 25 juillet (réf. 26);
- + Le 1er relevé de 2018 a été réalisé les 23 et 24 octobre (réf. 27);
- + Le 1er relevé de 2019 a été réalisé les 22 et 23 mai (réf. 28);
- + Le 2e relevé de 2019 a été réalisé les 15 et 16 octobre (réf. 6).

Tableau 3.2 : Comparaison des pertes de volumes du réservoir Beaudet et accumulation de sédiments (réf. 6)

Tableau 4-2 Comparaison des pertes de volumes du réservoir Beaudet et accumulation de sédiments

Évolution	Unité	1979 (MRN)	1994 (Roche)	2003 (HBA)	2014 (DDA+SMI)	2018 EXP	2019 EXP	2019 EXP	Moyenne
Volume	m ³	1 539 787	1 318 398	1 161 560	978 849	899 080	896 288	923 317	
Perte depuis 1979	m ³		221 389	378 227	560 938	640 707	643 499	616 470	
	%		14,4 %	24,6 %	36,4 %	41,6 %	41,8 %	40,0 %	1,0 %
	m ³ /an		14 759	15 759	16 027	16 428	16 087	15 412	15 412
Perte depuis 1994	m ³			156 838	339 549	419 318	422 110	395 081	
	m ³ /an			17 426	16 977	17 472	16 884	15 803	15 803
Perte depuis 2003	m ³				182 711	262 480	265 272	238 243	
	m ³ /an				16 610	17 499	16 580	14 890	14 890
Perte depuis 2014	m ³					79 769	82 561	55 532	
	m ³ /an					19 942	16 512	11 106	11 106
Perte depuis 2018	m ³						2 792	(24 237)	
	m ³ /an						4 786	(24 237)	(24 237)
Perte depuis oct. 2019	m ³							(27 029)	
	m ³ /an							(6 701)	
Profondeur moyenne	m		1,76		1,5	1,195	1,186	1,2	
Profondeur maximum	m		5,6		4 à 5	4,9	5,0	5,0	
Date des mesures				Sept. 2003	Juil. 2014	Oct. 2018	Mai 2019	Oct. 2019	

La période de 2018 à 2019 n'a toutefois pas été retenue dans le cadre de cette étude puisque, selon une information obtenue de la Ville de Victoriaville, il existerait une incertitude sur ces valeurs en raison de la variation du niveau du réservoir pendant les relevés et à la technique d'extrapolation utilisée pour couvrir les zones qui n'ont pas été relevées. En tout état de cause, la période couverte par les relevés bathymétriques est suffisante pour les besoins de l'étude.

Le volume total de sédiments accumulés dans le réservoir pour différentes périodes est présenté au tableau 3.3. Ces observations indiquent que le réservoir Beaudet s'ensable à un rythme plus au moins constant depuis 1979.

Tableau 3.3 : Volume de sédiments accumulés pour différentes périodes

Période	Volume de sédiment accumulé	Volume moyen accumulé par année
Entre 1979 et 1994	221 389 m ³	14 759 m ³
Entre 1994 et 2003	156 838 m ³	17 426 m ³
Entre 2003 et 2014	182 711 m ³	16 610 m ³
Entre 2014 et 2018	79 769 m ³	19 942 m ³

3.3 Relevés de la charge sédimentaire en suspension (IRDA et MCR)

L'IRDA a procédé au relevé de sédiments en suspension à six stations localisées sur le bassin versant du réservoir Beaudet, dont 4 se situent à l'intérieur du tronçon à l'étude. La localisation de ces 4 stations est présentée au tableau 3.4 et à la figure 3.1.

Le tableau 3.4 présente également le volume total de sédiment mesuré à chacune des stations et compare le volume de sédiments généré par km^2 de bassin versant. Ces données indiquent que le cours principal de la rivière Bulstrode contient de 2 à 3 fois plus de sédiments en suspension par km^2 de bassin versant que ses tributaires. Cette observation tend à indiquer que les berges et le lit du cours d'eau principal représentent une source importante de sédiments par rapport à l'apport des tributaires.

Tableau 3.4 : Stations de l'IRDA dans la portion aval du tronçon de rivière (Source : Rapport IRDA)

Station	Cours d'eau	Superficie du bassin versant	Période disponible	Volume 11 avril 2018 – 25 juillet 2019	Volume / km^2 11 avril 2018 – 25 juillet 2019	Localisation
Lambert	Bulstrode	228 km^2	11 avril 2018 – 25 juillet 2019	7 971 m^3	35,0 m^3/km^2	En aval du barrage Sainte-Sophie
Bulstrode	Bulstrode	291 km^2	11 avril 2018 – 25 juillet 2019	9 121 m^3	31,3 m^3/km^2	Amont du réservoir Beaudet
Perreault	Tributaire	5,15 km^2	23 novembre 2017-25 juillet 2019	93 m^3	18,1 m^3/km^2	Extrémité du bassin Perreault, aval de la station Lambert
Parent	Tributaire	6,97 km^2	23 novembre 2017-25 juillet 2019	71 m^3	10,2 m^3/km^2	Extrémité du bassin Parent, amont de la station Bulstrode

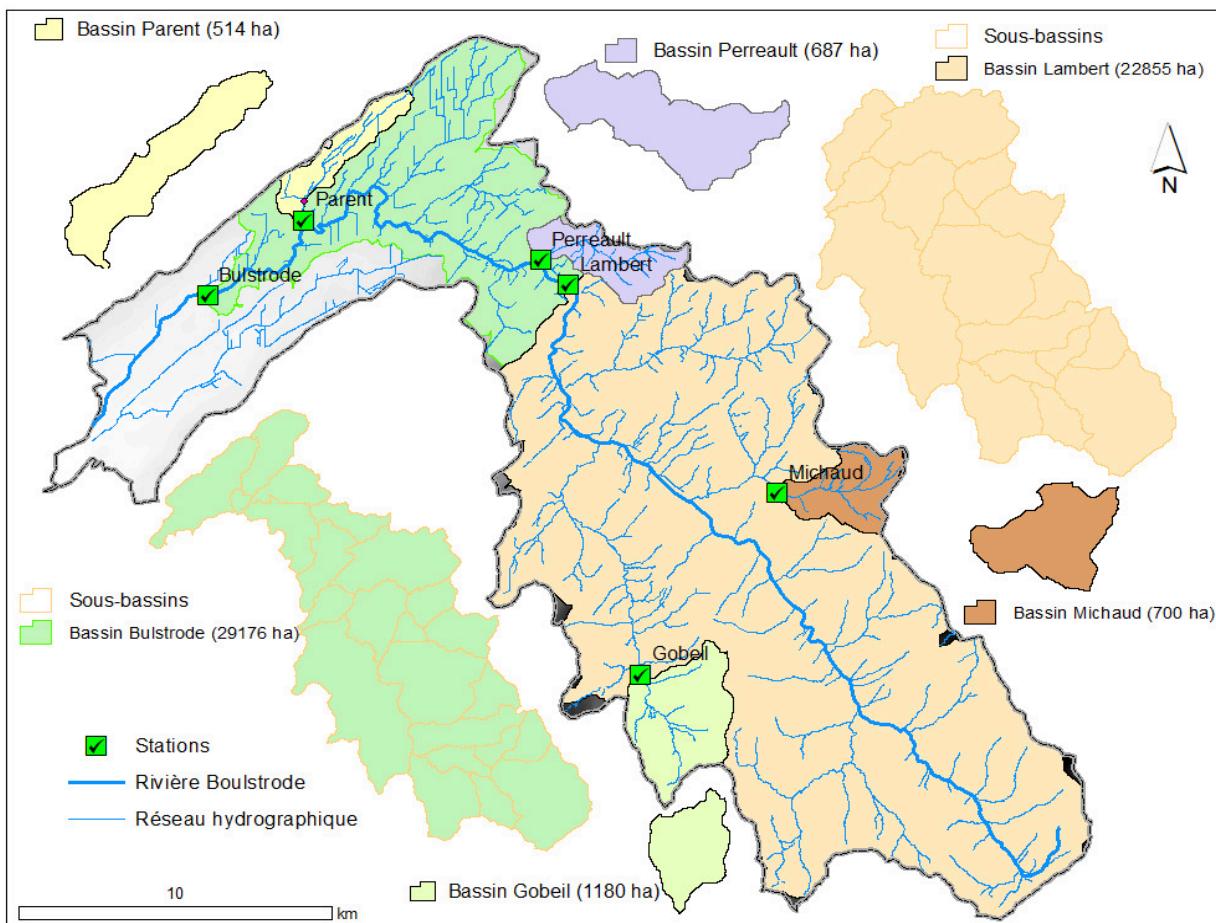


Figure 3.1 : Localisation des stations de l'IRDA (source : Rapport IRDA)

La figure 3.2 présente les concentrations de sédiments observées par l'IRDA à la station Bulstrode comparées au débit dans la rivière. Cette figure montre une corrélation intéressante entre les pointes de crue de la rivière et la concentration de sédiments en suspension. Toutefois, au mois d'octobre 2018, on observe une forte augmentation des sédiments en suspension qui ne peut pas être expliquée par une augmentation du débit de la rivière. Il est possible que cette pointe soit due au glissement d'une berge, à un orage intense et localisé, ou à une erreur de mesure. La cause exacte n'a pu être identifiée pour l'instant.

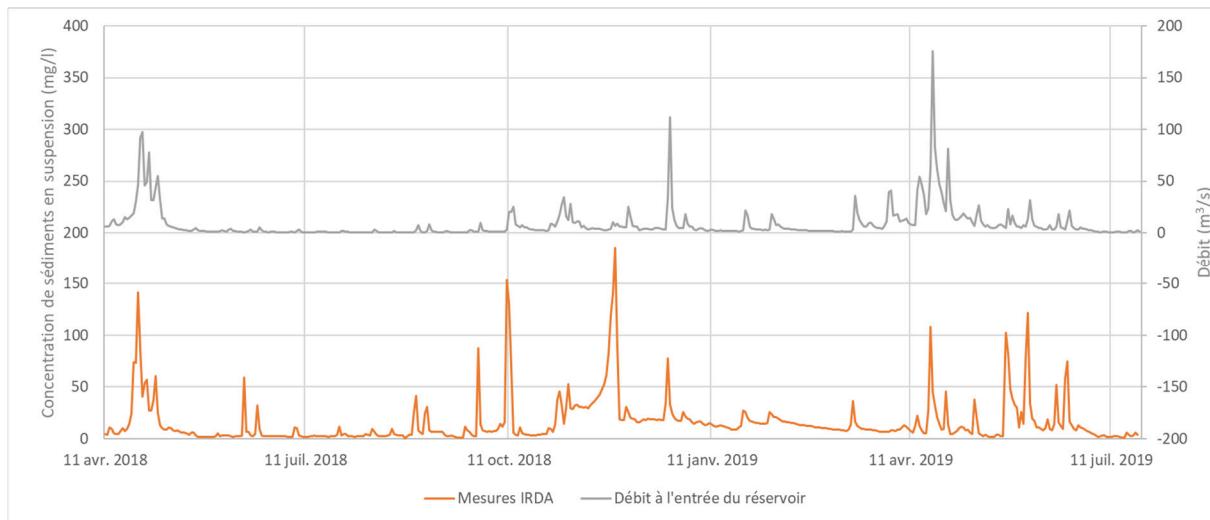


Figure 3.2 : Concentrations de sédiments en suspension observées et débit à l'entrée du réservoir Période du 11 avril 2018 au 24 juillet 2019 (source : IRDA)

MCR a également relevé des mesures de concentration de sédiments en suspension dans la rivière Bulstrode, au barrage Sainte-Sophie, à la passerelle à l'entrée du réservoir Beaudet et au barrage Beaudet de façon ponctuelle, de novembre 2012 à octobre 2013. Une pointe de concentration en sédiments de 85 mg/l a été mesurée lors de la crue du 3 septembre 2013 (réf. 12).

Il est à noter que la caractérisation de la taille des sédiments par granulométrie et sédimétonométrie n'est pas disponible.

3.4 Relevés géotechniques dans le réservoir Beaudet (SMi - Laboratoires Shermont)

De nombreux forages sont disponibles dans la zone du réservoir, soit entre le Boulevard Labbé Nord et le barrage. La figure 3.3 présente les isocontours de pourcentage de sable et gravier créés à partir des résultats des granulométrie effectuées sur les matériaux du fond du réservoir et d'un krigeage. Sur la figure, on identifie également par un contour blanc continu les bancs sableux visibles depuis la photographie satellite et par un contour blanc pointillé les zones plus marécageuses. Cette figure montre que la présence d'un delta plutôt sableux à l'entrée du réservoir ainsi qu'un banc de sable et gravier au centre du réservoir. Ces structures correspondent avec l'amont des zones excavées au moment de la création du réservoir, présentées à la figure 2.11 à la section 2.5.2. À l'aval de ces structures, les dépôts sont plus fins. On note que le chenal naturel de la rivière, à l'aval de la zone silteuse, est toujours visible.

Ces constats tendent à démontrer que les sédiments plus grossiers (surtout composés de sable), transportés par la rivière Bulstrode se déposent surtout dans la portion amont du réservoir, même jusqu'à la zone de refoulement qui s'étend jusqu'à 700 mètres en amont du pont de la piste cyclable. Les sédiments plus fins vont migrer un peu plus vers l'aval.

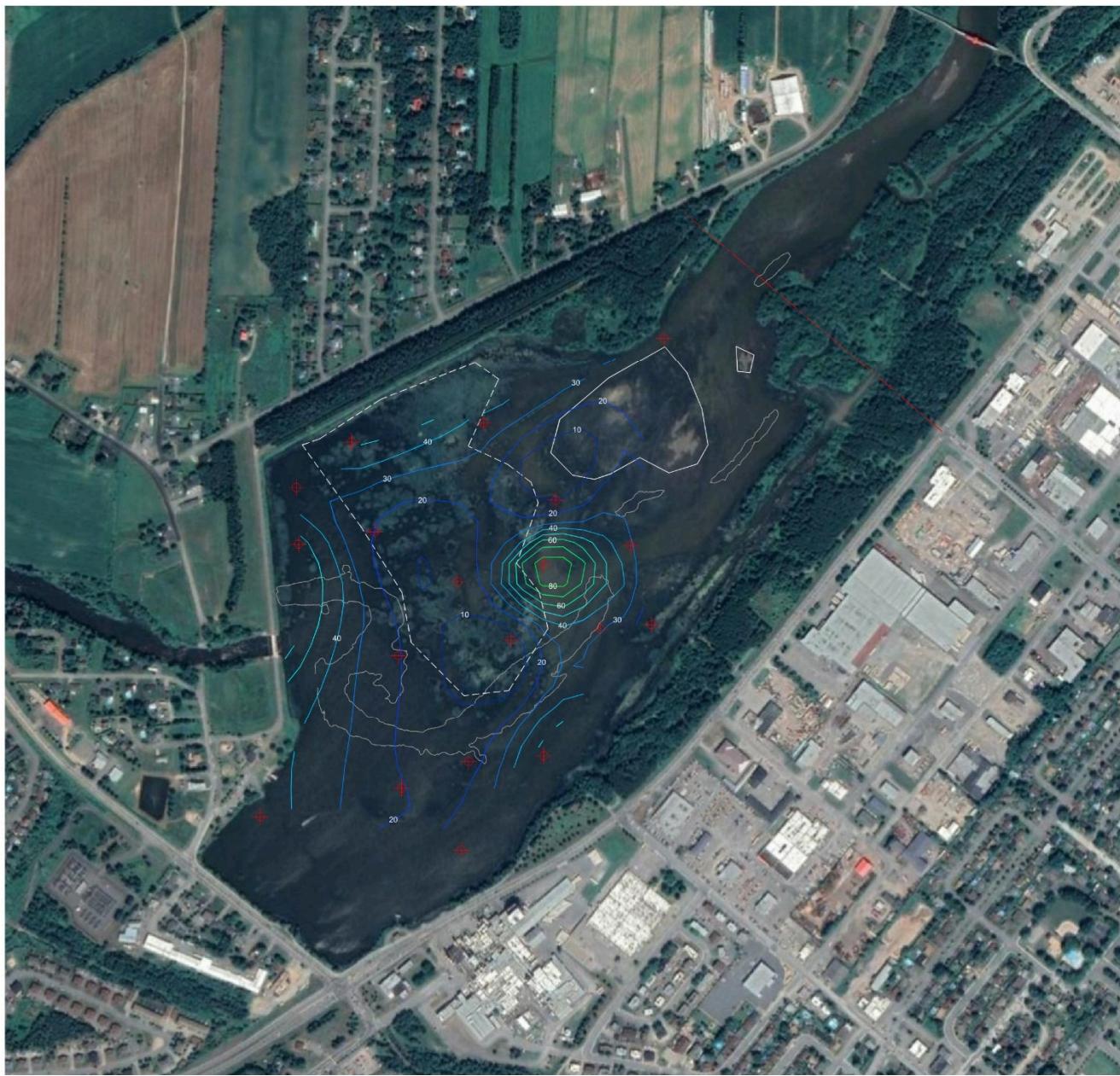


Figure 3.3 : Analyse des dépôts de sable et gravier dans le réservoir Beaudet (source : Smi)

3.5 Relevés par drone

Un relevé par drone a été effectué par CIMA+ au courant de l'été 2019, ce qui a permis de prendre des photos haute résolution de tout le tronçon de rivière à l'étude. L'analyse de ces photos a permis de délimiter visuellement les différentes zones de dépôt sédimentaire sur le tronçon à l'étude. Le plan de caractérisation des sédiments, fourni à l'Annexe A, illustre les différents secteurs identifiés.

Les relevés sont disponibles aux liens suivants :

- + Section 1:

[Cliquer ici](#)

- + Section 2:

[Cliquer ici](#)

- + Section 3:

[Cliquer ici](#)

3.6 Relevés hydrométriques

Les relevés hydrométriques comprennent :

- + Les relevés bathymétriques et de ligne d'eau espacés d'environ 250 m;
- + Trois mesures de débit effectuées à l'aide d'un courantomètre à hélice;
- + La géométrie de l'ouverture de chaque pont également relevée à l'aide d'un GPS haute précision.

Ces relevés ont été effectués durant la deuxième moitié du mois d'août 2019. L'hydraulique de la rivière était particulièrement faible à ce moment. Ainsi, il n'a pas été possible de réaliser les relevés à partir d'une embarcation et de relever un profil en long, tel que prévu initialement. Les relevés ont été effectués à pied, en fonction des accès disponibles.

Des relevés supplémentaires de ligne d'eau ont été effectués pendant la crue du 1^{er} novembre 2019, afin d'obtenir une deuxième ligne d'eau. Cette dernière, relevée en crue, permet d'améliorer la calibration du modèle.

Tous les résultats ont été partagés de façon électronique sur le système d'échange de fichiers Dropbox mis en place par COPERNIC. Un aperçu des résultats est montré à la figure 3.4, présentée ci-dessous.

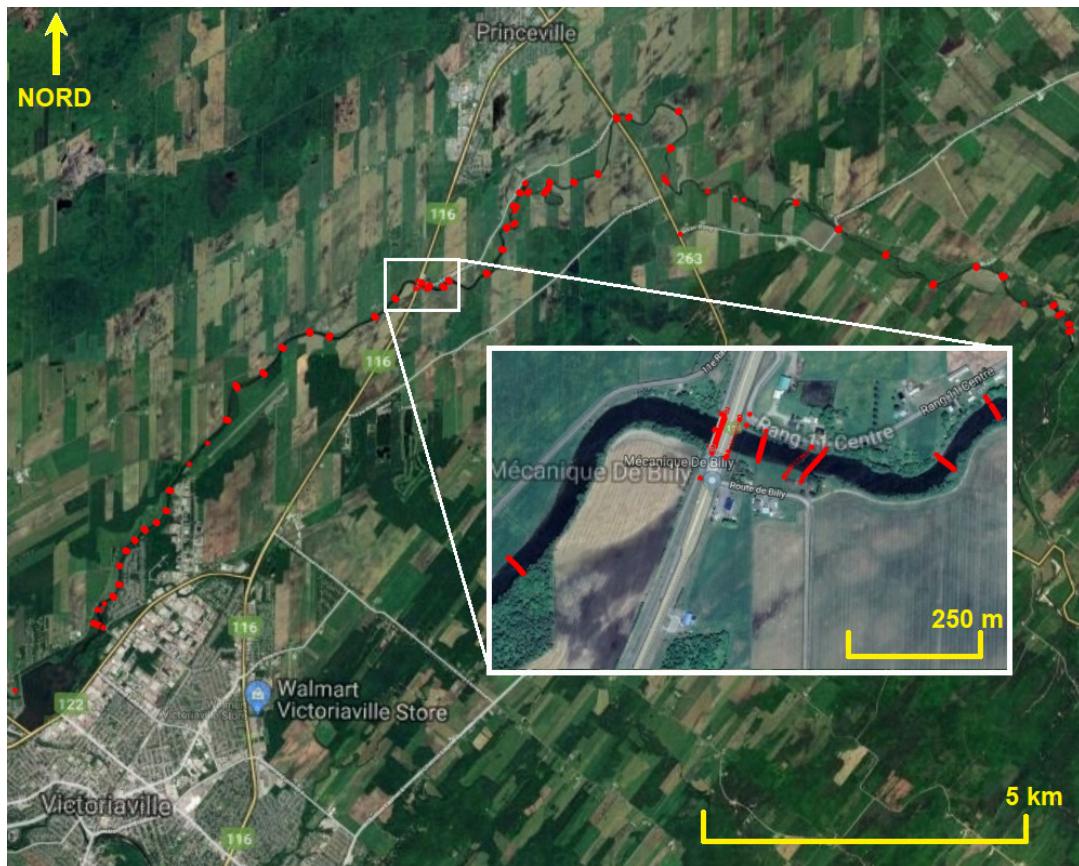


Figure 3.4 : Aperçu de l'envergure des relevés bathymétriques (source : Google Earth)

3.7 Relevés granulométriques

Les travaux sur le terrain ont été effectués au mois d'octobre 2019, à la suite de la caractérisation préliminaire des berges effectuée sur la base du relevé par drone. Ces travaux avaient pour but :

- + de compléter l'identification de la nature des sédiments du lit et des berges de la rivière;
- + de prélever des échantillons jugés représentatifs de la composition des sédiments en place à plusieurs emplacements tout au long du tronçon.

La caractérisation des berges n'a pu être effectuée qu'aux emplacements accessibles par les routes ou chemins en place ainsi que par les terrains privés où l'accès nous a été accordé. Une fois la rivière atteinte, nous avons privilégié un échantillonnage dans le lit de la rivière non submergée afin d'éviter la perte de particules fines lors d'un échantillonnage effectué sous l'eau. Toutefois, dans certains secteurs où l'eau de la rivière submergeait tout le lit de cette dernière, l'échantillonnage sous l'eau était inévitable. Dans ce cas, l'échantillonnage a été effectué avec le plus grand soin pour éviter le remaniement et le lavage des sols lors de sa sortie de l'eau. Dans tous les cas, l'échantillonnage n'a été effectué que dans les secteurs jugés sécuritaires.

La localisation des échantillons prélevés a été effectuée à l'aide d'un GPS de poche d'une précision d'environ 3 mètres lorsque les conditions de réception étaient bonnes. Les résultats détaillés sont présentés à l'Annexe A du présent rapport.

3.8 Caractérisation des berges

La caractérisation des sédiments de la rivière Bulstrode a permis d'observer plusieurs de ses tronçons relativement homogènes sur le bief d'environ 26 kilomètres étudiés (voir Annexe A). Les sédiments observés dans le fond de la rivière étaient généralement composés de particules grossières de sable, gravier et cailloux à des proportions variables lorsque la rivière ne s'écoulait pas directement sur le socle rocheux. Ces particules étaient généralement bien imbriquées ensemble, laissant une couche de bonne compacité apparente. Les sédiments à proximité du réservoir Beaudet (chaînage 0+000 à 0+700) étaient toutefois de granulométrie plus fine, soit composée de sable et de silt, avec une compacité apparente plus lâche.

Les berges de la rivière étaient généralement composées d'une paroi rocheuse dans divers secteurs ou ne présentaient pas de signes d'érosion active. On note toutefois deux secteurs où de l'érosion active a été observée. Le premier se situe entre les chaînages 9+200 et 13+200. À cet emplacement, la rivière circule en méandres et on observe dans les parois extérieures de ceux-ci une érosion active laissant une paroi relativement verticale des berges, tel qu'observé à la figure 3.5. La composition des sols au droit des secteurs érodés montre soit un dépôt sableux, soit un dépôt silteux ou soit une superposition de ces deux dépôts. Dans tous les cas, la granulométrie observée était beaucoup plus fine que celle observée directement dans le lit de la rivière du même secteur et pouvait être d'une granulométrie similaire à celle observée sur le tronçon situé à proximité du réservoir Beaudet. Un deuxième secteur présentait des signes d'érosion plus ou moins active et se situait entre les chaînages 14+300 à 19+600. La composition des berges dans ce secteur était majoritairement de nature sableuse, mais demeure parfois imprécise compte tenu de la difficulté à atteindre les berges érodées de ce secteur.



Figure 3.5 : Imagerie aérienne avec drone des méandres entre les PK-12 et 13 (source : CIMA+)

En conclusion, selon nos observations sur le terrain, il semble que les sédiments du tronçon principal de la rivière ayant le potentiel de transiter jusqu'au réservoir Beaudet proviennent surtout de l'érosion des berges du secteur entre les chaînages 9+200 et 13+200, mais également entre les chaînages 14+300 à 19+600.

Par suite des analyses granulométriques, il a été possible de déterminer la granulométrie des sédiments des différents tronçons homogènes. Ces tronçons ont été identifiés à l'aide du relevé par drone ainsi que lors de notre visite sur le site. La nature des sols composant le fond de la rivière et des berges est présentée au tableau 3.6 en fonction des chaînages.

Lorsque les granulométries associées au secteur correspondent à la nomenclature EM-X, cela signifie que les données proviennent d'une analyse de granulométrie effectuée sur un échantillon de sédiments. Lorsqu'il s'agit de V-X, cela signifie que la granulométrie a été déterminée visuellement sur place. Enfin, lorsque le terme « Roc » est employé, cela signifie que l'écoulement de la rivière se faisait directement sur le socle rocheux.

Il est à noter que les échantillons prélevés ne représentent que la granulométrie des sols à un point précis et que celle-ci peut varier selon les secteurs. Les différentes zones représentent donc une généralisation basée sur des informations ponctuelles pouvant ne pas être représentatives de la granulométrie des sols sur tout le tronçon considéré.

Le tableau 3.5 présente la granulométrie associée à chacun des échantillons analysés en laboratoire. Les granulométries indiquent le pourcentage en poids de chacun des intervalles de diamètre de particules, lesquels sont requis pour une modélisation avec le logiciel HEC-RAS.

Tableau 3.5 : Granulométries des échantillons

Classe	Diam (mm)	Pourcentage (%)																													
		EM-1	EM-3	EM-4	EM-6	EM-7	EM-10	EM-11	EM-13	EM-15	EM-18	EM-19	EM-20	EM-21	EM-22	EM-23	EM-24	EM-25	EM-26	EM-27	EM-28	EM-29	EM-30	EM-31	EM-32	V-1	V-2	V-3			
Clay	0.002-0.004	5					9		8												12										
VFM	0.004-0.008	5					7		5													6									
FM	0.008-0.016	7		3			8		9													10									
MM	0.016-0.032	9		6			7		8													11									
CM	0.032-0.0625	7		13		12	17		13		8		16			3					14										
VFS	0.0625-0.125	11	1	24	2	24	26		23	1	1	17		16	1	2	3	2	2		19	12	2	1	2						
FS	0.125-0.25	14	1	34	3	44	18	2	22	1	17	41	2	44	1	6	4	2	2	1	16	25	4	1	2						
MS	0.25-0.5	10	10	17	3	18	5	14	9	3	46	26	28	19	6	16	6	6	4	2	9	36	6	2	5						
CS	0.5-1	6	16	3	5	2	2	14	3	5	30	7	30	4	4	12	6	12	5	5	3	20	18	4	8						
VCS	1-2	6	19		6		1	6		5	6	1	11	1	3	8	7	18	3	6		6	22	4	18						
VFG	2-4	4	20		7			8		9			5		5	6	13	16	4	3		1	13	5	22						
FG	4-8	8	22		10			13		6			6		10	12	17	11	10	6			17	5	24						
MG	8-16	8	11		21			19		12			14		14	21	21	7	13	7			13	5	16						
CG	16-32			29			20		25			4		19	17	18	17	32	8			5	13	3							
VCG	32-64			14			4		33					23		2	9	25	26			42			30	10					
SC	64-128													14							36			18		40	40	40			
LC	128-256																								40	30	40				
SB	256-512																								20		10				
MB	512-1024																														
LM	1024-2048																														

Tableau 3.6 : Nature des sols

Zone	Chaînage		Fond de rivière		Berges de la rivière	
	de	à	Nature des sols	Granulom. associée	Nature des sols	Granulométrie associée
1	0+000	0+700	Sable et silt, un peu de gravier	EM-1	Sable et silt, un peu de gravier	EM1*
2	0+700	1+500	Roc en surface	Roc	Roc	Roc
	1+500	2+300	Roc en surface avec cailloux	Roc	Roc	Roc
	2+300	6+500	Roc en surface	Roc	Roc	Roc
3	6+500	7+300	Sable graveleux	EM3	Roc	Roc
4	7+300	9+200	Roc en surface	Roc	Roc	Roc
5	9+200	10+800	Cailloux et gravier	V-1	Sable silteux	EM4
6	10+800	11+400	Gravier sableux probable	EM6*	Sable, un peu de silt	EM7*
	11+400	11+700	Gravier sableux	EM6	Sable, un peu de silt/Silt sableux	EM7/EM10**
7	11+700	12+000	Gravier et sable	EM11	Sable, un peu de silt/Silt sableux	EM7/EM10**
8	12+000	12+700	Gravier sableux	EM15	Silt sableux	EM13
9	12+700	13+200	Sable	EM18	Silt sableux	EM13*
10	13+200	13+700	Roc en surface	Roc	Roc	Roc
11	13+700	14+000	Gravier et cailloux	V-2	Roc	Roc
12	14+000	14+300	Roc en surface	Roc	Roc	Roc
13	14+300	14+500	Sable fin, un peu de silt	EM19	Sable fin, un peu de silt	EM21*
14	14+500	15+000	Sable graveleux	EM20	Sable fin, un peu de silt	EM21*
15	15+000	15+200	Cailloux et blocs avec sable dessus	V-2	Sable fin, un peu de silt	EM21
16	15+200	16+200	Cailloux et blocs avec sable dessus	V-2	Sable fin, un peu de silt	EM21*
17	16+200	16+500	Gravier sableux, un peu de cailloux	EM22	Sable fin, un peu de silt	EM21*
18	16+500	17+000	Sable et gravier, un peu de cailloux	EM23	Sable fin, un peu de silt	EM21*
19	17+000	17+900	Gravier sableux probable	EM-26*	Sable fin, un peu de silt	EM21*
	17+900	19+600	Gravier sableux, un peu de cailloux	EM26	Sable fin, un peu de silt	EM21*
20	19+600	20+050	Sable et gravier	EM25	Roc	Roc
21	20+050	20+200	Roc en surface	Roc	Roc	Roc
22	20+200	20+300	Gravier et sable	EM24	Roc	Roc
23	20+300	20+800	Gravier et cailloux	V-3	Roc	Roc
24	20+800	21+000	Roc en surface	Roc	Roc	Roc
25	21+000	23+400	Gravier, un peu de sable et cailloux	EM27	Sable silteux	EM28
26	23+400	25+000	Roc en surface avec cailloux/blocs	Roc	Cailloux et gravier	V-2*
27	25+000	25+150	Sable, traces de silt	EM29	Roc	Roc
28	25+150	25+300	Roc en surface	Roc	Roc	Roc
29	25+200	25+530	Sable et gravier	EM32	Roc	Roc
30	25+530	25+700	Gravier, un peu de sable, cailloux	EM31	Gravier, un peu de sable, cailloux	EM31*
31	25+700	26+000	Sable graveleux	EM30	Sable graveleux	EM30*

* Estimé

** Superposition de deux couches

4. Hydrologie

4.1 Généralités

Une analyse hydrologique a été réalisée afin d'obtenir des séries de débits couvrant les périodes pour lesquelles des mesures de concentration de sédiments et d'accumulation de sédiments dans le réservoir Beaudet sont disponibles. Ces séries hydrologiques serviront d'entrant au modèle pour modélisation du transport sédimentaire.

4.2 Information hydrométrique disponible

Quelques stations hydrométriques du Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) se trouvent à proximité du tronçon à l'étude. Les caractéristiques de ces dernières sont présentées au tableau 4.1 et leur emplacement est présenté à la figure 4.1. De plus, des stations hydrométriques installées par l'IRDA, caractérisées au tableau 4.2, sont en opération depuis 2017.

Pour la période de 1979 à 2019, pour laquelle des mesures de transport en sédiment sont disponibles, seulement les stations 030106 et 030118 étaient en opération. Ces données ont donc été utilisées afin d'estimer les débits tout au long du tronçon modélisé. La méthodologie utilisée pour la reconstitution des débits sur l'ensemble du bassin versant est présentée à la section suivante.

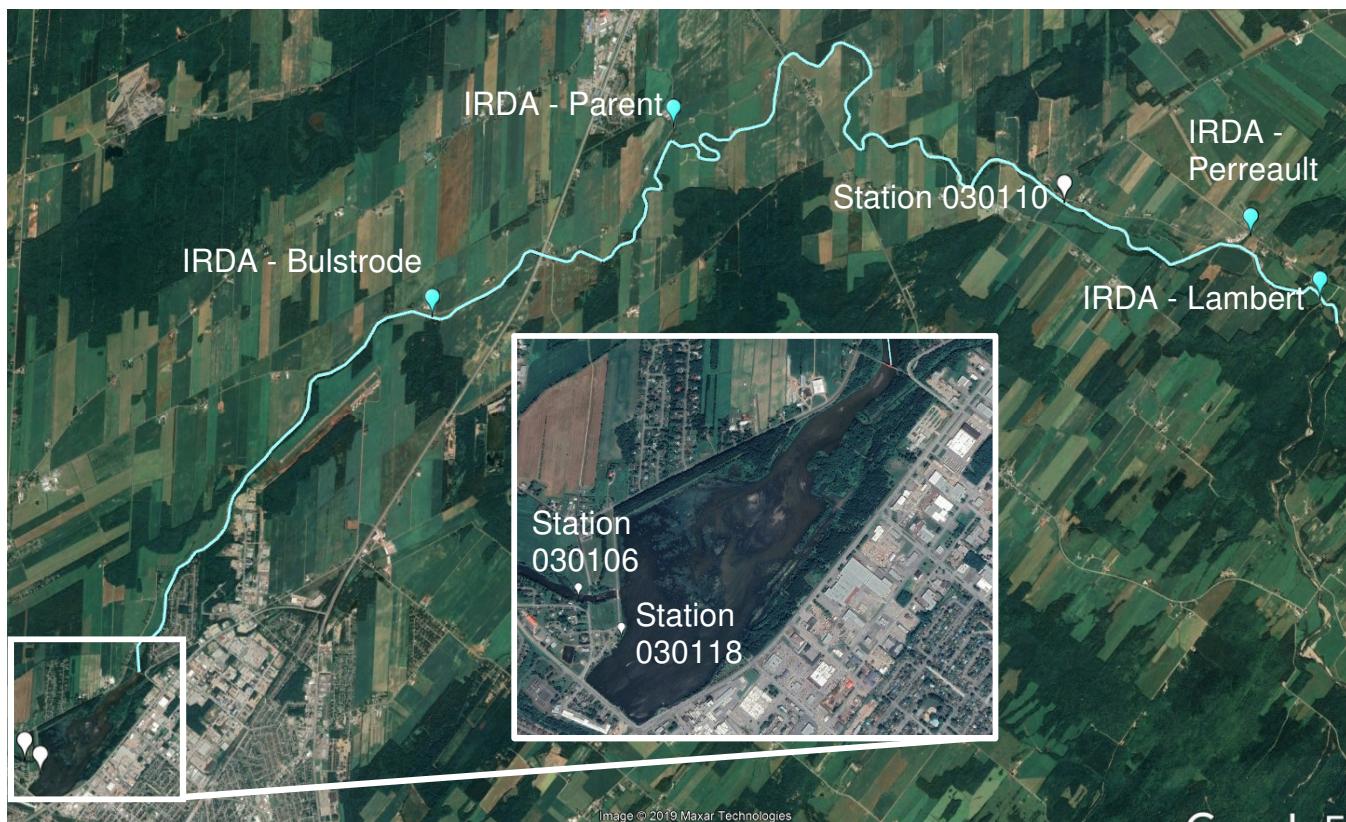


Figure 4.1 : Emplacement des stations hydrométriques à proximité du tronçon à l'étude (source : Google Earth)

Tableau 4.1 : Caractéristiques des stations hydrométriques du MELCC à proximité

Station	Localisation	Type	Période d'opération
030106	À 120 m en aval du Barrage Beaudet	Débit	Octobre 1975 à aujourd'hui
030118	Réservoir Beaudet	Niveau	Mars 1976 à aujourd'hui
030110	À 11,3 km en amont du pont de la route 116	Débit	Avril 1972 à mai 1986

Tableau 4.2 : Caractéristiques des stations hydrométriques de l'IRDA dans la zone aval (réf. 5)

Station	Localisation	Aire de bassin versant	Calage de la courbe hauteur et débit (tiré du rapport de l'IRDA)
Lambert	Sur la rivière Bulstrode	228 km ²	Calage de la courbe préliminaire hauteur-débit est médiocre pour les débits de pointe, données en glace causent des erreurs
Bulstrode	Sur la rivière Bulstrode	291 km ²	Calage hauteur-débit est optimal
Perreault	À l'exutoire du ruisseau Perreault	7 km ²	Satisfaisant, surtout pour les forts débits
Parent	À l'exutoire du ruisseau Parent	5 km ²	Calage de la courbe hauteur-débit démontre une influence du refoulement du cours d'eau principal influencé par le couvert de glace

4.3 Approche pour la reconstitution des débits sur l'ensemble du bassin versant

Le débit est reconstitué à l'aide de la station 030106 du MELCC en raison de la disponibilité des données qui s'étend de 1975 à aujourd'hui. Le débit est calculé de façon proportionnelle à l'aire des sous-bassins versants, qui sont respectivement associés à des tributaires de la rivière Bulstrode. Le débit simulé de la rivière change vis-à-vis le ruisseau Perreault, le ruisseau des Aulnes et la rivière l'Abbé.

4.4 Débits reconstitués à l'entrée du réservoir Beaudet

Les débits entrants au réservoir Beaudet sont reconstitués en procédant au bilan hydrique du réservoir Beaudet. Le niveau enregistré à la station 030118 est utilisé, à l'aide de la superficie du réservoir, pour calculer la différence de volume du réservoir à chaque pas de temps. Le débit enregistré à la station 030106 est considéré comme étant le débit sortant au réservoir. Il est ainsi possible d'obtenir le débit entrant au réservoir en faisant la somme du débit sortant et de l'emmagasinement à chaque pas de temps.

4.5 Débits quotidiens à l'entrée du réservoir Beaudet

Les débits quotidiens à l'entrée du réservoir Beaudet sont présentés de la période 1979 à 2019 à la figure 4.2.

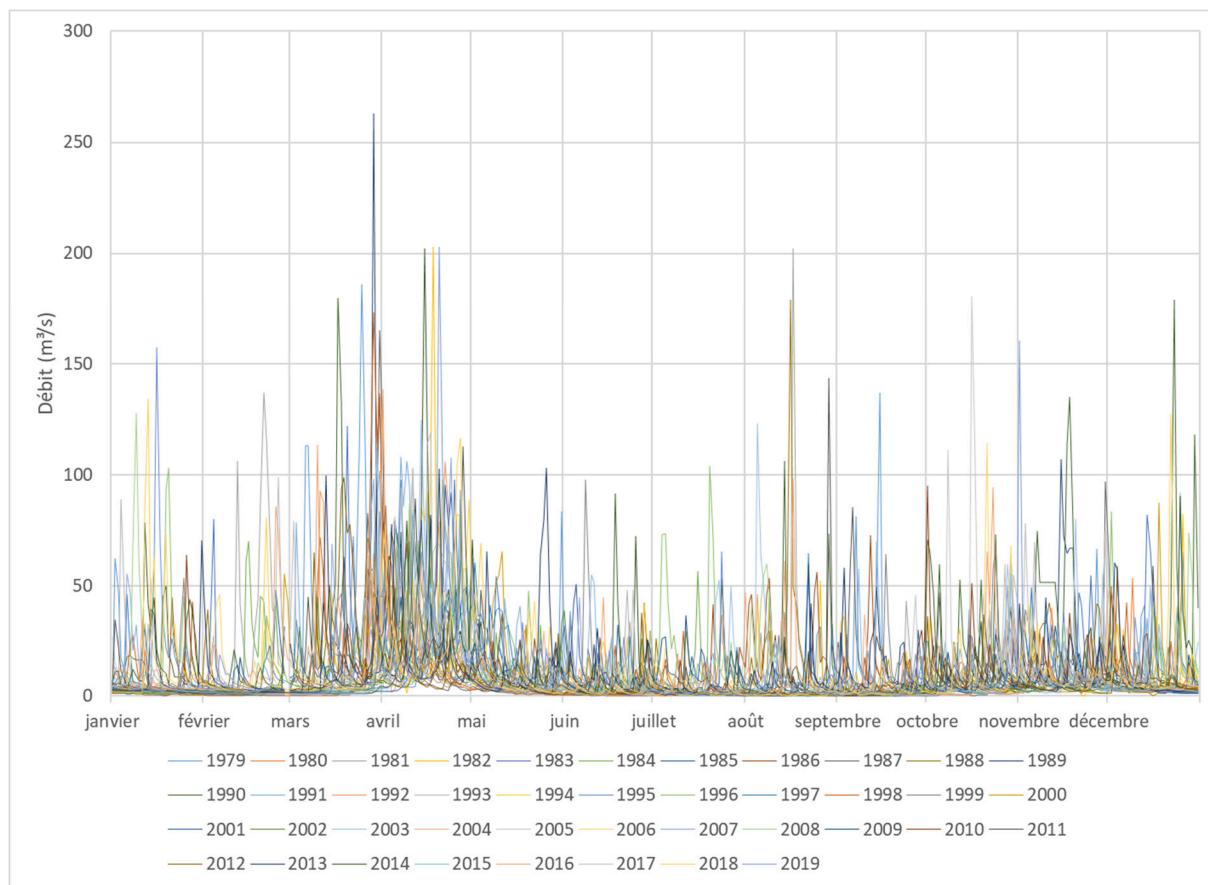


Figure 4.2 : Débits quotidiens à l'entrée du réservoir Beaudet

4.6 Débits mensuels à l'entrée du réservoir Beaudet

Les débits mensuels maximums, moyens et minimums à l'entrée du réservoir Beaudet sont présentés de la période 1979 à 2019 à la figure 4.3, à la figure 4.4 et à la figure 4.5.

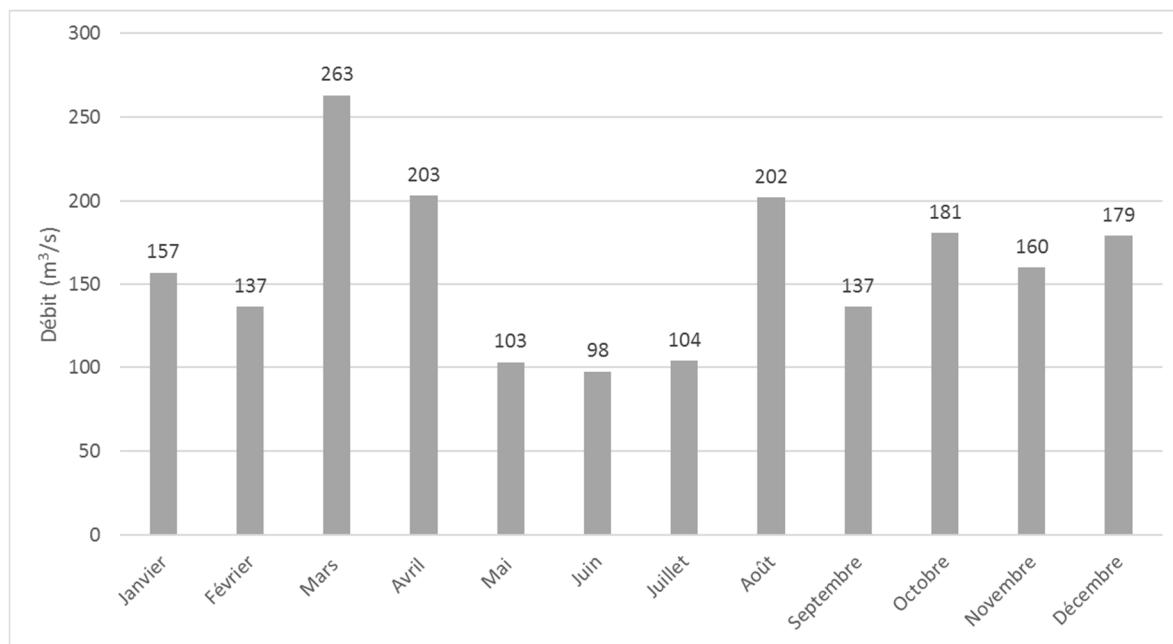


Figure 4.3 : Débits maximums mensuels à l'entrée du réservoir Beaudet de 1979 à 2019

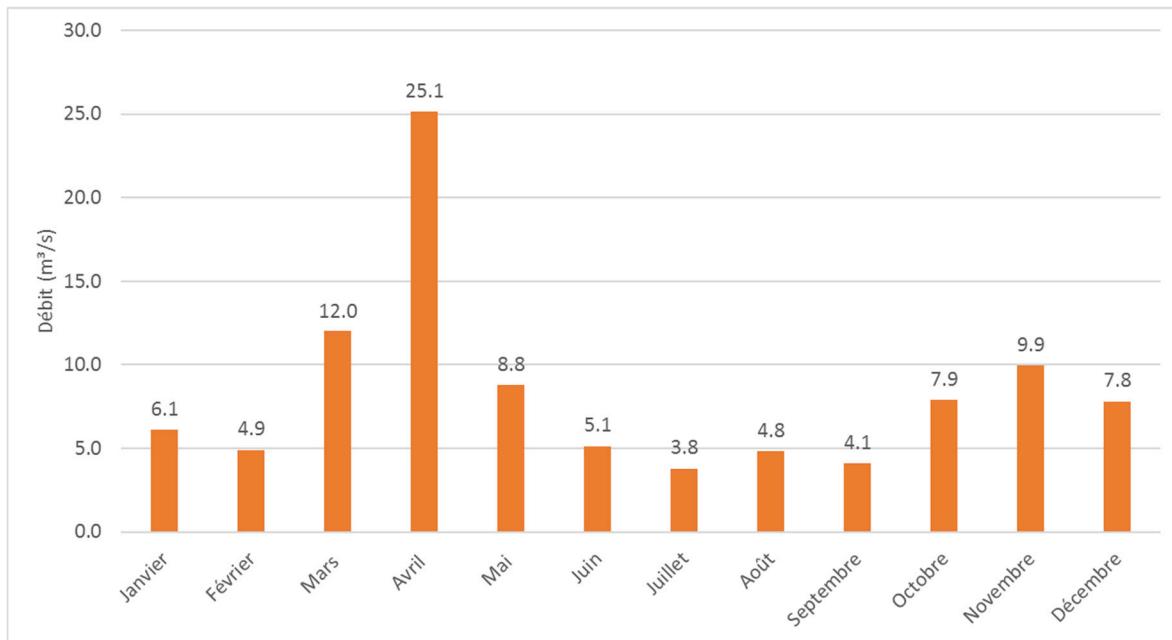


Figure 4.4 : Débits moyens mensuels à l'entrée du réservoir Beaudet de 1979 à 2019

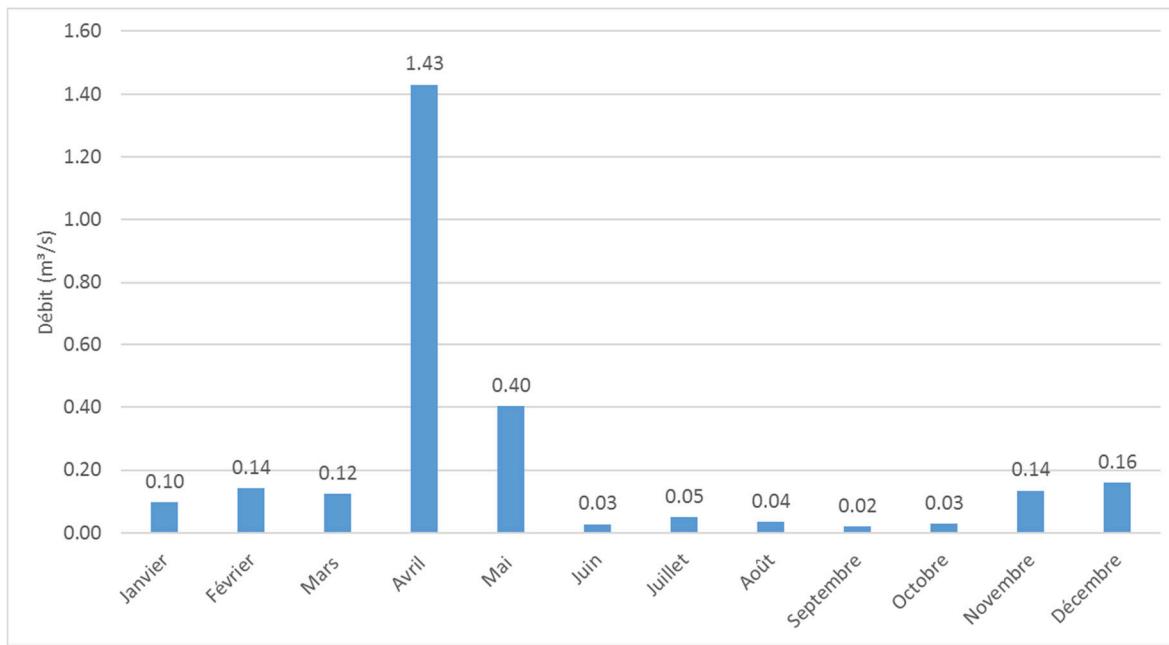


Figure 4.5 : Débits minimums mensuels à l'entrée du réservoir Beaudet de 1979 à 2019

4.7 Analyse fréquentielle des crues à l'entrée du réservoir Beaudet

Trois analyses fréquentielles préalablement effectuées sur la rivière Bulstrode ont été étudiées dans le cadre de ce rapport. Ces dernières se trouvent dans les rapports suivants :

- Étude hydrologique du Barrage Beaudet (X0002206) par le Centre d'expertise hydrique du Québec du MELCC datée de février 2016 (réf. 24);
- Étude hydrologique préliminaire de la rivière Bulstrode par Idée-eau Environnement datée de mai 2017 (réf. 23);
- Analyse hydrogéomorphologique du bassin versant de la rivière Bulstrode par l'Université Concordia en janvier 2020 (réf. 21).

La station 030106, qui enregistre les débits à l'aval du réservoir Beaudet, a été utilisée dans l'étude de Concordia. L'analyse fréquentielle a été effectuée sur les maximums annuels journaliers de 1976 à 2019. La loi Log-Pearson de type III a été retenue et aucun facteur de pointe n'a été considéré. Une analyse assez similaire a été effectuée par Idée-Eau. La même station a été considérée et la même loi a été retenue. Toutefois, un facteur afin de considérer le laminage dans le réservoir et un facteur de transposition en raison des ratios de bassin versant ont été utilisés.

Pour ce qui est de l'analyse produite par le MELCC, la station 030106 a également été utilisée. La station 030118, localisée en amont du barrage Beaudet et enregistrant le niveau au réservoir, ainsi que la station 030104, localisée environ 6,5 km à l'aval de l'exutoire du réservoir Beaudet, ont également été utilisées pour cette analyse produite en 2016. La station 030104 a été utilisée afin d'allonger la période de suivi possible jusqu'en 1967.

Une analyse fréquentielle des débits maximums journaliers a été réalisée par le MELCC pour les crues printanières et d'été-automne à l'aide des valeurs journalières de débits obtenues aux stations 030106 et 030104. Puisque les stations 030106 et 030104 ne sont pas situées au même

endroit et enregistrent les débits sur des périodes différentes, une analyse statistique d'homogénéité a été effectuée en plus des tests d'hypothèses d'indépendance et de stationnarité. Sur les données de crues d'été-automne, les tests d'hypothèses ont démontré l'indépendance, l'homogénéité et la stationnarité des données. Toutefois, pour les crues de printemps, seulement l'hypothèse d'indépendance est respectée. Les débits journaliers maximums annuels de printemps sont en décroissance; il est ainsi considéré que si la baisse de débit perdure, il n'y aurait pas d'enjeux concernant la sécurité de l'ouvrage dans le contexte d'une étude d'évaluation de la sécurité du barrage. Cette observation est intéressante dans le contexte où les solutions à l'ensablement du réservoir Beaudet envisagées visent justement à réduire les pointes de crue. Dans cette étude, les lois statistiques ont été retenues en fonction du critère du Chi carré, les représentations graphiques et du principe de parcimonie. Pour les crues de printemps, la loi Log-Pearson de type III a été retenue. Pour les crues d'été-automne, la distribution de Gumbel a été retenue.

Le MELCC a accès aux valeurs aux 15 minutes et horaires des stations 030106 et 030118 depuis 1998. À l'aide de ces valeurs horaires et de la courbe d'emmagasinement du réservoir Beaudet, les apports à l'amont du réservoir sont calculés. Cette analyse permet d'identifier les pointes d'apports de 1998 à 2011. Un facteur de pointe est calculé en fonction de ces événements.

Un facteur de pointe a ainsi été calculé à l'aide de ces valeurs en identifiant différents événements de crue de 1998 à 2011. Les facteurs de pointe correspondent au ratio des apports maximums en une journée sur la moyenne des apports sur 24 heures.

Le tableau 4.3 présente les résultats des analyses fréquentielles effectuées par les trois entités présentées ci-dessus. Les résultats obtenus par le MELCC nous semblent être satisfaisants puisque l'analyse a été effectuée à l'aide de données plus complètes (aux 15 minutes et horaire). Les facteurs de pointe calculés pour représenter les pointes d'apports, soit les débits entrants dans le réservoir en cas de crue, ont été obtenus selon une méthode rigoureuse par le MELCC.

Tableau 4.3 : Résumé des analyses fréquentielles effectuées par Concordia, Idée-Eau et MELCC

Étude	Concordia	Idée-Eau	MELCC					
	Période	Annuelle	Annuelle	Printemps	Été-Automne	Printemps	Été	Automne
Facteur considéré	Aucun	Laminage réservoir et transposition	Aucun	Aucun	Facteur de pointe (1,6)	Facteur de pointe (2,4)	Facteur de pointe (2,0)	
Période de retour (an)	Débit (m^3/s)							
2	121	119	105	77,9	168	187	156	
5	162	221	144	119	230	286	195	
10	190	191	172	146	275	350	238	
20	218	221	201	172	322	413	292	
25	226	231	-	-	-	-	-	
50	255	262	242	206	387	494	412	
100	284	295	276	231	442	554	462	
200	313	330	312	256	499	614	512	

Puisque l'analyse fréquentielle pour les crues de printemps ne démontraient pas l'homogénéité et la stationnarité des données dans l'analyse du MELCC, CIMA+ a refait les analyses fréquentielles de la station 030106 uniquement pour les crues de printemps et d'été-automne en incluant les données de 2016 à 2019. Les mêmes lois ont été utilisées que celles utilisées par le MELCC en vérifiant d'autres lois, soit la loi Log-Pearson de type III pour les crues de printemps et la distribution de Gumbel pour les crues d'été-automne. Les facteurs de pointe calculés par le MELCC ont été utilisés. Les résultats obtenus par CIMA+ se trouvent au Tableau 4.4. Les résultats obtenus s'apparentent grandement aux résultats obtenus par le MELCC.

En comparant l'ensemble des résultats, on constate que toutes les méthodes sont comparables pour les crues de récurrence 1 :200 ans. Pour les crues inférieures, comme les crues de récurrence 1 :5 ans, des différences importantes existent entre les différentes méthodes.

Tableau 4.4 : Analyse fréquentielle et apports en pointe au réservoir Beaudet

Étude	CIMA+				
	Printemps	Été-Automne	Printemps	Été	Automne
Facteur considéré	Aucun	Aucun	Facteur de pointe (1,6)	Facteur de pointe (2,4)	Facteur de pointe (2,0)
Période de retour (an)	Débit (m^3/s)				
2	105	77.9	168	187	156
5	144	118	230	283	236
10	174	145	278	348	290
20	206	170	330	408	340
25	-				
50	251	203	402	487	406
100	289	228	462	547	456
200	330	252	528	605	504

5. Modélisation hydrodynamique de la rivière Bulstrode

5.1 Approche

La modélisation hydraulique de la rivière Bulstrode vise à créer un modèle numérique représentant les niveaux d'eau et vitesses d'écoulement sur l'ensemble du tronçon à l'étude et ce, pour toute la gamme des débits observés. La modélisation est effectuée à l'aide du logiciel HEC-RAS, logiciel bien connu et réputé dans le domaine.

Le modèle hydrodynamique est créé avec l'unique objectif de supporter les calculs liés à la dynamique sédimentaire présentée plus bas. C'est cet objectif qui a guidé le choix de l'espacement entre les sections du modèle et qui a fixé les seuils de précision désirés.

Le modèle hydrodynamique comporte des limitations dans les zones de méandres, entre les PK-10 et les PK-21, où les sections transversales représentent fidèlement la rivière en étiage et lors de faibles débits, mais moins fidèlement en cas de débordement. Afin de bien représenter les niveaux d'eau et les vitesses d'écoulement observés dans cette zone lors de forts débits, les sections transversales ont été élargies.

5.2 Relevés bathymétriques, topographie et LiDAR

Lors de la campagne de relevé réalisée par CIMA+, 68 sections transversales de la rivière Bulstrode ont été relevées entre le barrage Saint-Sophie et le barrage Beaudet, en plus de 8 ponts et du barrage Princeville. Il est à noter que le niveau d'eau a aussi été relevé à chacune des sections transversales relevées. Les données recueillies lors de la campagne sont présentées plus en détail aux sections 2.6, 2.7, 2.8 et 3.6. Ces données ont également permis de construire la géométrie du modèle hydrodynamique.

Un premier modèle numérique d'élévation (MNE) avec une résolution de 1 m a été réalisé par l'équipe de l'Université Concordia à partir des données LiDAR acquises par la MRC d'Arthabaska en 2012 et par la MRC des Érables en 2013 (réf. 21). Pour répondre aux besoins de leur étude, la résolution a été modifiée à l'aide de l'outil Agréger de ArcGIS pour être de 5 m. Cette fonction a permis d'éliminer les plus petits ponts dans le MNE. L'élévation minimale de chaque groupe de pixels a été utilisée pour conserver les plus petits cours d'eau. Les plus gros ponts ont été supprimés manuellement par l'équipe de Concordia. La figure 5.1 présente le MNE produit par l'équipe de Concordia qui est étendu sur l'ensemble du bassin versant.

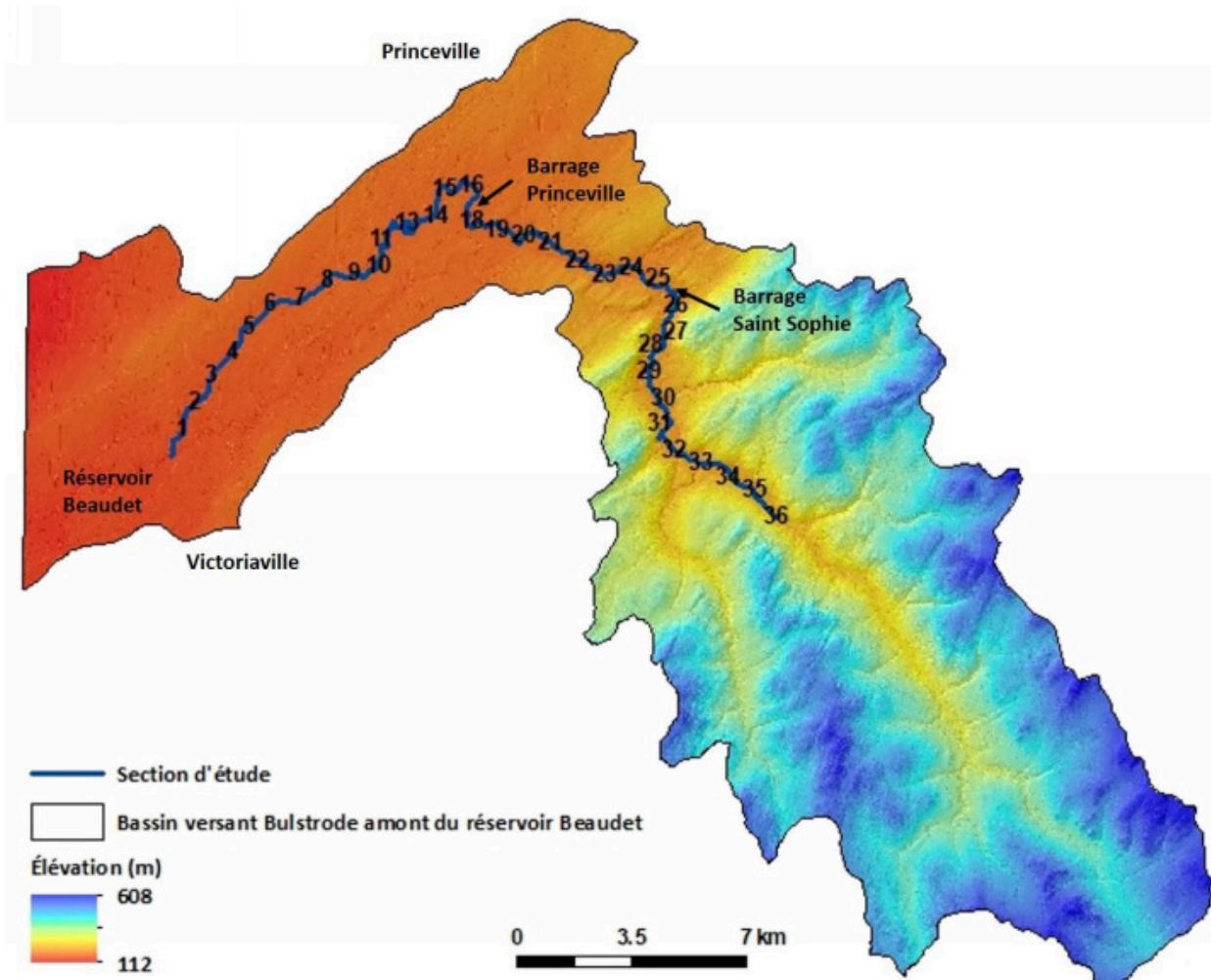


Figure 5.1 : Modèle numérique d'élévation produit par Concordia (source : Figure 1 de la réf. 21)

Le modèle numérique de terrain utilisé pour les modélisations a été élaboré à partir du MNE réalisé par Concordia auquel a été ajouté le relevé bathymétrique du réservoir Beaudet réalisé en 2019 par EXP. Finalement, le modèle numérique de terrain a été complété à l'aide des sections bathymétriques (68 sections) de la rivière Bulstrode relevées par CIMA+ en août 2019 et présentées de façon succincte à la section 3.6 et en détail (sur support USB). Le modèle numérique de terrain utilisé dans le modèle hydrodynamique qui est étendu de l'amont du barrage Sainte-Sophie à l'aval du barrage Beaudet est présenté à la figure 5.2 et en Annexe C.

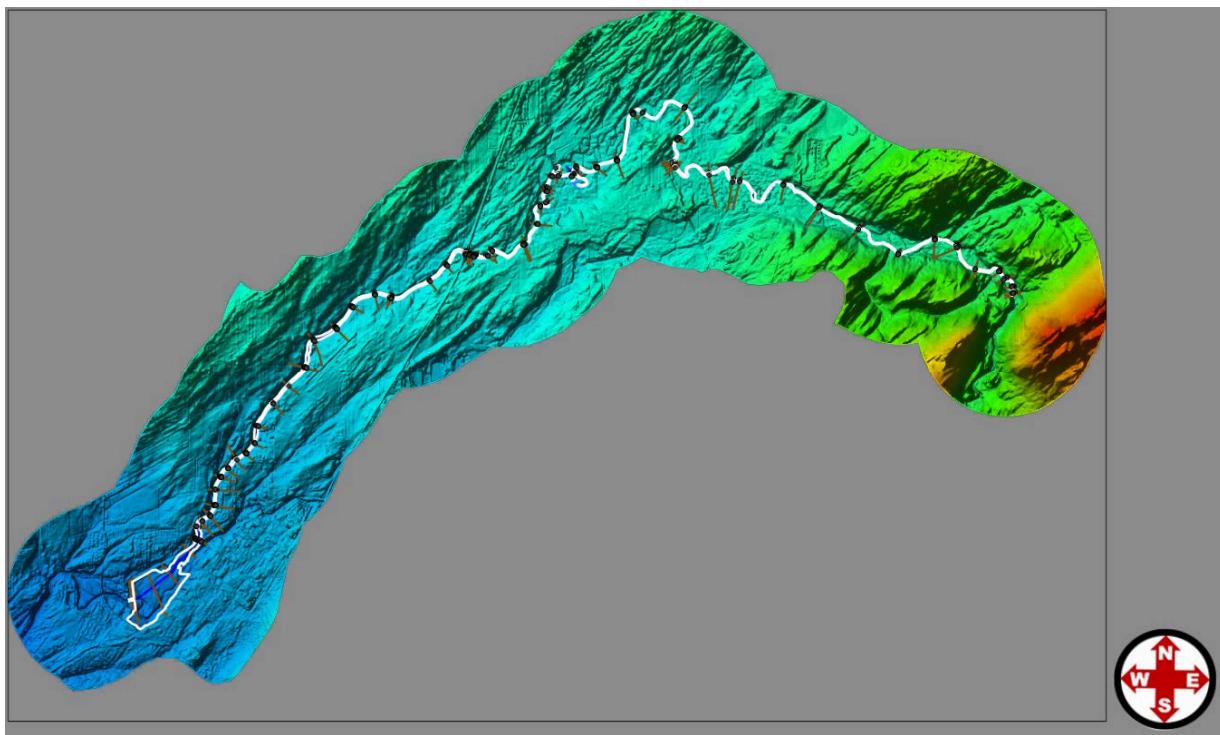


Figure 5.2 : Modèle numérique de terrain utilisé dans le modèle hydrodynamique

5.3 Relevés hydrométriques

À chacune des 68 sections transversales relevées en août 2019, le niveau d'eau a été noté. Le relevé a été effectué sur 8 jours, du 20 au 28 août 2019. Une ligne d'eau par jour a été notée, en raison des changements de débit d'un jour à l'autre. Le réseau GPS « Can-Net » a été utilisé et la précision était de $\pm 2,5$ cm.

La ligne d'eau de la crue du 1^{er} novembre 2019 a été relevée par CIMA+. Le relevé de cette ligne d'eau effectué avec l'appareil GPS « Can-Net » avait une précision de ± 4 cm.

Des lignes d'eau ont été extraites des relevées LiDAR utilisées pour élaborer le modèle numérique de terrain. Les relevés LiDAR ne sont pas en mesure d'atteindre les fonds des cours d'eau et fournissent l'élévation de la surface de l'eau au moment des relevés. C'est pourquoi les niveaux d'eau relevés par LiDAR ont été extraits et utilisés lors des premières phases de calibration afin de cibler les sections de contrôles, bris de pente, etc. qui n'auraient pas été captés lors des relevés bathymétriques de la rivière. Il est à noter que cette façon de faire est entachée d'une certaine imprécision, puisque le rayon du LiDAR ne pénètre pas toujours à la même profondeur. Une analyse sur les niveaux mesurés par le LiDAR dans le réservoir, dont la surface de l'eau est présumée plane, a montré que cette méthode a une précision de ± 25 cm.

Les relevés LiDAR disponibles ont été réalisés le 29 avril 2012 en avant-midi, le 14 mai 2012 en après-midi, le 1er décembre 2012 en avant-midi, le 27 avril 2013 en soirée, le 1er mai 2013 en après-midi et en soirée et finalement le 13 mai 2018 en après-midi. À partir de ces informations, sept lignes d'eau ont pu être extraites des relevés LiDAR pour être utilisées lors de la calibration du modèle.

Au total dix-neuf (16) lignes d'eau ont été utilisées pour la calibration du modèle hydrodynamique avant l'intégration des informations concernant les sédiments. Soit les niveaux d'eau relevés lors de relevés LIDAR (7), les lignes d'eau relevées lors des relevés bathymétriques réalisés par CIMA+ du 21 au 29 août 2019 (8) et finalement la ligne d'eau relevée le 1^{er} novembre 2019 par CIMA+ lors d'une importante crue automne ayant engendré des inondations à Victoriaville.

Les débits enregistrés à la station 030106 transposés au long de la rivière Bulstrode par transfert de bassin versant et les trois débits mesurés à l'aide d'un courantomètre à hélice lors des relevés bathymétriques d'août 2019 sont utilisés pour la calibration du modèle.

5.4 Calibration et validation du modèle

Les conditions limites aval imposées au modèle hydrodynamique correspondent au niveau d'eau du réservoir Beaudet enregistré à la station hydrométrique 030118 opérée par le MELCC.

La calibration a été réalisée à partir de 16 lignes d'eau. Plus précisément :

- + 8 lignes d'eau relevées par CIMA+ en août 2019 en période d'étiage;
- + 1 ligne d'eau relevée par CIMA+ le 1er novembre 2019 en période de crue;
- + 7 lignes d'eau tirées des relevés LIDAR en 2012, 2013 et 2018 à différentes hydraulicités.

Dans un premier temps, les coefficients de Manning ont été estimés à partir du diamètre médian des sédiments échantillonnés aux sections transversales, tel que présenté à la section 3.7. La formule utilisée pour l'estimation des coefficients de Manning, tirée de *Hydraulics Structures* de l'Université de Saskatchewan (réf. 22), est la suivante :

$$n = 0,049 d_{50}^{1/6}$$

La calibration a été effectuée tout d'abord avec les 9 lignes d'eau relevées par CIMA+, puisqu'elles ont une plus grande précision que celles tirées des relevés LiDAR.

Afin d'ajuster les lignes d'eau simulées pour qu'elles se rapprochent des neuf (9) lignes d'eau observées lors de différentes conditions hydrauliques, les coefficients de Manning dans le lit et sur les berges du cours d'eau ont été modifiés lorsque nécessaire en fonction des relevés par drone selon le type de végétation ou selon les sédiments observés aux différentes sections. L'ajustement a d'abord été effectué pour les lignes d'eau relevées à faibles débits puis raffiné pour les lignes d'eau relevées à forts débits.

Des sections en amont ou en aval des ponts ont été ajoutées et ajustées afin de reproduire les pertes de charge observées lors des relevés au droit des différentes structures. Les *ineffective flow areas* ont également été ajustées afin de mieux reproduire ces pertes de charge.

Les lignes d'eau calibrées pour les lignes d'eau relevées en août et en novembre 2019 se trouvent à l'Annexe D.

La calibration a été finalisée à l'aide des lignes d'eau obtenues avec les relevés LiDAR afin de cibler les sections de contrôles, les bris de pente, ou autres phénomènes qui n'auraient pas été captés lors des relevés bathymétriques de la rivière, tel que présenté à la figure 5.3.

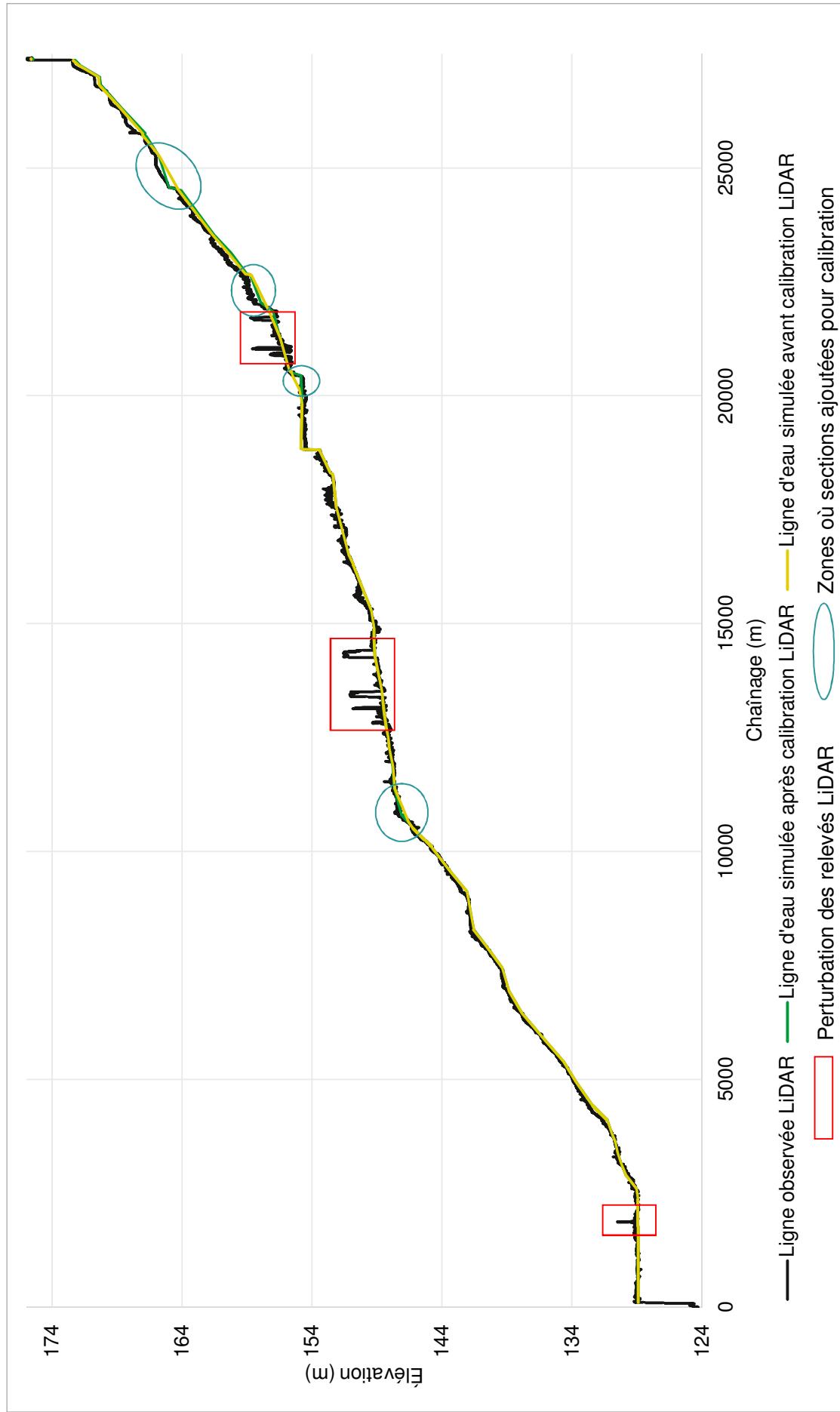


Figure 5.3 : Calibration à l'aide des lignes d'eau obtenues avec le relevé LiDAR

6. Modélisation hydro-sédimentaire de la rivière Bulstrode

6.1 Généralités

Le modèle hydraulique vise à obtenir une représentation des niveaux d'eau et des vitesses d'écoulement sur l'ensemble du tronçon étudié et ce pour toute la gamme des débits observés. Ce modèle est généré à partir des relevés terrain et LiDAR et est calé sur les lignes d'eau observées et les mesures de débit disponibles.

Le modèle hydraulique sert de base au modèle de la dynamique sédimentaire, qui lui, est calé sur les observations disponibles sur l'accumulation des sédiments dans le réservoir et le transport de sédiment en suspension. Ce modèle est produit afin de simuler l'effet sur l'accumulation de sédiments dans le réservoir de diverses interventions sur le cours d'eau et sur la gestion du réservoir Beaudet.

Un modèle de la dynamique sédimentaire comprend toujours une large part d'incertitude. Le modèle est développé avec l'intention de comprendre les différents ordres de grandeur de la dynamique sédimentaire sur le cours d'eau et non d'établir précisément certains volumes de sédiments transportés ou accumulés.

Le choix du modèle a été fait en tenant compte des données disponibles, de la précision requise dans les résultats ainsi que du temps alloué pour l'étude. Le logiciel choisi est HEC-RAS et l'approche de calcul est en 1D. Ce modèle comporte les limitations et hypothèses suivantes :

- + La bathymétrie du modèle est connue seulement en certains points précis du modèle, appelés « sections en travers » (ou XS). Ces sections représentent les points de calcul du modèle. Tous les résultats entre ces sections en travers sont des interpolations.
- + Le modèle représente, à chaque section en travers, l'accumulation ou l'érosion de la section. Toutefois, il ne prend pas en compte la migration latérale du cours d'eau. La migration latérale de la rivière Bulstrode a déjà été observée (réf. 21). Pour cette raison, la calibration du modèle se limitera à une période courte (quelques années) et relativement récente afin de réduire l'impact de ces processus sur les résultats obtenus.
- + Les hypothèses de bases de la modélisation 1D comprennent l'uniformité de la vitesse sur l'aire de la section en travers. Selon cette hypothèse, le modèle ne pourra représenter les gradients de vitesses latéraux dans le réservoir Beaudet, puisque celui-ci est représenté par une série de sections en travers. Nous ferons donc l'hypothèse que les vitesses dans le réservoir sont suffisamment faibles pour ne pas influencer les résultats.
- + Le modèle de transport de sédiment utilisé est limité aux silts, sables et graviers. La cohésion n'est pas représentée dans le modèle. Toutefois, tel que présenté ci-dessus, seulement 4 prélèvements sur le lit et les berges de la rivière Bulstrode ont montré la présence d'argile, et ce, en de faibles proportions. Pour cette raison, les conséquences de cette limitation sur les résultats du modèle devraient être faibles à négligeables.

Le modèle hydro-sédimentaire calibré servira par la suite à évaluer la faisabilité et l'impact des interventions suivantes sur l'ensablement du réservoir Beaudet :

- Rétention en ligne et diminution des pointes de crue;
- Modification de la gestion du réservoir pendant les crues (éclusage des crues);
- Modification de la gestion du réservoir hors crue (soutirage);
- Protection des berges de la rivière pour empêcher l'érosion.

Il est à noter que nous sommes généralement en accord avec la première recommandation du rapport hydrogéomorphologique (réf. 21) de « réduire ou éliminer la stabilisation de berges là où il n'y a pas d'enjeux de sécurité publique ». Toutefois, les arguments qui soutiennent cette recommandation méritent d'être nuancés et la recommandation élargie. En effet, cette recommandation est appuyée sur des observations locales qui montrent l'effondrement de la stabilisation de talus et un rythme de régression plus élevé à l'aval d'une protection en enrochements. Pour ce qui est de l'effondrement des talus, l'expérience des aménagistes et ingénieurs fluviaux, au Québec comme à l'international, montre qu'il est possible de construire des stabilisations de talus et des canalisations pérennes, pour autant que les contraintes hydrauliques et la dynamique sédimentaire soit correctement prises en compte dans la conception. Également, le mécanisme qui a créé le rythme accéléré de l'érosion à l'aval de la stabilisation de talus présenté dans ce rapport est observé par photo-interprétation et n'est pas expliqué par les auteurs. Cette observation locale est présentée comme une généralité applicable à tous les enrochements de protection, mais celle-ci n'est pas conforme à l'expérience de CIMA+ et nous n'avons pas pu trouver de littérature pouvant supporter la généralisation de tels phénomènes. Puisque le rapport hydrogéomorphologique (réf. 21) montre bien la mobilité du cours d'eau de certains tronçons, nous croyons plutôt que cette première recommandation devrait inclure un aspect d'étude plus global lorsque la stabilisation des berges est envisagée. Finalement, cette recommandation place la sécurité du public comme seule raison valable pour procéder à la stabilisation d'une berge. Nous croyons plutôt que chaque intervention en rivière, qu'elle soit pour la sécurité du public, pour l'économie, le patrimoine, l'environnement, etc. doit prendre en compte le système fluvial et être étudiée dans son ensemble et que les solutions possibles soient analysées à la lumière des avantages et inconvénients, proportionnelles à la problématique et ayant la meilleure valeur pour la société.

6.2 Approche

La modélisation hydrosédimentaire de la rivière Bulstrode a été effectuée à l'aide du module de transport de sédiments de HEC-RAS. Les modélisations ont été effectuées à l'aide d'un écoulement quasi-permanent, qui correspond à une simplification d'un modèle non-permanent. L'écoulement quasi-permanent simule un écoulement non-permanent à partir d'une série d'écoulements permanents, tel que présenté à la figure 6.1. Les paramètres hydrodynamiques pour le modèle de transport de sédiments sont calculés avec un modèle permanent et ensuite appliqués sur la période spécifiée pour calculer le transport en sédiments dans le temps. Ce type d'écoulement dans HEC-RAS n'est utilisé que pour les études de transport de sédiments.

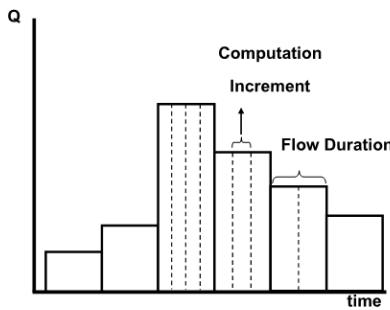


Figure 6.1 : Écoulement quasi-transitoire utilisée dans Hec-Ras (réf. Hec-Ras)

Afin de procéder au calcul de transport sédimentaire, différents paramètres doivent être fournis au modèle HEC-RAS, en plus des paramètres nécessaires aux modélisations hydrauliques sans transport sédimentaire, soit :

- + La granulométrie observée aux différentes sections du modèle;
- + La profondeur maximale d'érosion à chaque section;
- + L'équation de transport de sédiment utilisée;
- + La méthode de calcul de la vitesse de sédimentation des particules;
- + La méthode de triage ;
- + La condition limite amont du calcul de transport de sédiment.

Les périodes de modélisation privilégiées ont été sélectionnées selon les données disponibles quant au transport de sédiments de la rivière Bulstrode. Les données disponibles correspondent aux volumes de sédiments accumulés dans le réservoir Beaudet pour différentes périodes et aux concentrations de matières en suspension à différents emplacements sur la rivière Bulstrode et ses tributaires. Le choix des périodes de modélisation a été fait afin de valider les équations de transport en sédiments retenues d'après les conditions observées et de couvrir une gamme de débits permettant de décrire la variabilité du transport en sédiments en fonction du débit de la rivière.

Le logiciel HEC-RAS propose huit fonctions de transport de sédiments. Parmi ces fonctions, six permettent l'estimation du transport total, tandis que deux se limitent au transport par charriage. Étant donné la taille des sédiments dans le cours de la rivière, ces deux dernières méthodes n'ont pas été considérées. De plus, l'ensemble de ces équations ont été élaborées pour différents types de sédiments et de rivières. Ces équations empiriques et algorithmes ne sont donc pas applicables à tous les sites, tel que présenté dans le tableau 6.1.

Tableau 6.1 : Fonctions de transport de sédiments

Fonction de transport	Type calculé	Basé sur	Type sédiment	Type rivière	Diamètre
Ackers and white	Charge totale	Expérimentation en canal avec sédiment uniforme	Sable à gravier fin	Ondulations, dunes, lit plat, $Fr < 0.8$	d : 0.04-7 mm
Engelund-Hansen	Charge totale	Expérimentation en aval avec des sédiments entre 0,19 and 0,93 mm de diamètre	Sable avec taille uniforme	Rivière sablonneuse avec beaucoup de particules en suspension	0.19-0.93 mm
Laursen-Copeland	Charge totale	Analyse qualitative analysis, expérimentation et données supplémentaires	Gravier et applicable sur des lits à granulométrie variée (permet bien avec le sable fin et le silt grossier)		dm : 0.011-29 mm
Meyer-Peter Muller	Transport par charriage	Données expérimentales et testé et utilisé sur des rivières avec sédiments grossiers	Sable et gravier (sous-estime le transport de matériel plus fin)	Lit plat	dm : 0.4-29 mm
Toffaleti	Charge totale	Données exhaustives en canal et sur le terrain, appliquée avec succès sur de grandes rivières (ex : Mississippi)	Sable (mauvaise performance avec des particules de gravier)	Grande rivière	d : 0.095-4 mm
Yang	Charge totale	Expérimentation en canal et données terrain	Sable et gravier	Sensible aux vitesses d'écoulement	d : 0.062-7 mm
Wilcock	Transport par charriage		Lit avec granulométrie variée avec du sable et du gravier		

La vitesse de sédimentation des particules peut être déterminée dans HEC-RAS selon trois méthodes, soit Rubey, Toffaleti et Van Rijn. La méthode de Toffaleti a été écartée puisqu'elle considère un facteur de forme des granulats étant égal à 0,9, ce qui correspond à des granulats étant presque des sphères parfaites. La méthode par Rubey repose sur la loi de Stoke, qui est utilisée dans les tests standards pour les analyses de tailles de particules dans les sols selon l'ASTM. La méthode de Rubey a été testée dans l'eau à une température de 16°C et la méthode de Van Rijn à 20°C. Les lois de Van Rijn et de Rubey sont applicables pour des sédiments ayant un facteur de forme de 0,7, ce qui correspond à un sable naturel. Ainsi, même si la loi de Van Rijn aurait également pu être utilisée, la loi de Rubey a été retenue.

Les conditions limites amont pouvant être utilisées pour le calcul de transport des sédiments sont la courbe de tarage (charge de sédiment en fonction du débit), la charge en équilibre ou encore une série de charge en sédiment. Cette série n'est disponible que sur une durée limitée, ainsi, la charge à l'équilibre a été retenue. Une analyse de sensibilité entre l'emploi d'une courbe de tarage et la charge en équilibre a été effectuée et les résultats ont montré une différence négligeable au niveau du réservoir.

Le transport de sédiments est évalué en se basant sur les granulométries de la couche active de sédiment et non pas tout le lit. HEC-RAS propose trois méthodes de triage afin de déterminer la couche active de sédiment : la méthode de Thomas, la méthode de Copeland et la méthode appelée « active layer mixing method ». La méthode par défaut est la méthode de Thomas, qui a été développée pour des systèmes comportant des granulométries grossières et bien étalées. Deux couches actives, soit une couche superficielle et une surface inférieure à cette dernière, sont considérées dans cette méthode. La couche superficielle est ainsi érodée avant la surface inférieure. La méthode de Thomas sous-estime l'érosion des particules fines puisqu'elle surestime le phénomène de pavage du lit qui protège le granulat primitif sous-jacent (en anglais armoring). La méthode de Copeland est basée sur la méthode de Thomas et comprend aussi deux couches actives, mais est plus applicable aux lits de sable. Les phénomènes d'érosion et d'affouillement sont surestimés avec la méthode de Copeland par rapport à la méthode de Thomas. Ces deux méthodes sont considérées comme étant sophistiquées et compliquées en raison des deux couches modélisées dans la couche active et limitent l'érosion. La méthode de mélange de la couche active (*Active Layer Mixing Method*) est une méthode simplifiée ayant des limites, mais pouvant être préférable pour les cas où le pavage du lit est mobile. Une seule couche est considérée comme étant active et en cas d'érosion de cette couche, les sédiments se trouvant dans la couche étant inactive au début de la simulation contribuent à la couche active.

6.3 Différenciation du transport par charriage et par suspension

Les modèles de transport choisis sont des modèles de type « global », i.e. qu'ils calculent le transport de sédiments peu importe la méthode de transport (charriage, suspension, etc.). Afin de déterminer la part des sédiments en suspension et par charriage, un post-traitement est appliqué aux résultats du modèle. Lorsque le rapport entre la vitesse de frottement de l'écoulement (u_*) et la vitesse de sédimentation des particules (v_{ss}) est supérieur à 0,4, le transport est considéré en suspension (réf. 29). Lorsque ce rapport est entre 0,1 et 0,4, les particules sont considérées être transportées par charriage.

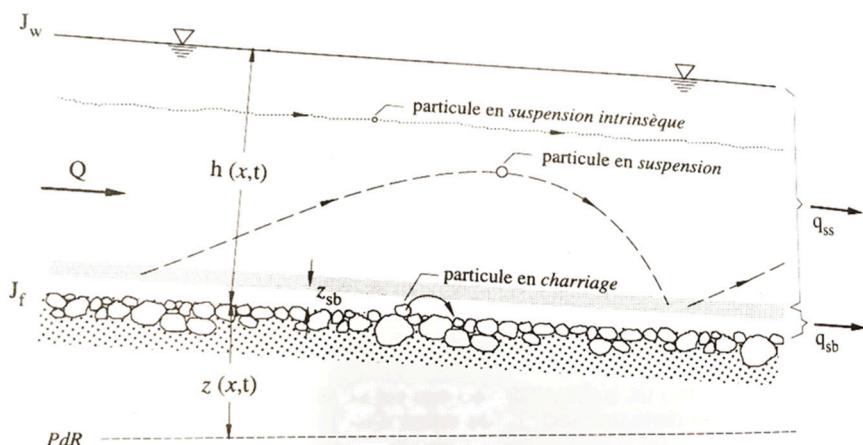


Figure 6.2 : Particules en transports par charriage ou en suspension (source : EPFL (réf. 29))

$$\frac{u_*}{v_{ss}} > 0,1 \text{ commencement du transport par charriage}$$

$$\frac{u_*}{v_{ss}} > 0,4 \text{ commencement du transport en suspension}$$

s

6.4 Données utilisées

Les granulométries utilisées aux différentes sections du modèle proviennent des rapports de caractérisation du lit et des berges réalisées par CIMA+ en 2019 (Réf. 2) et du rapport de caractérisation des sédiments du réservoir Beaudet réalisé par Les Laboratoires Shermont en 2004 (réf. 13).

La caractérisation du lit et des berges de la rivière Bulstrode produite par CIMA+ a été réalisé sur la base de la caractérisation des berges (relevé photogrammétrique en drone) qui a permis d'établir les zones de sédiments homogènes sur le tronçon à l'étude. Le modèle hydrosédimentaire inclut les données granulométries des échantillons (20) de sédiments relevés par CIMA+. Notons que des zones de roc ont aussi été relevées et sont représentées dans le modèle.

Des mesures de concentration de sédiments en suspension prises sur le terrain par l'IRDA de 2018 à 2019 (réf. 13) sont disponible à quatre emplacements sur le tronçon modélisé (voir le tableau 6.2). Les données prises en amont du réservoir Beaudet ont été utilisées pour évaluer la capacité des équations de transport sédimentaire à reproduire les concentrations de sédiments observées à l'amont du réservoir, tandis que les données aux ruisseaux Perrault et Parent ont été utilisées afin de tester la sensibilité du modèle à l'injection de sédiments provenant des tributaires sur le tronçon modélisé. Finalement, les données de concentrations de sédiments mesurées à proximité du barrage Sainte-Sophie du modèle ont permis de tester l'impact de l'utilisation d'une condition amont de courbe de tarage (charge de sédiments en fonction du débit) en comparaison avec la charge en équilibre (*equilibrium load*).

Tableau 6.2 : Stations de l'IRDA utilisées pour le modèle hydrosédimentaire

Station	Tronçon	Localisation	Utilisation
Lambert	Principal	En aval du barrage Sainte-Sophie	Vérification de la condition amont du modèle
Bulstrode	Principal	Amont du réservoir Beaudet	Calibration du modèle
Perreault	Adjacent	Extrémité du bassin Perreault, aval de la station Lambert	Vérification de l'impact des apports latéraux
Parent	Adjacent	Extrémité du bassin Parent, amont de la station Bulstrode	Vérification de l'impact des apports latéraux

6.5 Calibration du modèle

L'objectif principal du modèle est de représenter les phénomènes de transport sédimentaires dans la rivière Bulstrode entre le barrage Sainte-Sophie et le barrage Beaudet. Pour ce faire, le modèle doit être en mesure de reproduire les accumulations de sédiments observées dans le réservoir, soit une accumulation moyenne d'environ 16 000 m³/an (réf. 6) et les concentrations de matières en suspension observées. En raison de la disponibilité des données et des hypothèses du modèle numérique, la période du 24 juillet 2014 au 24 octobre 2018 a été retenue pour la calibration du modèle.

Il est à noter qu'un modèle hydrodynamique 1D ne permet pas la migration latérale du lit d'un cours d'eau. Il a donc été jugé préférable de limiter les périodes modélisées à des périodes aussi courtes que possible afin de limiter l'impact de cette limitation sur les résultats de modélisation obtenus. En effet, la rivière Bulstrode présente de nombreux méandres actifs et que les images satellites disponibles permettent d'observer des indices de plusieurs mouvements du lit de la rivière Bulstrode.

La calibration du modèle a été réalisée en ajustant les profondeurs et les largeurs d'érosions, à l'intérieur des limites possibles, pour chacune des sections transversales modélisées de sorte à reproduire l'accumulation de sédiments mesurée dans le réservoir pour la période retenue. Cette méthodologie a été appliquée avec chacune des équations de transports sédimentaires applicables à la rivière Bulstrode et disponibles dans HEC-RAS 5.0.7, soit les équations de Yang, de Laursen (Copeland) et d'Ackers-White, et ce, pour chacune des méthodes de triage des sédiments disponible (Active Layer, Thomas et Copeland). Au total, neuf combinaisons d'équation de transport et de méthode de triage ont été évaluées.

La deuxième phase de calibration a été réalisée à partir des neuf modèles reproduisant les accumulations de sédiments dans le réservoir de 2014 à 2018 avec une précision de $\pm 20\%$. Pour cette phase, les concentrations de sédiments en suspension modélisées en amont du réservoir Beaudet ont été comparées aux concentrations de sédiments mesurées par l'IRDA au même endroit et pour la même période. Cet exercice a permis de cibler la combinaison d'équation de transport et de méthode de triage qui fournissait des concentrations de sédiments en suspension les plus semblables à celles observées tout en permettant de reproduire les accumulations de sédiments dans le réservoir de juillet 2014 à octobre 2018. De cette façon, l'équation de transport de Laursen (Copeland) et la méthode de triage *Active Layer* ont été retenues pour la suite de l'analyse.

6.6 Résultats de calibration

6.6.1 Accumulation de sédiments dans le réservoir Beaudet

Le volume total de sédiments accumulé modélisé dans le réservoir Beaudet est comparé au volume observé. Le tableau 6.3 présente les résultats de la calibration. Le volume simulé est inférieur d'environ 11% au volume observé, ce qui représente une bonne adéquation.

Tableau 6.3 : Comparaison des volumes accumulés dans le réservoir Beaudet observés et modélisés

Station	Volume accumulé sur la période du 24 juillet 2014 au 24 octobre 2018
Observé	79 800 m ³
Modélisé	71 100 m ³

Il est à noter que le volume de sédiment accumulé modélisé dans la zone complète de refoulement pour la même période est de 103 400 m³. Aucune information relative à l'accumulation de sédiments pour la zone complète de refoulement n'était disponible au moment de réaliser cette étude.

6.6.2 Quantité de sédiments en suspension

Le volume total de sédiments en suspension à la station Bulstrode de l'IRDA est comparé au volume total modélisé au même endroit. Les résultats sont présentés au tableau 6.4. La simulation est répétée en considérant la charge de transport sédimentaire maximale à la condition frontière amont (modèle nommé « sans injection »), et en considérant les volumes de sédiments observés dans l'IRDA aux stations Lambert, Perreault et Parent (modèle nommé « avec injection »). Les résultats des deux approches de modélisation se comparent bien avec les observations. Le volume total de sédiments en suspension mesuré par l'IRDA pour cette période correspond à 9 120 m³, tandis que les volumes obtenus par modélisation avec et sans injection de sédiments sont de respectivement 9 050 m³ et 9 000 m³.

Tableau 6.4 : Volume total de sédiment en suspension modélisé et observé

Station	Volume de sédiments en suspension du 11 avril 2018 au 24 juillet 2019
Observé	9 120 m ³
Modélisé avec injection	9 050 m ³
Modélisé sans injection	9 000 m ³

La figure 6.3 présente la comparaison entre les concentrations de sédiments modélisés et les débits de la rivière Bulstrode. On remarque que les pointes de concentration de sédiments correspondent à l'augmentation des débits du cours d'eau.

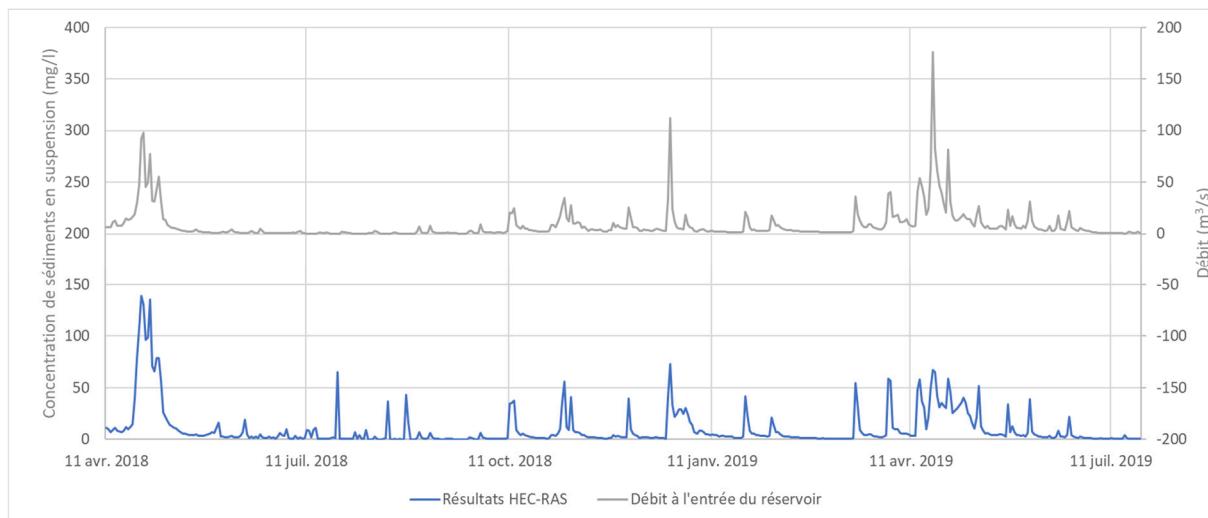


Figure 6.3 : Concentration de sédiments en suspension modélisées et débit à l'entrée du réservoir – Période du 11 avril 2018 au 24 juillet 2019

Les figure 6.4 et figure 6.5 présentent la comparaison entre les concentrations de sédiments modélisées et observées à la station Bulstrode. À la figure 6.4, on remarque que les deux courbes, bien que présentant des similarités, ne représentent pas exactement le même comportement. En effet, le modèle est basé strictement sur le débit en rivière, alors que les observations prennent en compte une multitude de phénomènes qui ne peuvent être totalement pris en compte dans une modélisation hydrosédimentaire.

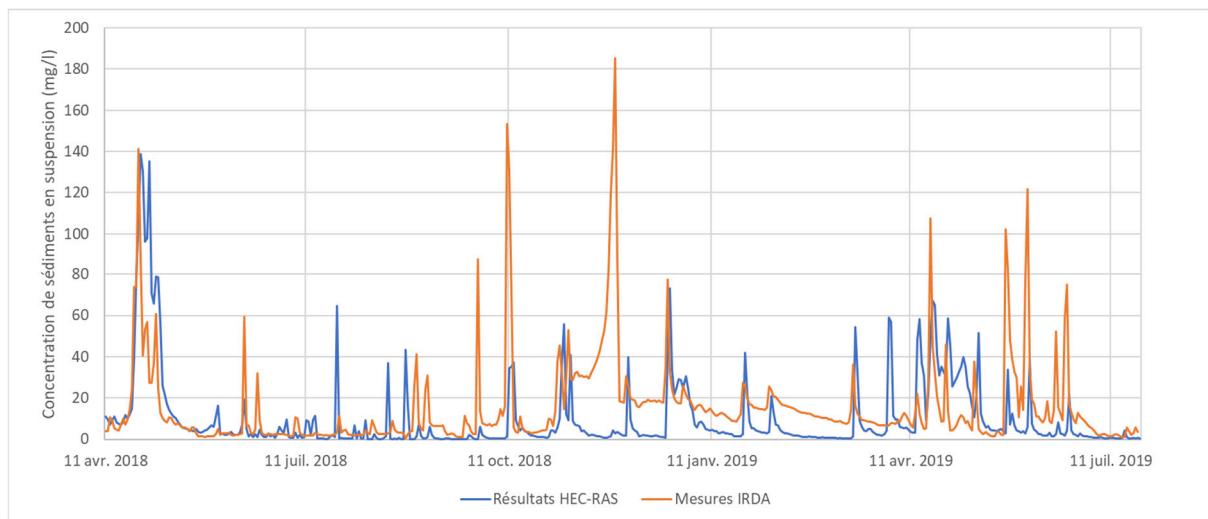
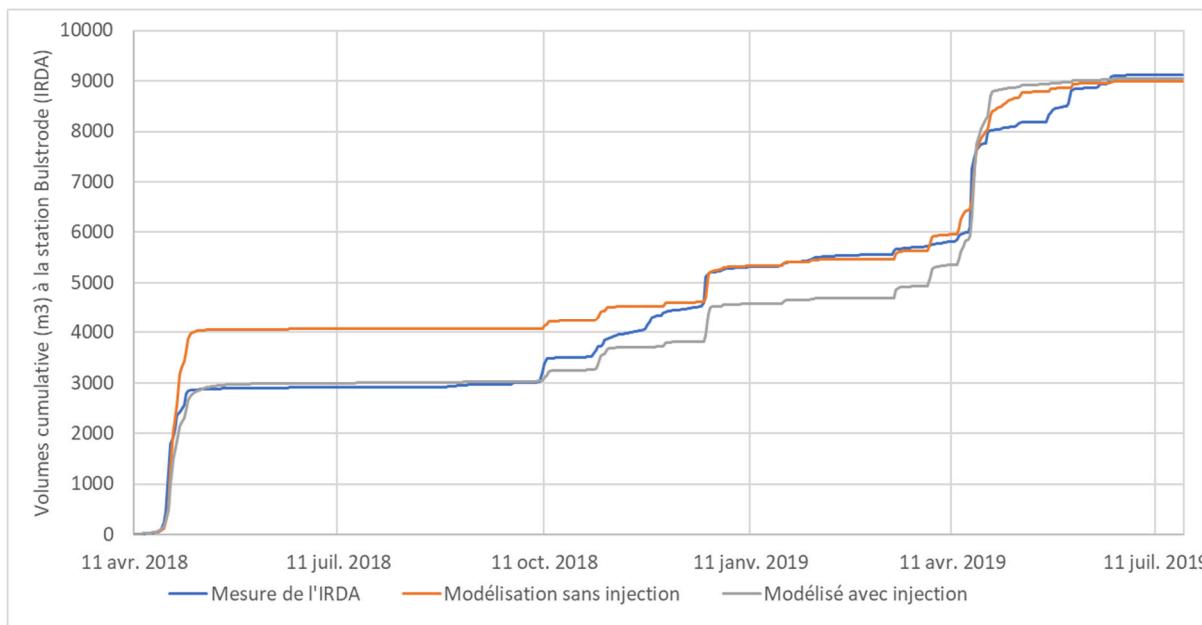


Figure 6.4 : Comparaison des concentrations de sédiment en suspension modélisées et observées 11 avril 2018 au 24 juillet 2019.

La figure 6.5 présente les mêmes résultats, mais sous une forme cumulée. Les résultats obtenus indiquent que la modélisation permet une estimation précise ($\pm 1\%$) de la quantité de sédiments en suspension pour la période d'avril 2018 à juillet 2019.



En regardant l'ensemble des résultats obtenus lors de la calibration du modèle, nous concluons que le modèle est apte à représenter globalement les flux sédimentaires de la rivière et à évaluer l'impact général des solutions envisagées.

6.6.3 Transport de sédiment en fonction du débit

Les figure 6.6 et figure 6.7 présentent la quantité de sédiments accumulée dans le réservoir en fonction du débit de la rivière. La figure 6.6 montre une forte accumulation ponctuelle de sédiments lors des crues printanières. Toutefois, le volume de sédiments accumulé pendant le reste de l'année est d'un ordre de grandeur similaire. La figure 6.7 montre les volumes de sédiments accumulés dans le réservoir classés par débit de la rivière. On note que 50% de l'accumulation de sédiments a lieu lors de débits inférieurs à $60 \text{ m}^3/\text{s}$ environ, une valeur qui peut être dépassée durant toute l'année. Moins de 5% des sédiments sont accumulés lors des débits moyens hors crue printanière. On pourrait donc qualifier le transport sédimentaire de la rivière Bulstrode comme étant très « réactif », c'est-à-dire qu'il est faible en conditions normales, mais qu'il augmente grandement dès que le débit dépasse les valeurs moyennes.

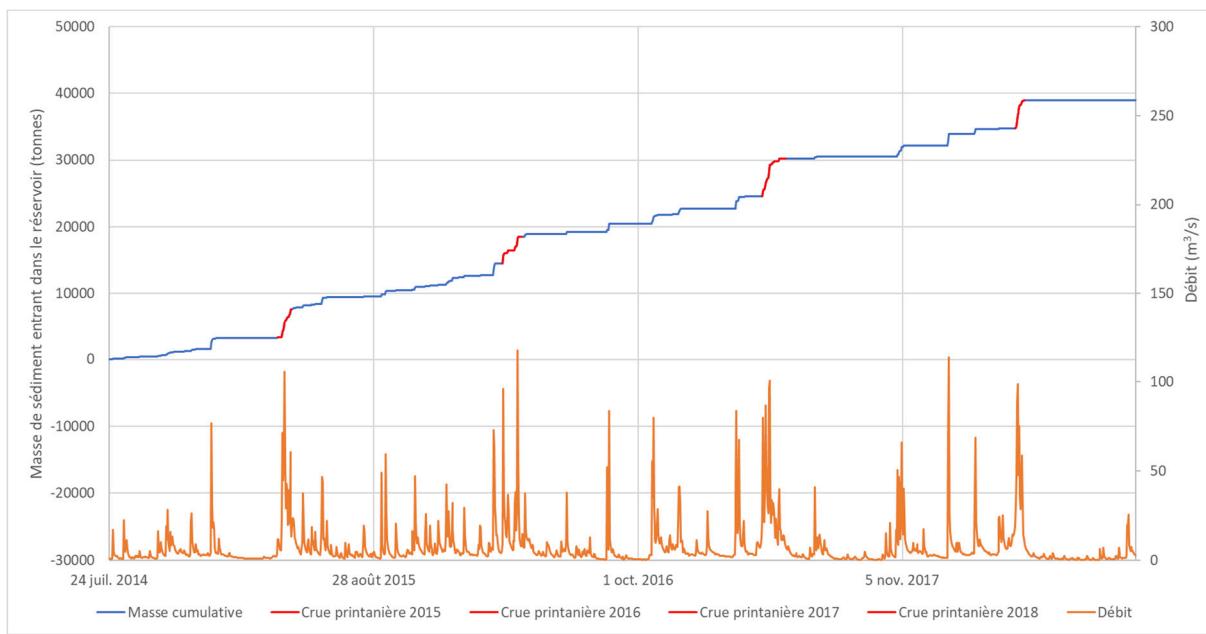


Figure 6.6 : Transport de sédiments en fonction du débit - Période du 11 avril 2018 au 24 juillet 2019 – Modélisation HEC-RAS

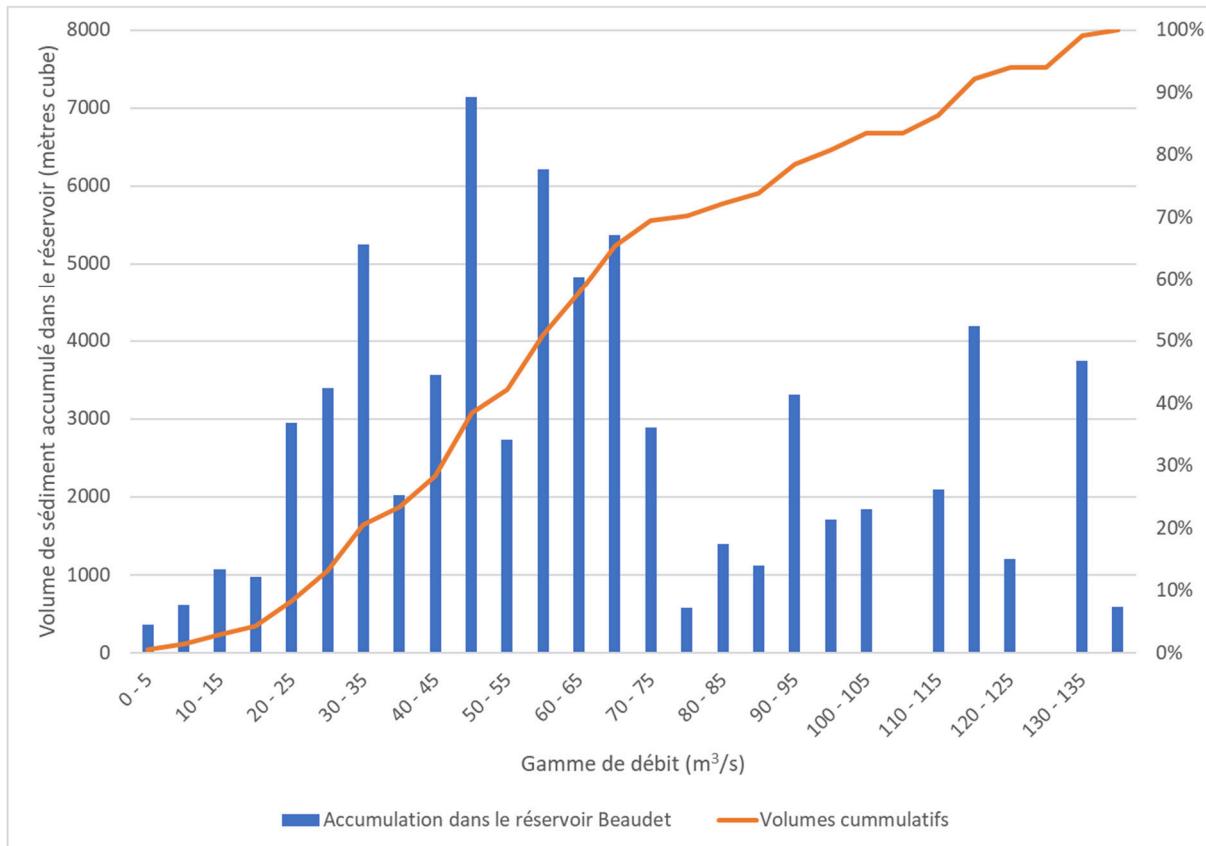


Figure 6.7 : Volume de sédiments accumulé dans le réservoir Beaudet en fonction du débit - Période du 11 avril 2018 au 24 juillet 2019 – Modélisation HEC-RAS

6.6.4 Charge de fond

Tel que mentionné ci-dessus, le modèle de transport de sédiments utilisé est un modèle « global », i.e. qu'il calcul la charge de fond (charriage) et le transport par suspension sans différencier les modes de transport. Les quantités de sédiments transportées par charriage et par suspension sont déterminées grâce à un post-traitement sur les résultats.

Sur la période analysée pour la calibration du modèle et à l'entrée du réservoir Beaudet, le modèle indique que 89% du transport sédimentaire se fait en suspension et 11% par charriage. Ce calcul a été repris pour la période 2018 à 2019 et indique des résultats similaires de 92% de transport en suspension pour 8% de charriage. Le modèle indique donc que le transport sédimentaire pour le tronçon étudié se fait majoritairement par suspension.

7. Analyse de l'impact de solutions pour la réduction de l'ensablement du réservoir Bulstrode

7.1 Réduction de l'ensablement du réservoir par laminage des débits de crue

Plusieurs approches ont été tentées pour trouver une solution à l'ensablement du réservoir Beaudet par la réduction des débits de pointe.

7.1.1 Approche #1 : Approche « théorique » - Conservation du volume de l'hydrogramme

En premier lieu, les simulations sur la période de calibration, soit du 24 juillet 2014 au 24 octobre 2018, ont été reprises en modifiant artificiellement l'hydrogramme d'entrée de modèle pour le limiter à différents débits maximums. Cette façon de faire est dite « théorique » puisqu'elle ne s'attarde pas à identifier les moyens concrets pour atteindre la réduction des débits de pointes souhaitée. Toutefois, cette approche a l'avantage de caractériser rapidement les gains potentiels de telles solutions.

Trois scénarios ont été étudiés à l'aide de cette approche, soit des hydrogrammes limités à 25 m³/s, 65 m³/s et 85 m³/s. Il est à noter que ces hydrogrammes modifiés ont un volume total égal au volume total de l'hydrogramme d'entrée original, puisque le volume écrété est reporté plus tard dans la simulation. Les résultats sont présentés au tableau 7.1.

Étant donné le caractère très réactif de la rivière Bulstrode, le laminage des crues sur la rivière nécessaire afin de réduire de façon significative et durable l'accumulation de sédiments demande de limiter les crues sous une valeur de 25 m³/s. Même avec une telle réduction, le réservoir continuera de s'ensabler, mais à un rythme 1,4 à 2 fois plus lent qu'actuellement.

Une telle réduction des crues semble, d'une part, économiquement difficile à justifier puisque le volume d'emmagasinement serait plus de 46 fois supérieur à celui du réservoir Beaudet et d'autre part, pourrait avoir des impacts significatifs sur l'environnement et les autres utilisateurs de l'eau des rivières Bulstrode et Nicolet. Pour ces raisons, cette mesure semble déraisonnable. Sans compter que ce volume d'emmagasinement supplémentaire, qu'il soit unique ou multiple, en ligne ou délocalisé, demandera fort probablement des activités régulières d'entretien afin d'assurer leur bon fonctionnement et éviter leur ensablement.

Tableau 7.1 : Réduction de l'ensablement dans le réservoir Beaudet par suite de la réduction des pointes de crues – approche « théorique » avec conservation du volume

Scénario de limitation du débit	Réduction du volume de sédiment accumulé dans le réservoir	Réduction du volume de sédiment accumulé dans le réservoir et la zone de refoulement	Volume max. écrété de l'hydrogramme	Volume median écrété de l'hydrogramme
Max. 25 m³/s	44%	27%	43 750 000 m ³ 46x le réservoir Beaudet équiv. à 127 mm de précipitation	6 096 000 m ³ 6,3x le réservoir Beaudet équiv. à 18 mm de précipitation
Max. 65 m³/s	8%	5%	8 856 000 m ³ 9,3x le réservoir Beaudet équiv. à 26 mm de précipitation	2 549 000 m ³ 2,7x le réservoir Beaudet équiv. à 7 mm de précipitation
Max. 85 m³/s	0%	0%	5 400 000 m ³ 5,6x le réservoir Beaudet équiv. à 16 mm de précipitation	1 782 000 m ³ 1,9x le réservoir Beaudet équiv. à 5 mm de précipitation

7.1.2 Approche #2 : Approche « théorique » - Réduction du volume de l'hydrogramme

En deuxième lieu, l'approche « théorique » a été reprise, cette fois en éliminant le volume de crue dépassant un certain débit. Encore une fois, la façon d'obtenir cette réduction de débit n'est pas identifiée, mais l'objectif de l'exercice est de vérifier si de telles mesures pourraient être efficaces pour réduire l'ensablement du réservoir. Les résultats sont présentés au tableau 7.2.

Tel que montré au tableau précédent, la réduction du volume des crues doit être significative afin d'avoir un impact important sur l'ensablement du réservoir Beaudet. Dans tous les cas, le réservoir et sa zone de refoulement continuent de s'ensabler. Ainsi, bien que des mesures de réduction du débit de ruissellement sur le bassin versant peuvent avoir un impact positif sur la réduction du rythme d'ensablement, il semble irréaliste d'envisager que l'utilisation de cette seule solution puisse régler le problème d'ensablement à long terme et éviter le recours au dragage, sans compter les autres effets négatifs de ce type de solution, tel que mentionné plus haut.

Tableau 7.2 : Réduction de l'ensablement dans le réservoir Beaudet par suite de la réduction des pointes de crues – approche « théorique » avec réduction du volume

Scénario de limitation du débit	Réduction du volume de sédiment accumulé dans le réservoir	Réduction du volume de sédiment accumulé dans le réservoir et la zone de refoulement	Volume max. écrêté de l'hydrogramme	Volume median écrêté de l'hydrogramme
Max. 25 m³/s	75%	40%	43 750 000 m ³ 46x le réservoir Beaudet équiv. à 127 mm de précipitation	6 096 000 m ³ 6,3x le réservoir Beaudet équiv. à 18 mm de précipitation
Max. 65 m³/s	19%	12%	8 856 000 m ³ 9,3x le réservoir Beaudet équiv. à 26 mm de précipitation	2 549 000 m ³ 2,7x le réservoir Beaudet équiv. à 7 mm de précipitation
Max. 85 m³/s	8%	6%	5 400 000 m ³ 5,6x le réservoir Beaudet équiv. à 16 mm de précipitation	1 782 000 m ³ 1,9x le réservoir Beaudet équiv. à 5 mm de précipitation

7.1.3 Approche #3 : Construction d'un ouvrage de laminage des crues sur le cours de la rivière Beaudet

Afin de réduire les pointes de crue tel qu'envisagé avec l'approche « théorique » - Conservation du volume de l'hydrogramme, il est nécessaire de créer des zones d'emmagasinement en amont du barrage Beaudet afin de laminer les crues. Puisque cette étude est limitée au cours principal de la rivière Bulstrode, ces zones d'emmagasinement seront créées à l'aide d'un ou de plusieurs seuils, ou barrages, construits à même le cours principal de la rivière. Une autre variante possible aurait été de créer un ouvrage de dérivation et un réservoir « hors ligne », cette variante permettre de réduire les débits de pointes de la même façon en étant toutefois plus complexe à mettre en œuvre.

La solution testée est constituée d'un barrage d'une hauteur de 4,75 m avec un pertuis de 4 mètres de largeur au centre, tel qu'illustré à la figure 7.1. Les résultats du modèle montrent une réduction de l'ensablement du réservoir d'environ 14% et de 16% sur l'ensemble du réservoir et de sa zone de refoulement. Toutefois, ce nouveau barrage crée la déposition d'un volume équivalent à 12% du volume accumulé dans le réservoir et sa zone de refoulement, pour une

réduction d'environ 4% du volume de sédiments déposés sur l'ensemble du modèle. En d'autres mots, la quantité de sédiments qui ne se déposent plus dans le réservoir Beaudet se retrouvent accumulés en amont du nouvel ouvrage.

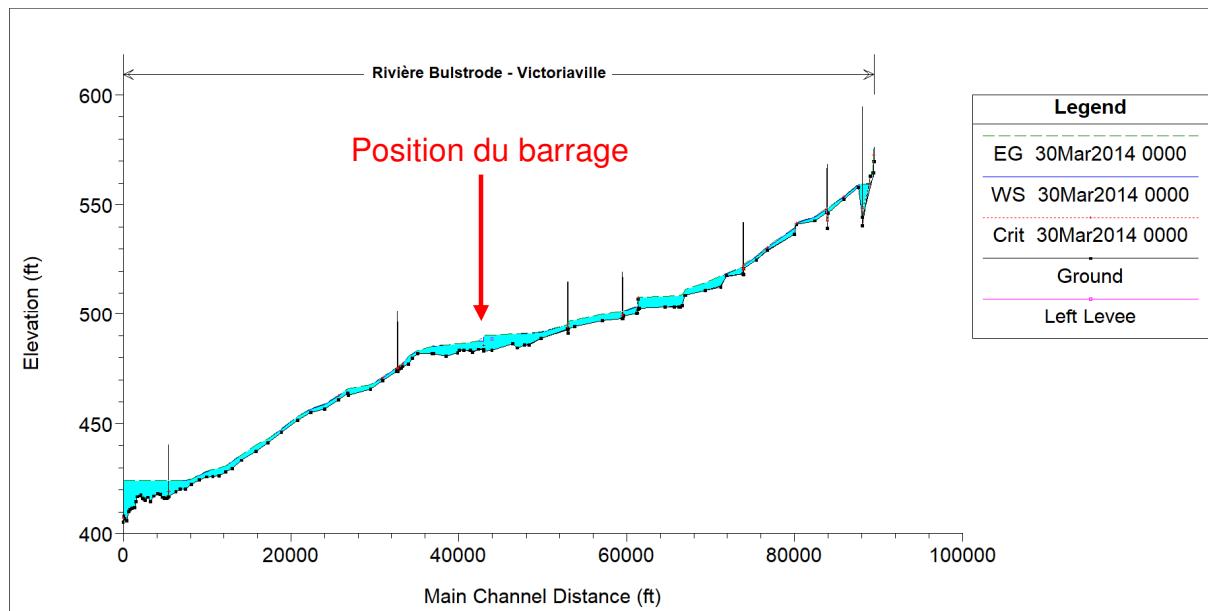


Figure 7.1 : Profil en long de la rivière Bulstrode en amont du barrage Beaudet et localisation du barrage considéré pour la modélisation

7.1.4 Approche #4 : Constructions de « petits » seuils dans le cours de la rivière Beaudet

Au cours de la demande d'autorisation, la construction de seuils en rivière a été identifiée comme moyen de prévention pour réduire l'ensablement du réservoir. L'idée provient essentiellement du fait que les seuils créeront des biefs où la vitesse de l'écoulement sera réduite par rapport aux conditions naturelles, réduisant ainsi l'érosion des tronçons affectés. Ces seuils contribuent également à laminer les pointes de crue. Cette solution a été testée au modèle numérique à l'aide de deux scénarios. Le premier scénario comprend l'ajout de 5 seuils de 2 mètres de hauteur espacés d'environ 1 500 m chacun. Le deuxième scénario comprend l'ajout de 9 seuils de 1 mètres de hauteur espacés d'environ 750 m chacun. Pour ces scénarios, les seuils sont localisés sur l'ensemble de Tr.H.2 et l'aval de Tr.H.3, soit les tronçons les plus vulnérables à l'érosion. Cette modification est faite sans égard à la constructibilité des seuils, car elle vise seulement à identifier le potentiel de cette solution à limiter l'ensablement du réservoir Beaudet. La figure 7.2 présente le profil long de la rivière modifié par l'ajout de 5 seuils et la figure 7.3 présente le profil long de la rivière modifié par l'ajout de 9 seuils.

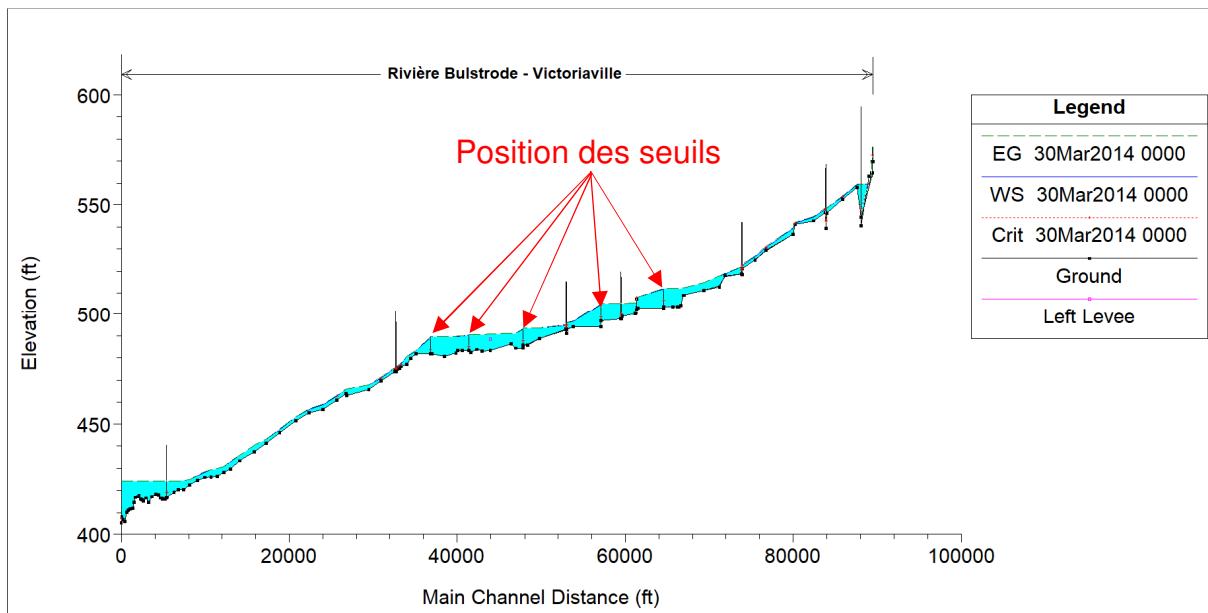


Figure 7.2 : Profil en long de la rivière Bulstrode en amont du barrage Beaudet et localisation des seuils (5) considérés pour la modélisation

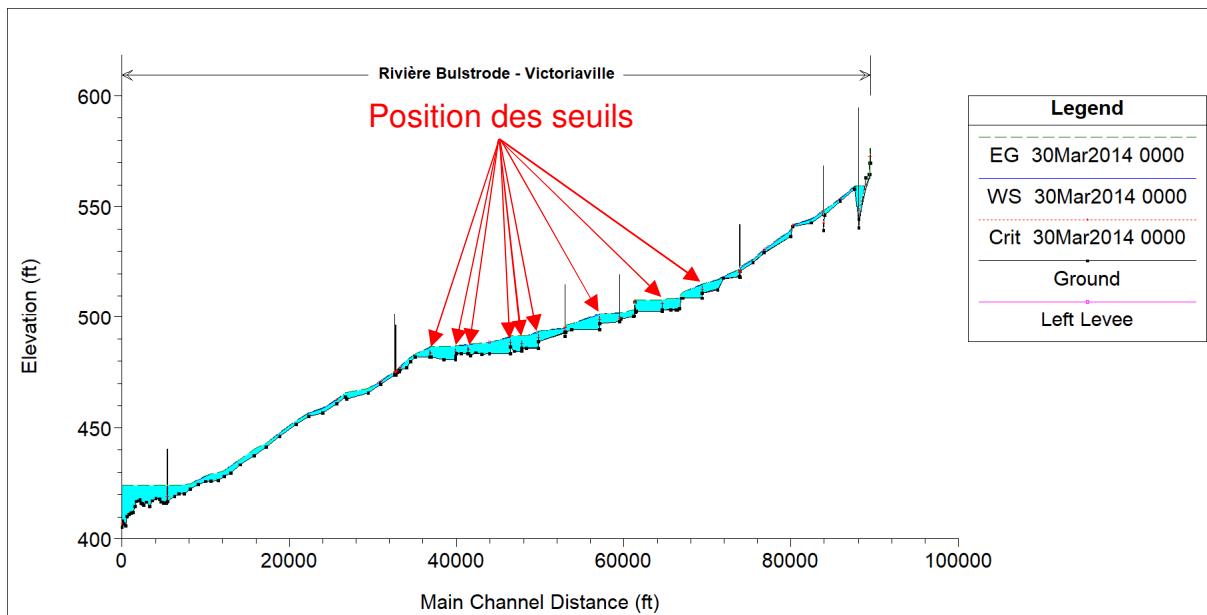


Figure 7.3 : Profil en long de la rivière Bulstrode en amont du barrage Beaudet et localisation des seuils (9) considérés pour la modélisation

Les résultats sur la période étudiée pour le scénario incluant 5 seuils de 2 mètres de hauteur montrent une diminution de l'ensablement du réservoir de l'ordre de 88% et de 80% sur l'ensemble du réservoir et de la zone de refoulement. Les résultats du scénario considérant la mise en place de 9 seuils d'une hauteur de 1 mètre indiquent une réduction de 31 % et de 26 % sur l'ensemble du réservoir et de la zone de refoulement. Toutefois, le réservoir et la zone de refoulement continuent d'accumuler des sédiments. Aussi, soulignons que les zones d'eau où les vitesses sont plus lentes créées par les seuils deviennent elles-mêmes des zones de déposition. Ainsi, sur l'ensemble du modèle, on note une augmentation du volume de sédiments déposés de l'ordre de 6% pour le scénario à 5 seuils et de 46% pour celui considérant 9 seuils. Ainsi, à long

terme, il est probable que la zone de refoulement de chacun de ces seuils s'ensable, réduisant du même coup l'efficacité de cette solution. En résumé, bien que cette solution puisse réduire le rythme de l'ensablement du réservoir, il est peu probable que cette solution soit la plus économique à long terme, puisqu'elle étend le territoire sur lequel le dragage sera éventuellement nécessaire. De plus, ce type de solution aura comme effet d'augmenter la superficie des zones inondables lors de crues de la rivière Bulstrode. À titre d'exemple, pour la crue du 1^{er} avril 2016, les secteurs inondés sont augmentés de 140 % et de 5 % pour les scénarios à respectivement 5 seuils et 9 seuils. Cette variante pourrait peut-être être envisagée si elle présente des avantages significatifs sur d'autres plans non couverts par cette étude (environnement, etc.) et que la constructibilité est démontrée.

7.2 Stabilisation des berges sur le tronçon Tr.H.2

L'option de mise en place de mesure de protection contre l'érosion a été évaluée sur l'ensemble du tronçon Tr.H.2, soit sur 8,7 km, tel que montré à la figure 7.4. Cette option permet de réduire les accumulations dans le réservoir de 60 % et de 50 % sur l'ensemble de la zone de refoulement de l'ouvrage. Le faible impact de cette solution combiné au coût élevé de la réalisation et aux impacts environnementaux probablement très élevés d'un tel ouvrage rend cette solution inenvisageable.

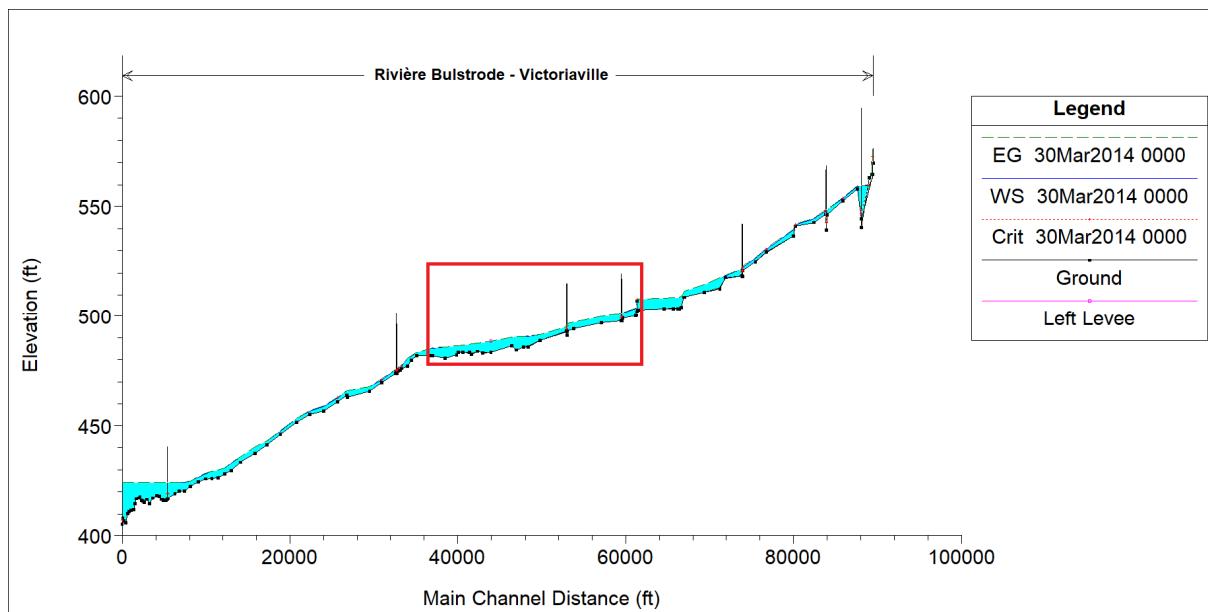


Figure 7.4 : Profil en long de la rivière Bulstrode en amont du barrage Beaudet et localisation (en rouge) du secteur considéré pour la mise en place de protection contre l'érosion

Il est à noter que le coût estimé pour cette option, en considérant un tapis de béton à 60 \$/ m², est de 31 000 000 \$.

7.3 Vidange des sédiments hors crue

Afin de tester l'impact de vidange estivale du réservoir sur l'accumulation de sédiment dans ce dernier, deux scénarios ont été évalués. Le premier étant une vidange de 4 semaines (niveau du réservoir abaissé à 127,5 m) durant l'été, tandis que le deuxième correspond encore une fois à une vidange de 4 semaines, mais en considérant un niveau du réservoir de 126,5 m, ce qui ne respecte pas le critère de niveau minimal pour le bon fonctionnement de la prise d'eau de la ville de Victoriaville. Mentionnons par ailleurs qu'advenant l'efficacité de cette solution, il faudrait prévoir avec soin le moment de la vidange puisque cette opération rend vulnérable l'alimentation en eau de la ville; il faudrait donc procéder à une analyse du risque sur l'alimentations en eau avant d'effectuer de chaque opération.

Pour le premier scénario de vidange estivale de quatre semaines (niveau du réservoir de 127,5 m), le modèle indique une augmentation de 10 % du volume de sédiments accumulés dans le réservoir et de 3% dans la zone de refoulement complète de l'ouvrage. Pour le second scénario, le modèle indique encore une fois une augmentation des accumulations dans le réservoir (8 %), tandis qu'il montre une réduction des accumulations de 2 % dans la zone complète de refoulement de l'ouvrage.

L'analyse des résultats de simulation montrent que ce sont les sédiments accumulés dans la portion de refoulement du réservoir et dans la portion de la rivière Bulstrode juste à l'amont qui, lorsque les niveaux sont abaissés, s'érodent et migrent dans le réservoir. Toutefois, le modèle 1D ne montre pas de vitesses suffisantes qui auraient le potentiel de vidanger le réservoir des sédiments s'y trouvant.

7.4 Éclusage des crues

Afin de tester l'option d'éclusage, trois scénarios ont été évalués afin de tester le potentiel de cette solution :

- + Scénario « optimiste » : rabaissement du niveau du réservoir au niveau minimal d'exploitation (127,5 m) débutant 2 jours avant une pointe de débit supérieure à 10 m³/s et se terminant 2 jours après;
- + Scénario « extrême » : rabaissement du niveau du réservoir à 126,5 m débutant 2 jours avant une pointe de débit supérieure à 10 m³/s et se terminant 2 jours après;
- + Scénario « réaliste » : un rabaissement du niveau du réservoir à 126,5 m débutant lorsque le débit atteint 25 m³/s pour un maximum de 5 jour consécutif. Le critère de 5 jours consécutifs correspond à la capacité approximative de la réserve d'eau planifiée dans le réservoir par la ville de Victoriaville. Il est à noter que l'éclusage a été réalisé seulement lorsque les débits moyens étaient assez élevés pour permettre le remplissage du réservoir à un niveau de 127,5 m la journée suivant la fin de l'opération d'éclusage.

Le premier scénario est appelé « optimiste », car il émet l'hypothèse qu'il est possible de mettre un système de prévision des débits suffisamment performant pour permettre la gestion du réservoir en prévision des crues. Dans ce scénario, la cote minimale pour l'opération de la prise d'eau est respectée. Le deuxième scénario est dit « extrême », car non seulement il requiert le même scénario de débit que le scénario « optimiste », mais il ne respecte pas la cote minimale du réservoir pour l'opération de la prise d'eau et ce, sans limitation de la durée pendant laquelle ce critère n'est pas respecté. Ce scénario est uniquement développé dans le but de comprendre la « limite maximale » de la réduction de l'ensablement à l'aide de l'éclusage des crues. Finalement, le scénario « réaliste » est basé uniquement sur le débit de la rivière et respecte les limitations de la future réserve d'eau brute planifiée par la ville. Il est à noter que toutes ces variantes entraînent des marnages beaucoup plus fréquents et importants qu'actuellement et que l'effet sur les berges ne fait pas partie de la présente étude.

L'impact de l'éclusage au niveau minimal d'exploitation selon le scénario « optimiste » sur les accumulations de sédiments dans le réservoir dans le modèle hydrodynamique consiste en une augmentation de 90 % des accumulations de sédiments dans la zone du réservoir (aval du boulevard Labbé Nord) et une réduction de 20 % d'accumulation de sédiment lorsque l'on considère la zone de refoulement complète du barrage Beaudet. Tout comme le modèle de vidange hors crue, on remarque une migration des sédiments à la tête du réservoir depuis la zone déjaugée vers le réservoir. Toutefois, les vitesses dans le réservoir sont insuffisantes pour permettre le transit des sédiments jusqu'à l'aval du barrage Beaudet.

Pour la seconde option d'éclusage à 126,5 m (1 mètre sous le niveau minimal d'exploitation selon le scénario « extrême »), le modèle indique une perte de 11 000 m³ de sédiments dans le réservoir et de 40 000 m³ si l'on considère la zone de refoulement complète de l'ouvrage. Il est à noter qu'une telle réduction ne respecte pas le critère pour le bon fonctionnement de la prise d'eau et est basé sur une prévisibilité suffisante des apports.

Finalement, le troisième modèle selon le scénario « réaliste » pour la période du 24 juillet 2014 au 24 octobre 2018 indique une augmentation du volume d'accumulation dans le réservoir de 30 000 m³, mais une perte d'environ 40 000 m³ lorsque l'on considère la zone de refoulement et le réservoir. Lorsque le niveau d'eau descend autour de 126,5 m, on observe une forte érosion dans la zone de refoulement du réservoir. La figure 7.5 présente le profil en long du réservoir Beaudet. Les lignes en bleu et orangé présentent le fond de la rivière au début et à la fin de la simulation.

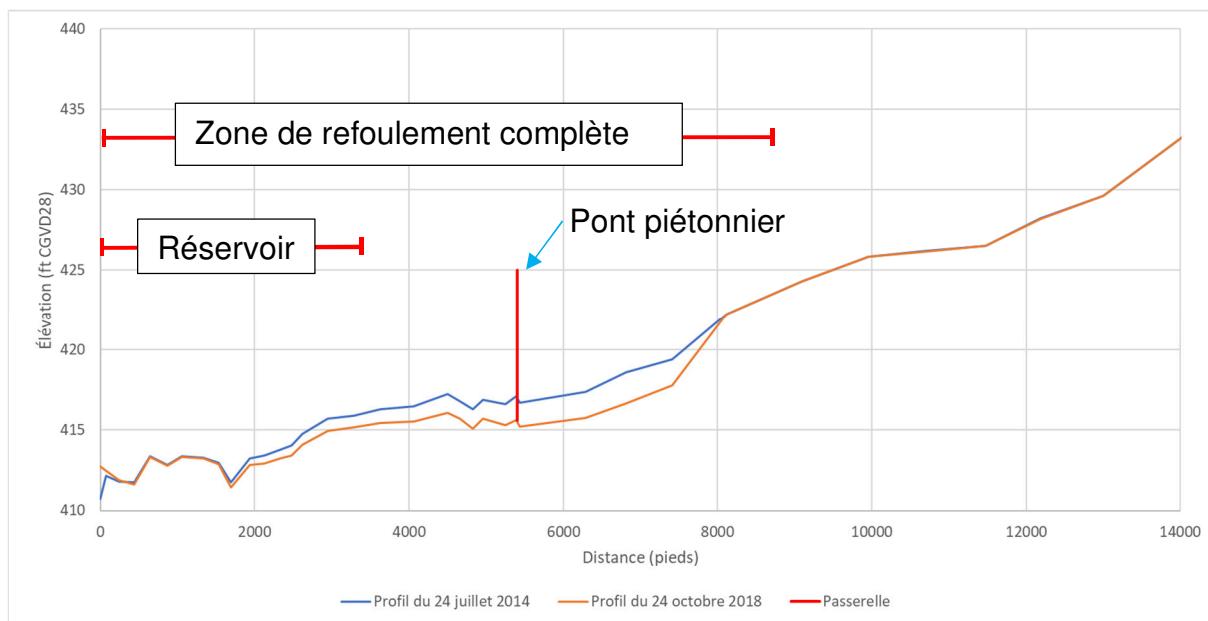


Figure 7.5 : Profil en long du réservoir Beaudet et de la portion aval de la rivière Bulstrode du 24 juillet 2014 et du 24 octobre 2018

7.4.1 Opinions sur la viabilité de ces approches

Différentes solutions ont été testées dans le but de réduire, voire d'éliminer l'ensablement du réservoir Beaudet. Ces solutions peuvent être triées en deux catégories : les solutions implantées en amont dans la rivière Bulstrode et les solutions de modification à la gestion du réservoir.

Les solutions « en amont » visent à limiter les débits de crues pour réduire l'érosion, ou à protéger les berges et le lit de la rivière pour éviter qu'elle ne s'érode. Les résultats obtenus grâce au modèle montrent que le système hydro-sédimentaire de la rivière Bulstrode est très « réactif », puisque le transport sédimentaire devient important lors de faibles crues. Dans ce contexte, les mesures qui doivent être mises en place afin d'obtenir un résultat significatif sur l'ensablement du réservoir Beaudet apparaissent déraisonnables. Il en est de même pour l'envergure de protection contre l'érosion nécessaire.

Mis à part le scénario d'éclusage « extrême » qui requiert des études supplémentaires afin d'en assurer la faisabilité, les solutions touchant la modification de la gestion du réservoir Beaudet se sont avérées inefficaces, principalement à cause de la présence d'une grande quantité de sédiments déposés dans la zone de refoulement et la partie amont du réservoir. En effet, tel qu'expliqué plus haut, cette partie du réservoir est la première zone de déposition des sédiments qui entrent dans le réservoir. Puis, les sédiments suivants migrent un peu plus vers l'aval, créant ainsi le delta sablonneux observé. Lors de l'abaissement du réservoir, les vitesses d'écoulement sont augmentées dans la zone de refoulement et ces sédiments sont remis en suspension. Les vitesses dans le réservoir sont toutefois trop faibles pour permettre à ces sédiments d'être évacués et ils se déposent dans la zone du réservoir. Ainsi, on peut voir la zone de refoulement comme un réservoir de sédiments qui a le potentiel de migrer vers le réservoir si les niveaux d'eau sont abaissés. Le dragage de la zone de refoulement pourrait donc être envisagé afin de réduire les impacts négatifs de ce type de variantes. Les impacts des solutions modifiant le mode de gestion du réservoir devront également être étudiés en détail avant que ce type de solution puisse être implanté. Les impacts appréhendés à long terme sont lié à une modification des patrons de sédimentations qui pourrait créer une augmentation des risques de colmatage de la prise d'eau, une augmentation de la turbidité lors du remplissage du réservoir (conséquemment des problématiques liés au traitement de l'eau) et finalement une réduction des volumes d'eau disponibles.

Les mesures étudiées dans ces études visaient principalement l'objectif de réduire de façon significative l'ensablement du réservoir Bulstrode, avec à l'esprit que ces mesures puissent permettre d'éviter le recours au dragage. Dans cette optique, les mesures étudiées se sont avérées inefficaces. Toutefois, notons que la présente étude n'est pas exhaustive et que certaines variantes similaires, mais de moindre envergure, pourraient éventuellement s'avérer intéressantes en combinaison avec la solution de dragage. Lors de l'analyse de ces variantes, il faudra toutefois prendre en compte plusieurs autres paramètres que la dynamique sédimentaire, tel que l'environnement, l'économie, l'utilisation des sols, la modification du risque d'inondation, etc.

8. Conclusions et recommandations

Dans le cadre du projet de restauration du réservoir Beaudet pour assurer l'alimentation en eau potable de la ville de Victoriaville, la ville et l'organisme de bassin versant COPERNIC cherchent à évaluer différentes stratégies d'intervention « durables » sur le bassin versant qui permettraient de limiter, voire éliminer, la nécessité de recourir à des méthodes d'interventions dites « non définitives », i.e. qui des méthodes d'interventions qui requièrent d'être reproduites au fil du temps afin d'être efficaces. Les prémisses de cette étude identifient déjà les stratégies « durables » comme étant la réduction du transport sédimentaire à sa source même par des méthodes souvent employées en milieu urbain ou agricole, soit par la rétention du débit de ruissellement afin de réduire les pointes de crues, ou le captage des sédiments afin d'en éviter le transport. Une autre famille de solutions visant à faciliter le transit des sédiments dans le réservoir Beaudet par la modification des règles de gestion du barrage a également été considérée.

Afin d'évaluer l'efficacité de ces stratégies à réduire ou éliminer l'ensablement du réservoir Beaudet, CIMA+ a tout d'abord réalisé un modèle de la dynamique sédimentaire de la rivière Bulstrode, entre les barrages Beaudet et Sainte-Sophie. Cette modélisation est basée sur de multiples études préalables et sources de données, telles que les données LiDAR, des photographies aériennes, un relevé bathymétrique du tronçon à l'étude, de nombreuses sources de données hydrométriques, les données historiques du niveau d'eau dans le réservoir Beaudet, le plan de gestion du barrage, etc. Une campagne de relevés géotechniques ainsi qu'une campagne de relevés photographiques par drone ont également été réalisées afin de permettre de caractériser la nature des matériaux sur l'ensemble des berges et du lit de la rivière du tronçon à l'étude.

La première étape de l'analyse de la dynamique sédimentaire est l'analyse des données issues de la caractérisation des berges et de la photo-interprétation. Les principales conclusions de ces études sont les suivantes :

- + Le tronçon Tr.H.2 est un tronçon à méandres présentant plusieurs foyers d'érosion, des sections de berge instables et un grand potentiel de mobilité;
- + Selon les observations sur le terrain, il semble que la majorité des sédiments accumulés dans le réservoir Beaudet proviennent probablement de l'érosion des berges des secteurs Tr.H.2 et Tr.H.3;
- + Un dépôt sableux important est présent dans la zone amont du réservoir et sa zone de refoulement. Ce dépôt sableux s'apparente à un delta, une formation géologique commune retrouvée à l'embouchure d'une rivière lorsque celle-ci se jette dans un plan d'eau horizontal. À l'aval du delta, les sédiments déposés dans le réservoir sont plus fins.

Par la suite, un modèle de la dynamique sédimentaire a été créé à l'aide du logiciel HEC-RAS. Ce modèle a été calibré sur les données d'ensablement du réservoir et sur les données mesures en continu de sédiments en suspension dans la rivière Beaudet. Les principales observations faites à partir de la calibration de ce modèle sont les suivantes :

- +
- Le modèle reproduit assez fidèlement les volumes de sédiments transportés par la rivière Beaudet. Cela indique que l'apport en sédiments des berges et du lit de la rivière pourrait être la principale source de sédiments retrouvés dans le réservoir Beaudet;
- +
- L'analyse de sensibilité sur l'injection de sédiments en provenance des tributaires montrent qu'ils ont un impact mineur sur l'ensablement du réservoir Beaudet, probablement parce que d'une part, leur volume est inférieur à celui généré par le cours principal de la Bulstrode et parce que d'autre part, la quantité de sédiments en suspension à l'endroit où se jettent ces tributaires est proche de la capacité maximale de transport de la rivière.

Finalement, différentes stratégies pour limiter l'ensablement du réservoir Beaudet ont été testées au modèle. La première famille de solutions consiste en la réduction des débits de crue ou la captation des sédiments. Cette famille de solutions s'est avérée peu efficace parce que :

- +
- La taille des sédiments présents et la pente de la rivière font en sorte que le transport sédimentaire dans la rivière Bulstrode débute pour des crues de faible importance. Ainsi, pour que ces solutions soient efficaces, il faudrait retenir de très grands volumes d'eau (plusieurs fois le volume du réservoir Beaudet), ce qui apparaît déraisonnable;
- +
- La quantité d'eau retenue est telle que la solution a probablement de grands impacts environnementaux sur l'ensemble de la rivière Bulstrode, voire même de la rivière Nicolet;
- +
- Malgré la construction d'ouvrages d'importance, le réservoir continue de s'ensabler, mais à un rythme moins rapide. Bref, malgré des investissements majeurs, la solution n'est pas entièrement durable;
- +
- L'ajout de protection contre l'érosion sur plusieurs kilomètres de rivière ne permet pas d'éliminer l'ensablement du réservoir Beaudet.

Pour ce qui est de la modification du mode de gestion du réservoir Beaudet, cette famille de solutions a montré un certain potentiel intéressant. Toutefois, la zone deltaïque sablonneuse localisée dans la zone de refoulement du réservoir probablement formée depuis la création du réservoir représente un enjeu important. Lors de l'abaissement des niveaux d'eau dans le réservoir nécessaire à la création de vitesses pour le transit sédimentaire, des vitesses importantes sont créées dans cette zone et les sédiments s'y trouvant sont transportés plus à l'aval dans le réservoir. Ainsi, sans le dragage préalable de cette zone, il serait difficile d'obtenir des résultats efficaces.

En conclusion, il nous apparaît que le transport sédimentaire dans la rivière Bulstrode soit un processus naturel d'envergure. Ainsi, l'application de méthodes similaires à celles utilisées pour réduire l'impact sur l'intensité du ruissellement et le transport sédimentaire additionnel créé par les modifications anthropiques de plus petite envergure nécessaires à l'aménagement du territoire semble être inefficace pour permettre d'éliminer de façon durable l'ensablement du réservoir Beaudet. Toutefois, certaines mesures simples, tel que l'éclusage des crues par le barrage, ont le potentiel de réduire le rythme d'ensablement du réservoir, à condition que des travaux préalables soient effectués pour excaver les sédiments accumulés dans la partie amont du réservoir.

Références

- [1] Débits aux stations hydrométriques 030106, 030118 et 030110 appartenant au centre d'expertise hydrique du Québec. MELCC.
- [2] Caractérisation des sédiments du lit et des berges de la rivière Bulstrode, Ville de Victoriaville, CIMA+, décembre 2019.
- [3] Rapport d'essais laboratoire, Caractérisation des berges, Protekna, Octobre 2019.
- [4] Relevé des structures, relevés topographique et bathymétrique, mesures de vitesse du barrage St-Sophie au réservoir Beaudet et relevé de la ligne d'eau, CIMA+, 29 août 2019.
- [5] Rapport technique intérimaire, Suivi hydrométrique du bassin versant de la rivière Bulstrode, IRDA, Copernic, 9 août 2019.
- [6] Relevés bathymétriques 2019, Restauration du réservoir Beaudet. E2010-01. Les Services EXP inc, décembre 2019.
- [7] Tableau opération au barrage Beaudet 2006-2019, Ville de Victoriaville, reçu le 25 octobre 2019.
- [8] Tableau opération au barrage Beaudet de la journée du 1^{er} novembre 2019, Ville de Victoriaville, reçu le 26 novembre 2019.
- [9] Modèle numérique de terrain de la rivière Bulstrode. Université Concordia, reçu en septembre 2019.
- [10] Sommaire du plan de gestion des eaux retenues, Barrage Beaudet, X0002206, Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Luttre contre les changements climatiques, Mars 2018.
- [11] Sources de sédiments dans un réservoir d'eau potable par la technique de traçage de sédiments, Mémoire, Christina Lachance, Maîtrise en génie des eaux, 2017.
- [12] Résultats du programme de caractérisation de la rivière Bulstrode et du réservoir Beaudet pour 2013, MCR Procédés et technologies, Décembre 2014.
- [13] Caractérisation des sédiments, réservoir Beaudet, Les Laboratoires Shermont inc., 9 avril 2004.
- [14] Dessin culée droite vue en plan, Rivière Bulstrode, Barrage à Victoriaville comté d'Arthabaska, Ministère des richesses naturelles, direction générale des eaux, Plan B-773013-R.
- [15] Dessin élévations amont et aval section des vannes, Rivière Bulstrode, Barrage à Victoriaville comté d'Arthabaska, Ministère des richesses naturelles, direction générale des eaux, Plan B-773014-R.
- [16] Béton : culées et pilier – élévations, Rivière Bulstrode, Barrage à Victoriaville comté d'Arthabaska, Ministère des richesses naturelles, direction générale des eaux, Plan B-773015-R.
- [17] Topographique du réservoir, Rivière Bulstrode, Barrage à Victoriaville comté d'Arthabaska, Ministère des richesses naturelles, direction générale des eaux, Plan B-77301-A
- [18] Fiche technique du barrage X0001903, Direction de la sécurité des barrages, MDDELCC, consulté le 16 décembre 2019.
- [19] Fiche technique du barrage X2059128, Direction de la sécurité des barrages, MDDELCC, consulté le 16 décembre 2019.

-
- [20] Fiche technique du barrage X0002206, Direction de la sécurité des barrages, MDDELCC, consulté le 16 décembre 2019.
 - [21] Analyse hydrogéomorphologique du bassin versant de la rivière Bulstrode. Rapport final. Rapport présenté à l'Organisme de concertation pour l'eau des bassins versants de la rivière Nicolet (COPERNIC). Université Concordia. Janvier 2020
 - [22] SMITH, C. D. *Hydraulic structures*. Université de Saskatchewan, 1995
 - [23] Étude hydrologique et de sécurité des digues de retenues des eaux 0-20 ans. Rapport technique final réalisé pour COPERNIC. Idée-eau Environnement. 10 pages. 2017.
 - [24] Étude hydrologique. Rapport sectoriel. Étude d'évaluation de la sécurité du barrage Beaudet X0002206. MELCC. Février 2016.
 - [25] Étude d'impact sur l'environnement. Rapport principal. Groupe HBA Experts-Conseils s.e.n.c.
 - [26] Étude de restauration du réservoir Beaudet. Rapport final préliminaire. Lemay+DDA.
 - [27] Études d'avant-projet définitif. Restauration du réservoir Beaudet. Les Services EXP inc, novembre 2018.
 - [28] Relevés bathymétriques 2019, Restauration du réservoir Les Services EXP inc. juillet 2019.
 - [29] Hydraulique fluviale, volume 16. Ecoulement et phénomène de transport dans les canaux à géométrie simple. Traité de génie civil. École polytechnique fédérale de Lausanne. 2001

A

Annexe A Caractérisation des sédiments de la rivière Bulstrode

Organisme du bassin versant COPERNIC

Caractérisation sédimentaire du lit et des berges de la rivière Bulstrode



Numéro de projet CIMA+ : HS00233
Décembre 2019

Organisme du bassin versant COPERNIC

Caractérisation sédimentaire du lit et des berges de la rivière Bulstrode

Préparé par :

Guillaume Lapointe ing.
Nº de membre O.I.Q. : 5025681

Vérifié par :

François Saint-Pierre, ing., Ph. D.
Nº de membre O.I.Q. : 137123



740, Notre-Dame Ouest, bureau 900, Montréal, QC
Canada H3C 3X6

Numéro de projet CIMA+ : HS00233
Mars 2020

REGISTRE DES RÉVISIONS ET ÉMISSIONS

N° de révision	Révisé par	Date	Description de la modification et/ou de l'émission
00	GL	2020-03-27	Rapport final

Propriété et confidentialité

« À moins d'entente entre CIMA+ s.e.n.c. et son client à l'effet contraire, tous les documents, qu'ils soient imprimés ou électroniques, ainsi que tous les droits de propriété intellectuelle qui y sont contenus, appartiennent exclusivement à CIMA+ s.e.n.c., laquelle réserve tous ses droits d'auteur. Toute utilisation ou reproduction sous quelque forme que ce soit, même partielle, est strictement interdite à moins d'obtenir l'autorisation de CIMA+ s.e.n.c. »

Table des matières

1.	Introduction	1
2.	Mise en contexte	2
3.	Méthodologie.....	3
3.1	Relevé de drone.....	3
3.2	Chaînage	3
3.3	Travaux sur le terrain	3
3.4	Travaux de laboratoire	5
4.	Résultats.....	6
4.1	Observation générale	6
4.2	Granulométrie du fond et berges de rivière	6

Liste des tableaux

Tableau 1 : Coordonnées de échantillons.....	4
Tableau 2 : Nature des sols	7
Tableau 3 : Granulométries des échantillons	8

Liste des figures

Figure 1 : Tronçon de la rivière Bulstrode à l'étude.....	2
---	---

Liste des annexes

Annexe A Plans de caractérisation des sédiments	
Annexe B Courbes granulométriques	

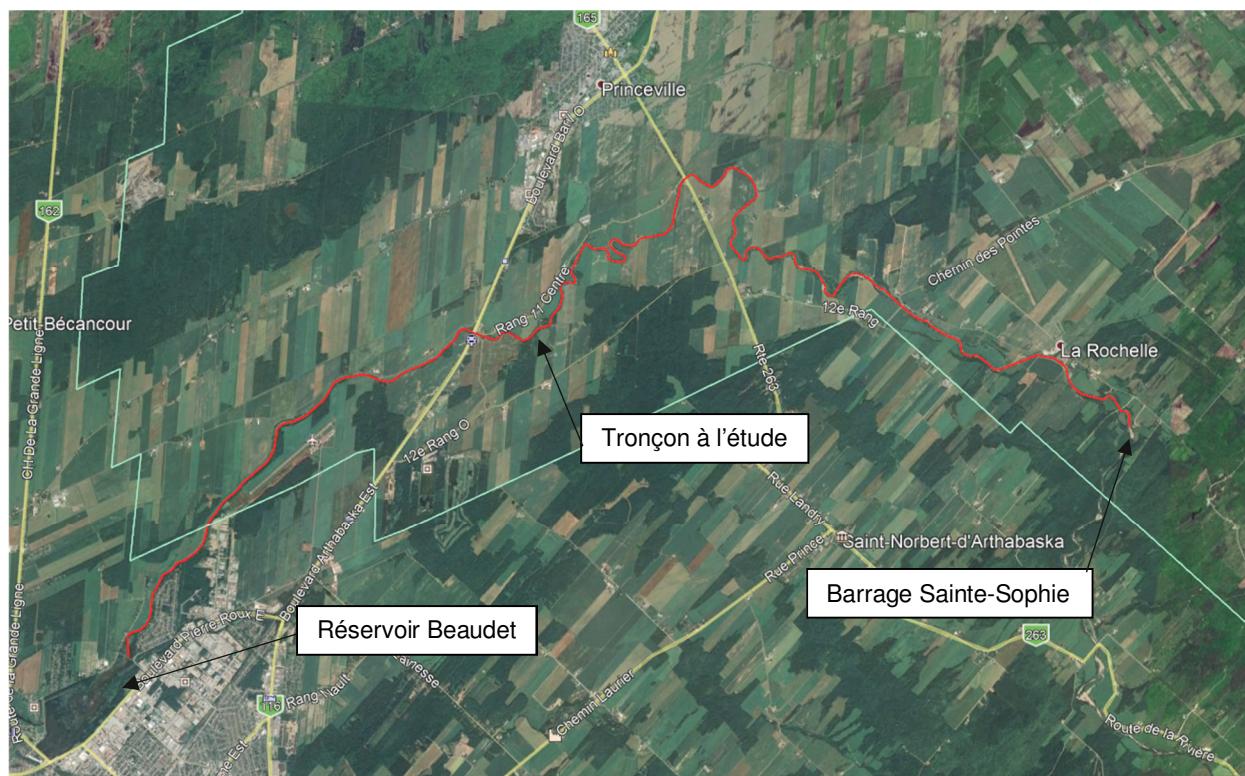
1. Introduction

L'organisme du bassin versant COPERNIC a retenu les services de CIMA+ afin d'effectuer des relevés hydrométriques et la caractérisation des berges de la rivière Bulstrode sur un tronçon d'environ 26 kilomètres. Dans le cadre de ce mandat, une investigation pédologique a été nécessaire afin de caractériser la composition des sédiments des berges et du lit de la rivière. L'objectif de la présente étude était de délimiter les différentes zones sédimentologiques de la rivière en utilisant un relevé par drone, échantillonner des sédiments le long de la rivière et présenter les résultats des analyses granulométriques réalisées sur ceux-ci.

2. Mise en contexte

La ville de Victoriaville puise son eau brute dans le réservoir Beaudet qui est par la suite acheminé à l'usine de traitement d'eau potable. Depuis plusieurs années, la ville observe de l'ensablement du réservoir qui réduit graduellement le volume d'eau disponible pour l'usine, ce qui compromet l'approvisionnement d'eau en période d'étiage. Par conséquent, la Ville désire trouver des solutions afin de réduire la quantité de sédiments dans le bassin. La présente étude s'inscrit dans ce contexte. Cette analyse est limitée entre le barrage Beaudet et le barrage de Sainte-Sophie située à environ 26 kilomètres en amont. La localisation du tronçon à l'étude est montrée sur le figure suivante.

Figure 1 : Tronçon de la rivière Bulstrode à l'étude.



3. Méthodologie

3.1 Relevé par drone

Un relevé par drone a été effectué par CIMA+ au courant de l'été 2019, ce qui a permis de prendre des photos en haute définition sur tout le tronçon de rivière à l'étude. Les analyses des photos ont permis de déterminer visuellement la limite entre les différentes zones de dépôt sédimentaire de tout le tronçon à l'étude. Le plan de caractérisation des sédiments de l'annexe A montre les différents secteurs identifiés. Les relevés sont disponibles aux liens suivants (consultation en mars 2020):

Section 1 :

<https://cloud.pix4d.com/pro/project/525866/model?shareToken=eeb097a5-1c38-45a1-86a1-5095b2ced2be>

Section 2:

<https://cloud.pix4d.com/pro/project/533764/model?shareToken=f87fa9a0-ba8c-4c85-b7a6-f5e71bc85978>

Section 3:

<https://cloud.pix4d.com/pro/project/535476/model?shareToken=c83189bb-39f1-441b-aa3e-e98944696717>

3.2 Chaînage

Un chaînage a été établi tout le long du tronçon pour bien définir la position de chacun des secteurs de composition différente. Le début du tronçon, identifié 0+000 correspond à l'intersection de la rivière Bulstrode et la passerelle du réservoir Beaudet à Victoriaville. La ligne de chaînage a été placée au centre de la rivière et remonte la rivière en amont jusqu'au chaînage final de la caractérisation, situé à 26+000. Tous les chaînages sont en mètres. Par exemple, le chaînage 7+300 correspond à 7 300 mètres.

3.3 Travaux sur le terrain

Les travaux sur le terrain ont été effectués au courant du mois d'octobre 2019. Ces travaux avaient comme but de compléter l'identification de la nature des sédiments du lit et des berges de la rivière ainsi que de prélever des échantillons jugés représentatifs de la composition des sédiments en place à plusieurs emplacements tout au long du tronçon.

La caractérisation des berges n'a pu être effectuée qu'aux emplacements accessibles par les routes ou chemins en place, ainsi que par les terrains privés où l'accès nous a été accordé. Une fois la rivière atteinte, nous avons privilégié un échantillonnage dans le lit de la rivière non submergé afin d'éviter la perte de particules fines lors d'un échantillonnage effectué sous l'eau. Toutefois, dans certains secteurs où l'eau de la rivière submergeait tout le lit de la rivière, l'échantillonnage sous l'eau était inévitable. Dans ce cas, l'échantillonnage a été effectué avec le plus grand soin pour éviter le remaniement et le lavage des sols lors de sa sortie de l'eau. Dans tous les cas, l'échantillonnage n'a été effectué que dans les secteurs jugés sécuritaires.

Tous les échantillons ont été prélevés à l'aide d'une truelle à jardinage. La quantité de sédiments prélevés était d'environ 2 kilogrammes pour les échantillons sableux et silteux et pouvait atteindre environ 5 kilogrammes pour les échantillons contenant du gravier et des cailloux. Certains secteurs de la rivière avaient un lit composé majoritairement de cailloux. Dans ce cas, un échantillonnage représentatif aurait nécessité un volume considérable ce qui aurait été difficilement transportable. Dans ce cas, l'évaluation de la granulométrie des cailloux a été effectuée directement en place à l'aide d'un ruban à mesurer et la proportion de chacun des diamètres a été évaluée visuellement.

Bien qu'il ait été visé d'effectuer un échantillonnage le plus représentatif possible, il en demeure que celle-ci a été régie par l'accessibilité des berges et du lit. Entre autres, dans les méandres de la rivière l'accessibilité n'était souvent possible que du côté intérieur de ceux-ci puisque le côté extérieur présentait une pente quasi/sub verticale causée par l'érosion des berges.

La localisation des échantillons prélevés a été effectuée à l'aide d'un GPS de poche d'une précision d'environ 3 mètres lorsque les conditions de réception étaient bonnes. Le tableau 1 indique les coordonnées approximatives des échantillons prélevés sur tout le tronçon de la rivière.

Tableau 1 : Coordonnées de échantillons

Échantillon	Coordonnées (MTM, zone 7)	
	X	Y
EM-1	191768	5105701
EM-2	191763	5105969
EM-3	195782	5110357
EM-4	198154	5111895
EM-5	198662	5112521
EM-6	198702	5112516
EM-7	198675	5112527
EM-8	198825	5112550
EM-9	198825	5112553
EM-10	198825	5112552
EM-11	198888	5112410
EM-12	199118	5112410
EM-13	199012	5112459
EM-14	199012	5112458
EM-15	198947	5112503
EM-16	198868	5112584
EM-17	198867	5112584
EM-18	199062	5112637
EM-19	199906	5113608
EM-20	200241	5113657
EM-21	200469	5113609
EM-22	200946	5113310

EM-23	200804	5112841
EM-24	203049	5112279
EM-25	202830	5112371
EM-26	202298	5112107
EM-27	203703	5111805
EM-28	203741	5111758
EM-29	206995	5110635
EM-30	207245	5110127
EM-31	207190	5110284
EM-32	207163	5110368

3.4 Travaux de laboratoire

Tous les échantillons de sol recueillis lors des forages ont été acheminés à notre bureau suite aux travaux sur le terrain. Par la suite, parmi l'ensemble des échantillons de sols prélevés, 24 de ceux-ci ont été retenus afin d'y effectuer des analyses granulométriques par tamisage (LC 21-040), dont quatre complétée par sédimentation (BNQ 2501-025/2013).

Les résultats de ces essais et analyses sont présentés à l'Annexe B. Les échantillons non analysés seront conservés pour une période de six (6) mois à partir de la date d'émission de ce rapport, après quoi ils seront détruits à moins d'avis contraire de la part du client.

4. Résultats

4.1 Observation générale

La caractérisation des sédiments de la rivière Bulstrode a permis d'observer plusieurs tronçons relativement homogènes et répartis sur un bief d'environ 26 kilomètres étudié. Les sédiments observés dans le fond de la rivière étaient généralement composés de particules de sable grossier, de gravier et de cailloux sur des proportions variables et lorsque la rivière ne s'écoulait pas directement sur le socle rocheux. Ces particules étaient généralement bien imbriquées ensemble laissant une couche de bonne compacité apparente. Les sédiments à proximité du réservoir Beaudet (chaînage 0+000 à 0+700) étaient toutefois de granulométrie plus fine, soit composés de sable et de silt, avec une compacité apparente plus lâche.

Les berges de la rivière étaient généralement composées d'une paroi rocheuse dans divers secteurs ou ne présentaient majoritairement pas de signes d'érosion active. On note toutefois deux secteurs où de l'érosion active a été observée. Le premier se situe entre les chaînages 9+200 et 13+200. À cet emplacement, la rivière circule en méandre et on observe dans les parois extérieures de ceux-ci une érosion active laissant une paroi de berge relativement à quasi subverticale. La composition des sols au droit des secteurs érodés montre soit un dépôt sableux, soit un dépôt silteux ou soit une superposition de ces deux dépôts. Dans tous les cas, la granulométrie observée était beaucoup plus fine que celle observée directement dans le lit de la rivière du même secteur, et pouvait être d'une granulométrie similaire à celle observée sur le tronçon situé à proximité du réservoir Beaudet. Un deuxième secteur présentait des signes d'érosion plus ou moins active et se situait entre les chaînages 14+300 à 19+600. La composition des berges dans ce secteur était majoritairement de nature sableuse, mais demeure parfois imprécise compte tenu de la difficulté à atteindre les berges érodées de ce secteur.

En conclusion, selon nos observations, il semble que la majorité des sédiments cumulés dans le réservoir Beaudet provienne probablement de l'érosion des berges du secteur entre les chaînages 9+200 et 13+200, mais également entre les chaînages 14+300 à 19+600.

4.2 Granulométrie du fond et des berges de rivière

Suite aux analyses granulométriques, il a été possible de déterminer la granulométrie des sédiments des différents tronçons homogènes. Ces tronçons ont été identifiés à l'aide du relevé par drone ainsi que lors de notre visite sur le site. La nature des sols composant le fond de la rivière et des berges est présentée dans le tableau 2 en fonction des chaînages.

Lorsque les granulométries associées au secteur correspondent à la nomenclature EM-X, cela signifie que les données proviennent d'une analyse granulométrie effectuée sur un échantillon de sédiments. Lorsqu'il s'agit de V-X, cela signifie que la granulométrie a été déterminée visuellement sur place. Enfin, lorsque le terme Roc est employé, cela signifie que l'écoulement de la rivière se faisait directement sur le socle rocheux.

Il est à noter que les échantillons prélevés ne représentent que la granulométrie des sols à un point précis et que celle-ci peut varier selon les secteurs. Les différentes zones représentent donc une généralisation basée sur des informations ponctuelles qui peuvent ne pas être représentatifs de la granulométrie des sols sur tout le tronçon considéré.

Tableau 2 : Nature des sols

Zone	Chaînage		Fond de rivière		Berges de la rivière	
	de	à	Nature des sols	Granulométrie associée	Nature des sols	Granulométrie associée
1	0+000	0+700	Sable et silt, un peu de gravier	EM-1	Sable et silt, un peu de gravier	EM1*
2	0+700	1+500	Roc en surface	Roc	Roc	Roc
	1+500	2+300	Roc en surface avec cailloux	Roc	Roc	Roc
	2+300	6+500	Roc en surface	Roc	Roc	Roc
3	6+500	7+300	Sable graveleux	EM3	Roc	Roc
4	7+300	9+200	Roc en surface	Roc	Roc	Roc
5	9+200	10+800	Cailloux et gravier	V-1	Sable silteux	EM4
6	10+800	11+400	Gravier sableux probable	EM6*	Sable, un peu de silt	EM7*
	11+400	11+700	Gravier sableux	EM6	Sable, un peu de silt/Silt sableux	EM7/EM10**
7	11+700	12+000	Gravier et sable	EM11	Sable, un peu de silt/Silt sableux	EM7/EM10**
8	12+000	12+700	Gravier sableux	EM15	Silt sableux	EM13
9	12+700	13+200	Sable	EM18	Silt sableux	EM13*
10	13+200	13+700	Roc en surface	Roc	Roc	Roc
11	13+700	14+000	Gravier et cailloux	V-2	Roc	Roc
12	14+000	14+300	Roc en surface	Roc	Roc	Roc
13	14+300	14+500	Sable fin, un peu de silt	EM19	Sable fin, un peu de silt	EM21*
14	14+500	15+000	Sable graveleux	EM20	Sable fin, un peu de silt	EM21*
15	15+000	15+200	Cailloux et blocs avec sable dessus	V-2	Sable fin, un peu de silt	EM21
16	15+200	16+200	Cailloux et blocs avec sable dessus	V-2	Sable fin, un peu de silt	EM21*
17	16+200	16+500	Gravier sableux, un peu de cailloux	EM22	Sable fin, un peu de silt	EM21*
18	16+500	17+000	Sable et gravier, un peu de cailloux	EM23	Sable fin, un peu de silt	EM21*
19	17+000	17+900	Gravier sableux probable	EM-26*	Sable fin, un peu de silt	EM21*
	17+900	19+600	Gravier sableux, un peu de cailloux	EM26	Sable fin, un peu de silt	EM21*
20	19+600	20+050	Sable et gravier	EM25	Roc	Roc
21	20+050	20+200	Roc en surface	Roc	Roc	Roc
22	20+200	20+300	Gravier et sable	EM24	Roc	Roc
23	20+300	20+800	Gravier et cailloux	V-3	Roc	Roc
24	20+800	21+000	Roc en surface	Roc	Roc	Roc
25	21+000	23+400	Gravier, un peu de sable et cailloux	EM27	Sable silteux	EM28
26	23+400	25+000	Roc en surface avec cailloux/blocs	Roc	Cailloux et gravier	V-2*
27	25+000	25+150	Sable, traces de silt	EM29	Roc	Roc
28	25+150	25+300	Roc en surface	Roc	Roc	Roc
29	25+200	25+530	Sable et gravier	EM32	Roc	Roc
30	25+530	25+700	Gravier, un peu de sable et cailloux	EM31	Gravier, un peu de sable et cailloux	EM31*
31	25+700	26+000	Sable graveleux	EM30	Sable graveleux	EM30*

* Estimé

** Superposition de deux couches

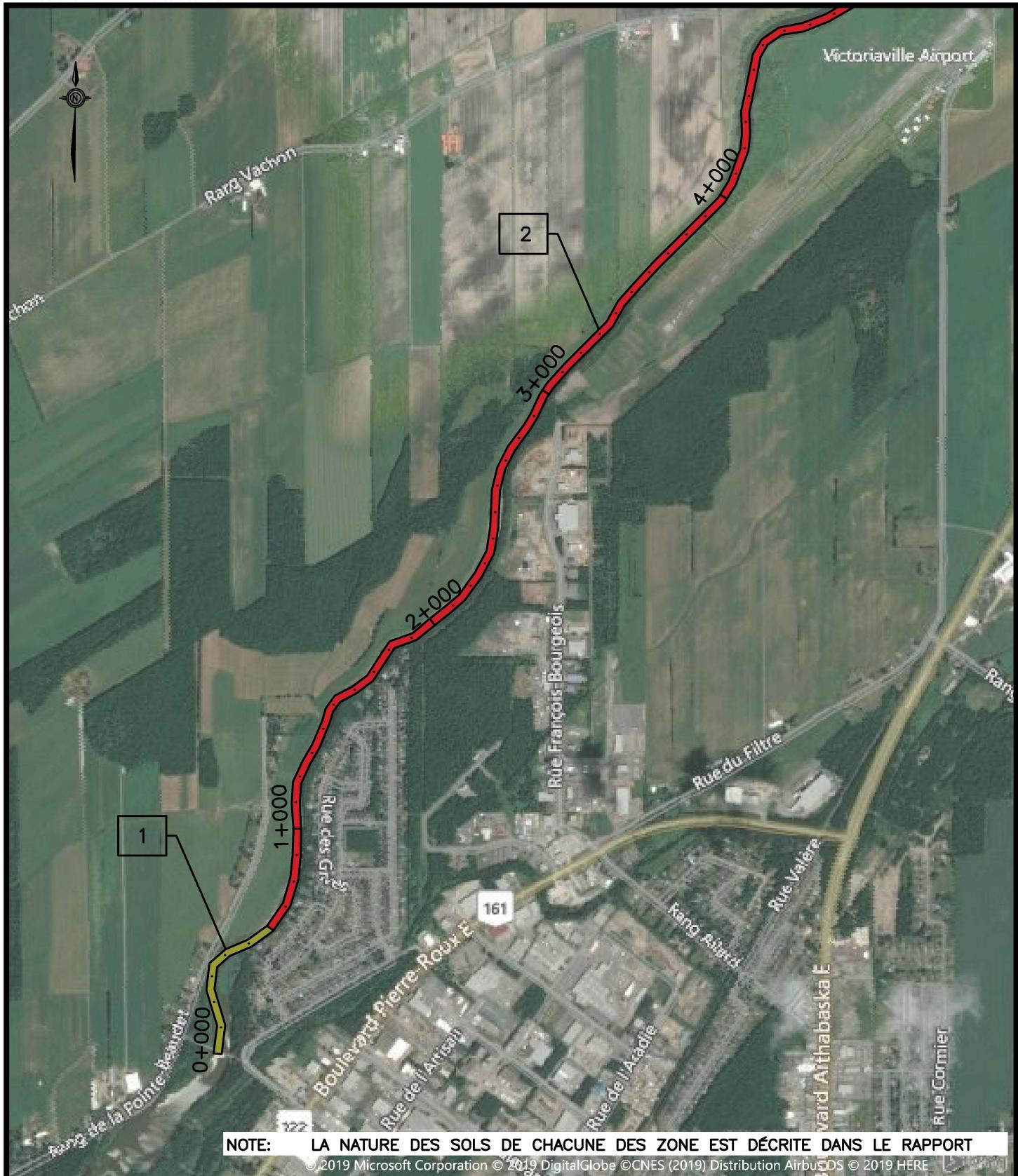
Le tableau 3 ci-bas présente la granulométrie associée à chacun des échantillons analysés en laboratoire. Les granulométries indiquent le pourcentage en poids de chacun des intervalles de diamètre de particules, lesquels sont requis pour une modélisation avec le logiciel HEC-RAS.

Tableau 3 : Granulométries des échantillons

Classe	Diam (mm)	Pourcentage (%)																										
		EM-1	EM-3	EM-4	EM-6	EM-7	EM-10	EM-11	EM-13	EM-15	EM-18	EM-19	EM-20	EM-21	EM-22	EM-23	EM-24	EM-25	EM-26	EM-27	EM-28	EM-29	EM-30	EM-31	EM-32	V-1	V-2	V-3
Clay	0.002-0.004	5					9		8											12								
VFM	0.004-0.008	5					7		5												6							
FM	0.008-0.016	7		3			8		9												10							
MM	0.016-0.032	9		6			7		8												11							
CM	0.032-0.0625	7		13		12	17		13			8		16			3				14							
VFS	0.0625-0.125	11	1	24	2	24	26		23	1	1	17		16	1	2	3	2	2		19	12	2	1	2			
FS	0.125-0.25	14	1	34	3	44	18	2	22	1	17	41	2	44	1	6	4	2	2	1	16	25	4	1	2			
MS	0.25-0.5	10	10	17	3	18	5	14	9	3	46	26	28	19	6	16	6	6	4	2	9	36	6	2	5			
CS	0.5-1	6	16	3	5	2	2	14	3	5	30	7	30	4	4	12	6	12	5	5	3	20	18	4	8			
VCS	1-2	6	19		6		1	6		5	6	1	11	1	3	8	7	18	3	6		6	22	4	18			
VFG	2-4	4	20		7			8		9			5		5	6	13	16	4	3		1	13	5	22			
FG	4-8	8	22		10			13		6			6		10	12	17	11	10	6			17	5	24			
MG	8-16	8	11		21			19		12			14		14	21	21	7	13	7			13	5	16			
CG	16-32				29			20		25			4		19	17	18	17	32	8			5	13	3			
VCG	32-64				14			4		33					23		2	9	25	26			42		30	10		
SC	64-128														14				36				18		40	40	40	
LC	128-256																							40	30	40		
SB	256-512																							20		10		
MB	512-1024																											
LM	1024-2048																											

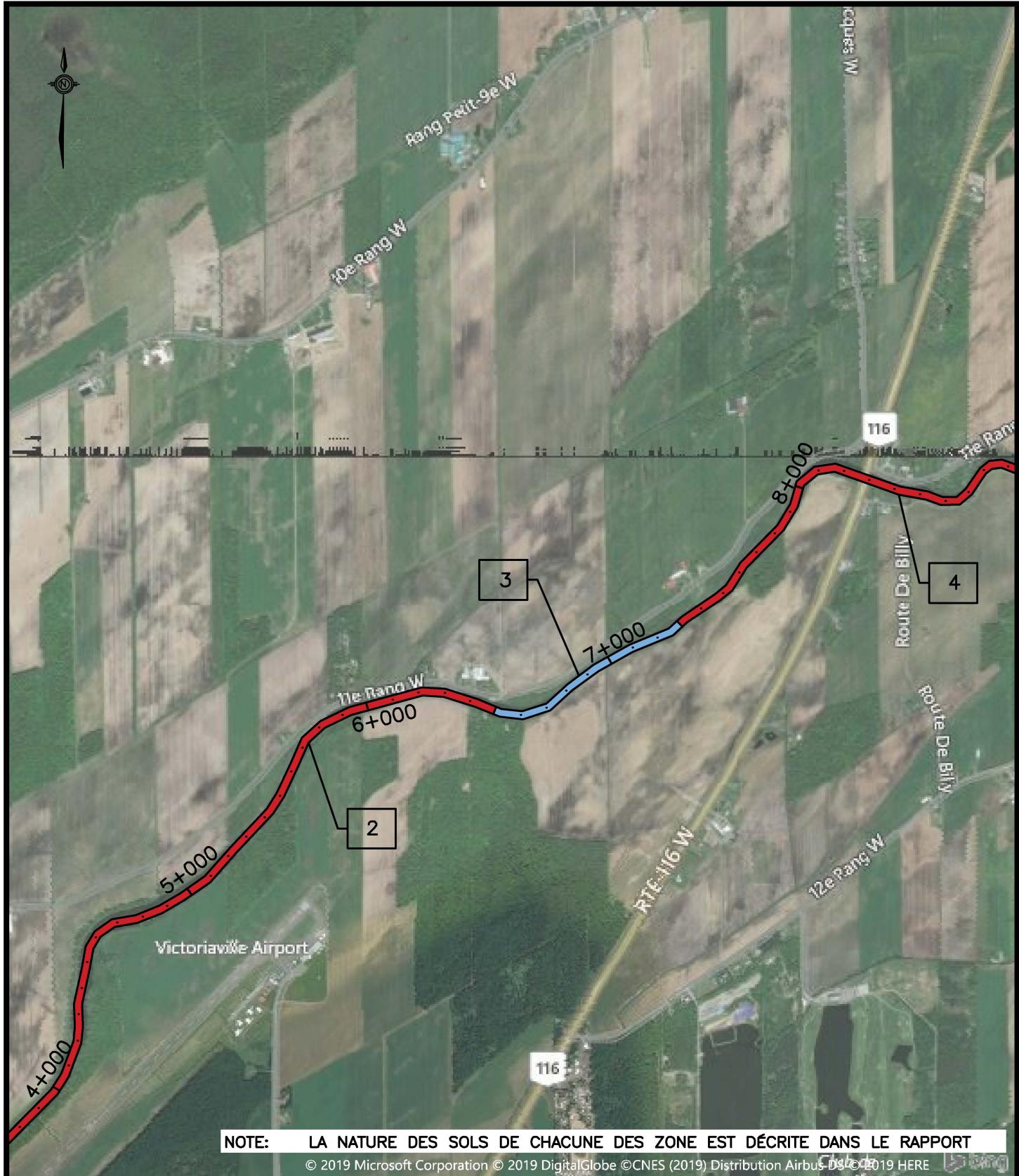
A

Annexe A Plans de caractérisation des sédiments



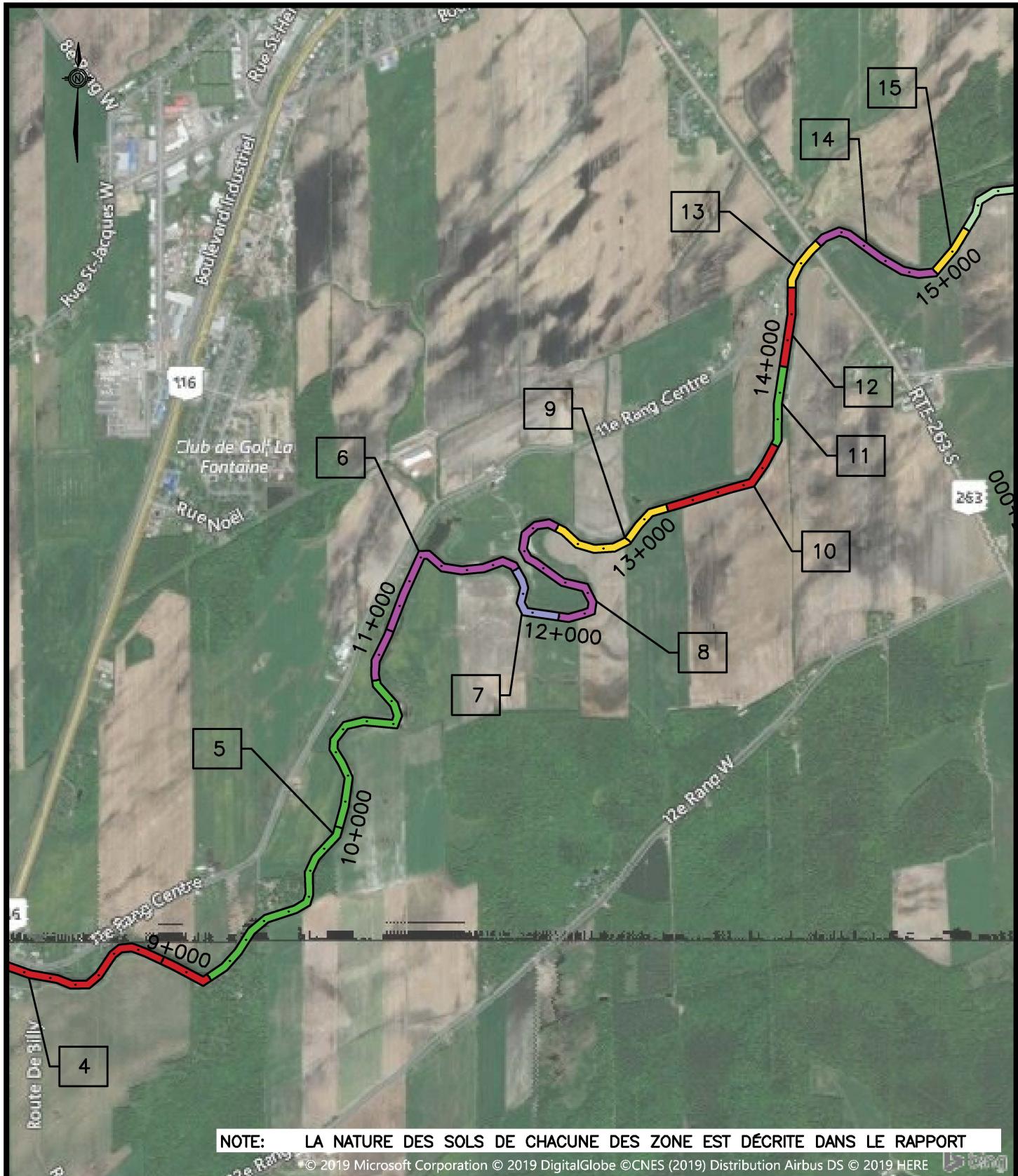
CARACTÉRISATION DES SÉDIMENTS RIVIÈRE BULSTRODE

DESSINÉ PAR: G. Lapointe	CONÇU PAR: G. Lapointe	VÉRIFIÉ PAR: F. St-Pierre	ÉCHELLE: 1:20000	DATE: 2019-10-24	PROJET No: HS00233	FEUILLE No: 1 DE 5	DESSIN No: G01
-----------------------------	---------------------------	------------------------------	---------------------	---------------------	-----------------------	-----------------------	-------------------



CARACTÉRISATION DES SÉDIMENTS RIVIÈRE BULSTRODE

DESSINÉ PAR: G. Lapointe	CONÇU PAR: G. Lapointe	VÉRIFIÉ PAR: F. St-Pierre	ÉCHELLE: 1:20000	DATE: 2019-10-24	PROJET No: HS00233	FEUILLE No: 2 DE 5	DESSIN No: G01
-----------------------------	---------------------------	------------------------------	---------------------	---------------------	-----------------------	-----------------------	-------------------



CARACTÉRISATION DES SÉDIMENTS RIVIÈRE BULSTRODE

DESSINÉ PAR:
G. Lapointe

CONÇU PAR:
G. Lapointe

VÉRIFIÉ PAR:
F. St-Pierre

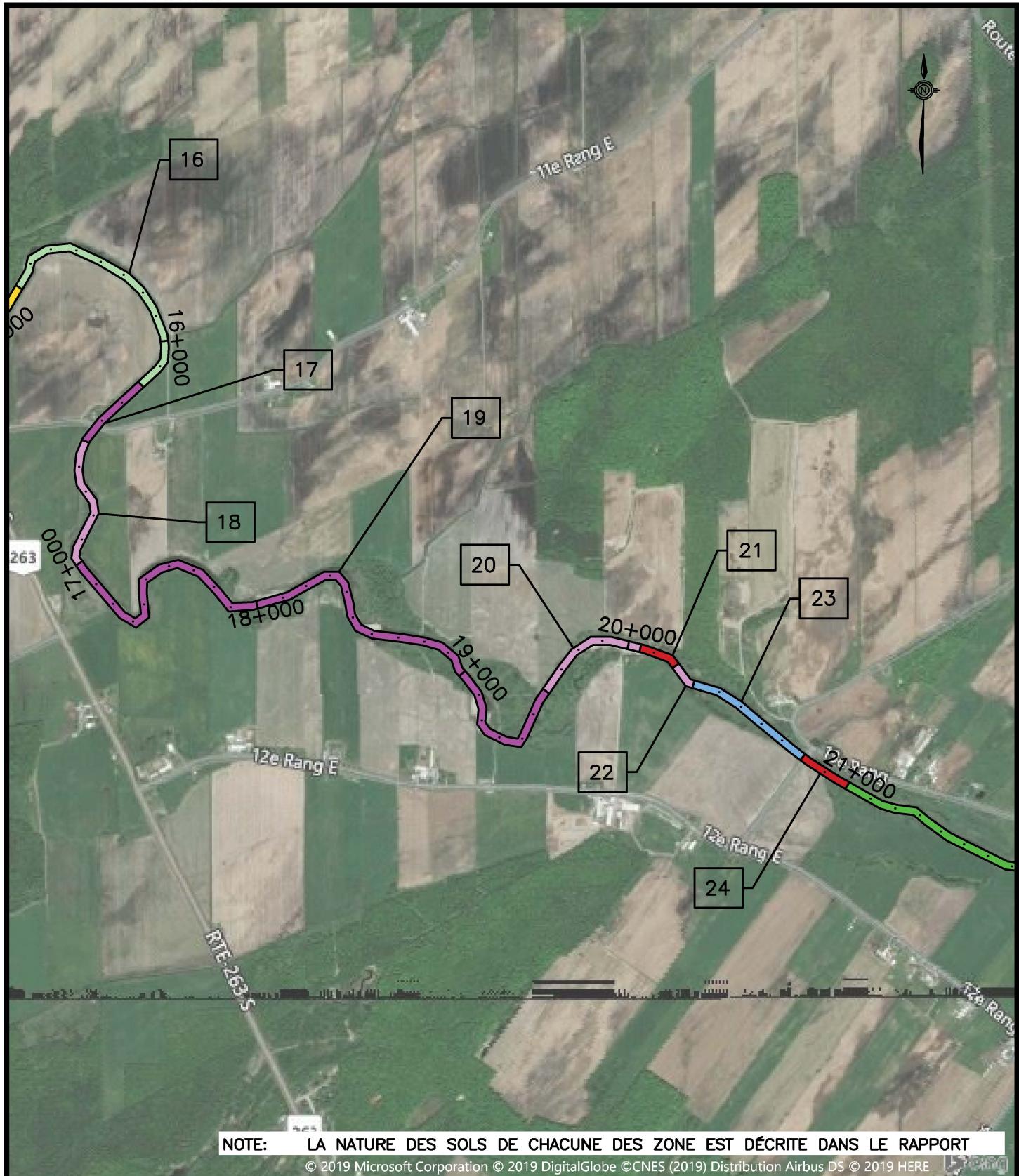
ÉCHELLE:
1:20000

DATE:
2019-10-24

PROJET No:
HS00233

FEUILLE No:
3 DE 5

DESSIN No:
G01



CARACTÉRISATION DES SÉDIMENTS RIVIÈRE BULSTRODE

DESSINÉ PAR:
G. Lapointe

CONÇU PAR:
G. Lapointe

VÉRIFIÉ PAR:
F. St-Pierre

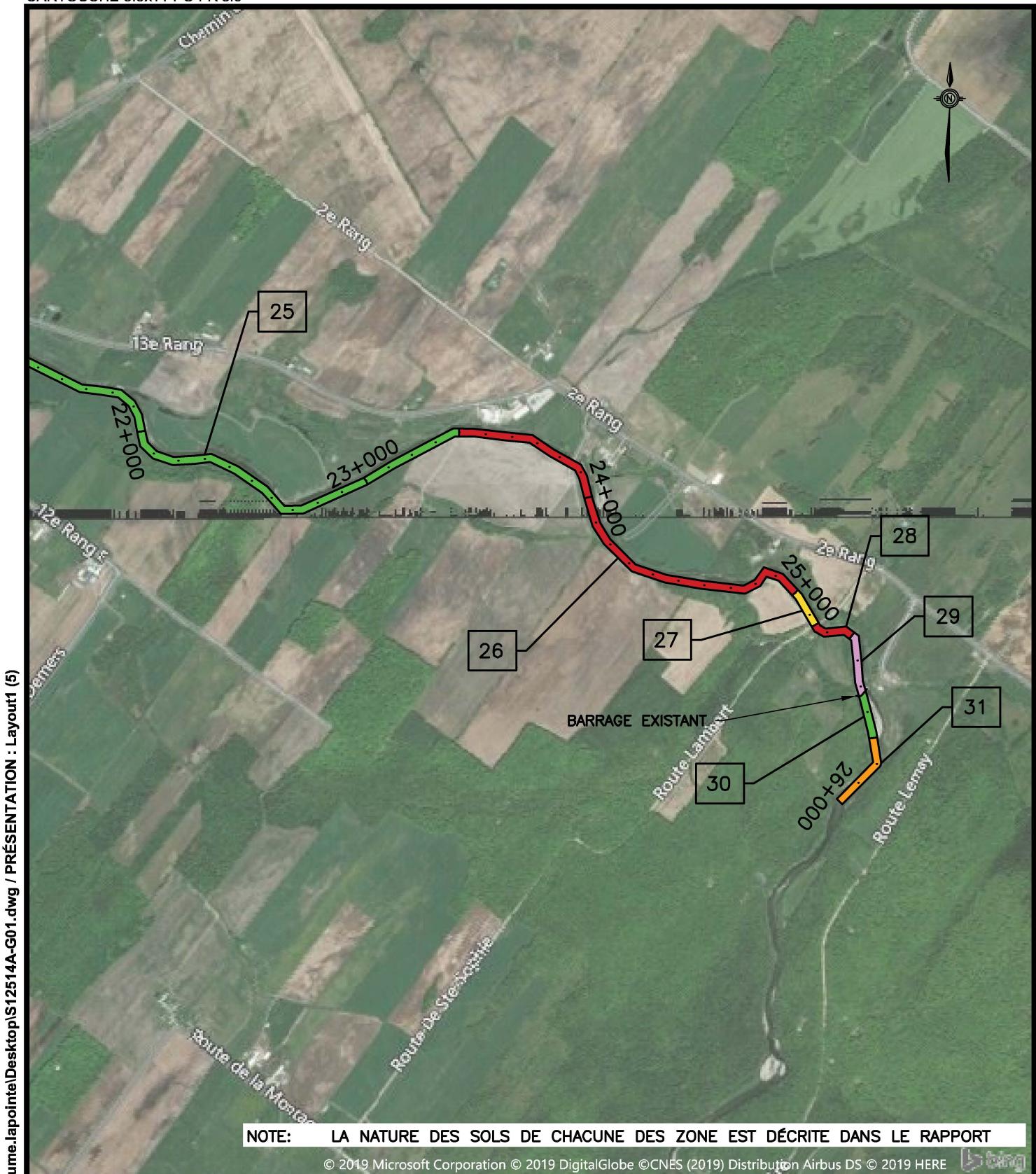
ÉCHELLE:
1:20000

DATE:
2019-10-24

PROJET No:
HS00233

FEUILLE No:
4 DE 5

DESSIN No:
G01



B

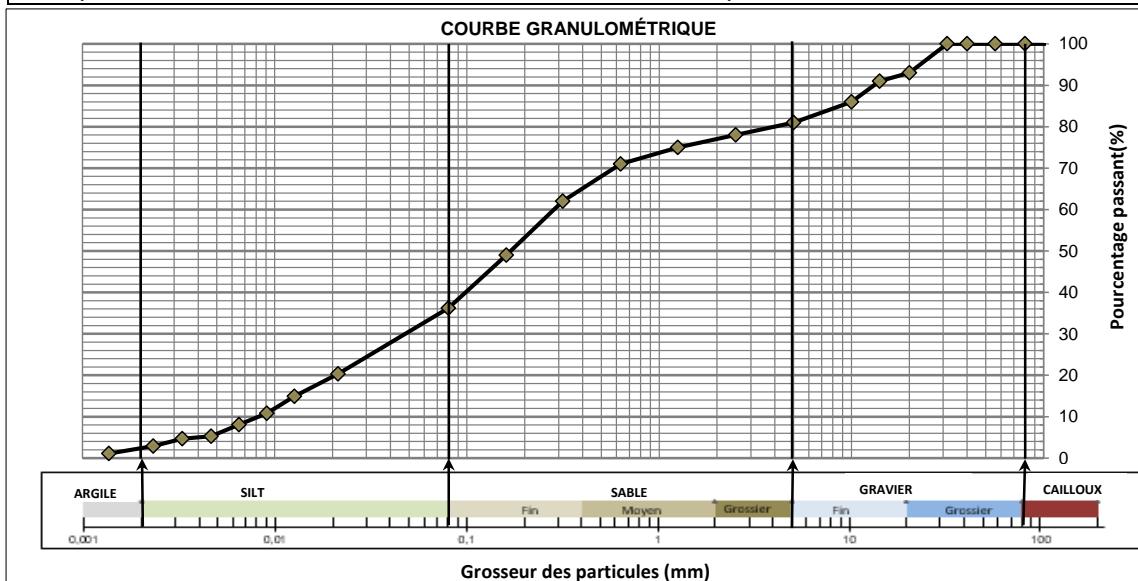
Annexe B Courbes granulométriques

RAPPORT D'ESSAIS LABORATOIRE
GÉOTECHNIQUE-ESSAIS SUR SOLS, GRANULATS ET AUTRES ESSAIS

No. Dossier: P1905-1168-03
Nom projet: Caractérisation des berges
Client: CIMA+
Prélevé le: Octobre 2019
Prélevé par: Client

Sondage:
Échantillon: EM-1
Profondeur:
No. réf. éch. labo: 4017
Essais complétés le:

Type matériau: Matériaux en place
Calibre (fuseaux):
Usage:



Description granulométrique:

Symbole USCS:

DÉTERMINATION DE LA LIMITÉ DE LIQUIDITÉ ET DE LA LIMITÉ DE PLASTICITÉ (BNQ 2501-092)

Méthode opératoire:	Sols cohérents avec particules 400µm	Teneur en eau naturelle (%) w_N :
Mode opératoire:	Assèchement	Limite de liquidité (%) w_{LC} :
Préparation sols séchage:	Aucun	Limite de plasticité (%) w_p :
		Indice de plasticité (%) I_{PC} :
		Indice de liquidité I_{LC} :

ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE (LC 21-040, BNQ 2501-025)			
Diamètre (mm)	Passant (%)	Fuseaux	
		Min.	Max.
112	100		
80	100		
56	100		
40	100		
31,5	100		
20	93		
14	91		
10	86		
5	81		
2,5	78		
1,25	75		
0,630	71		
0,315	62		
0,160	49		
0,080	36,2		
		Gravier(%):	19
		Sable(%):	44,8
		Silt (%):	33,8
		Argile(%):	2,4
0,0213	20,3	Cu:	34,6
0,0126	14,9	Cc:	1,0
0,0091	10,8	D10:	0,0082
0,0065	8,1	D15:	0,0127
0,0047	5,3	D30:	0,0478
0,0033	4,7	D50:	0,1686
0,0023	2,9	D60:	0,2838
0,0014	1,1	D85:	8,7055

Légende: A: Lorsque le pourcentage d'argile n'est pas précisé, ce dernier est inclus.

* : Non-conformité

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET MÉCANIQUES DE L'ÉCHANTILLON				
ESSAI LABORATOIRE	NORME	RÉSULTAT	EXIGENCES	REMARQUES

Préparé par: _____

Casey Johann ing.jr

Date: 2019-10-25

Approuvé par: _____

Casey Johann ing.jr

Date: 2019-10-25

RAPPORT D'ESSAIS LABORATOIRE

ESSAIS SUR SOLS, GRANULATS ET AUTRES ESSAIS

No. Dossier: P1905-1168-03

Nom projet: Caractérisation des berges

Client: CIMA+

No.référence: EM-3

No.Échantillon: 4018

Prélevé par: Client

Prélevé le: oct-19

Provenance: In situ

Localisation: Rivière Bulstrode

Essais complétés le: 2019-10-23

Type matériau: Matériaux en place

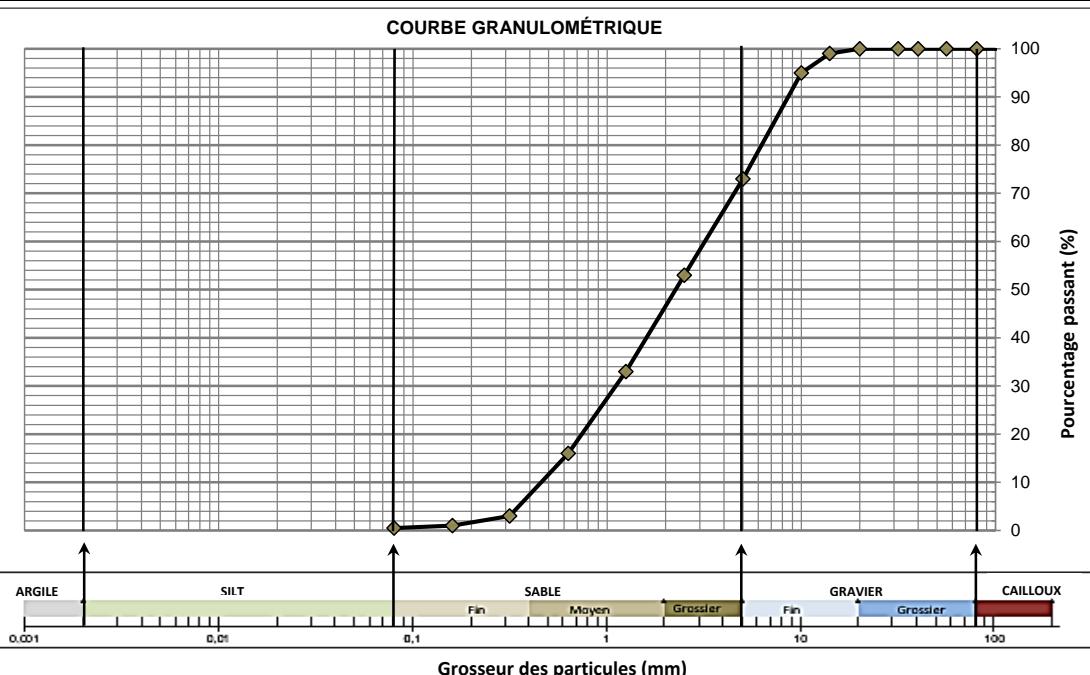
Calibre (fuseaux):

Usage:

Prélèvement: À la source

Tonnage:

Analyse granulométrique			
Diamètre (mm)	Passant (%)	Fuseaux	
		Min.	Max.
112	100		
80	100		
56	100		
40	100		
31,5	100		
20	100		
14	99		
10	95		
5	73		
2,5	53		
1,25	33		
0,630	16		
0,315	3		
0,160	1		
0,080	0,5		



Description granulométrique:
Symbole USCS:

Essai Proctor Modifié (BNQ 2501-255)

Méthode d'essai:

Masse vol. sèche maximale:

0 kg/m³

Humidité optimale:

0,0 %

Gravier(%):	27
Sable(%):	72,5
Silt ^(%):	0,5
Argile(%):	
Cu:	7,0
Cc:	0,8
D ₁₀ :	0,4575
D ₁₅ :	0,5973
D ₃₀ :	1,1076
D ₅₀ :	2,2531
D ₆₀ :	3,1864
Module finesse	4,21

* Non-conformité

A: Lorsque le pourcentage d'argile n'est pas précisé, ce dernier est inclus.

PROPRIÉTÉ PHYSIQUES ET MÉCANIQUES DE L'ÉCHANTILLON

ESSAI LABORATOIRE

NORME

RÉSULTAT

EXIGENCES/SPÉCIFICATIONS

REMARQUES:

Préparé par:

Casey Johann, ing. jr

Date: 2019-10-23

Approuvé par:


Casey Johann, ing. jr

Date: 2019-10-23

RAPPORT D'ESSAIS LABORATOIRE

ESSAIS SUR SOLS, GRANULATS ET AUTRES ESSAIS

No. Dossier: P1905-1168-03

Nom projet: Caractérisation des berges

Client: CIMA+

No.référence: EM-4

No.Échantillon: 4019

Prélevé par: Client

Prélevé le: oct-19

Provenance: In situ

Localisation: Rivière Bulstrode

Essais complétés le: 2019-10-23

Type matériau: Matériaux en place

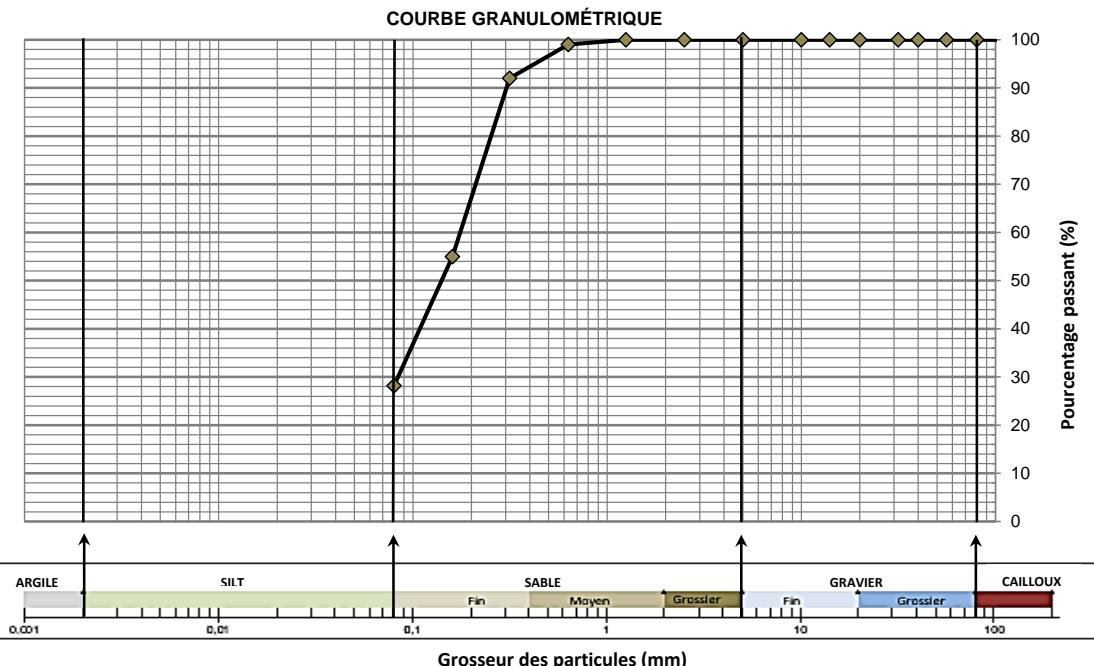
Calibre (fuseaux):

Usage:

Prélèvement: À la source

Tonnage:

Analyse granulométrique			
Diamètre (mm)	Passant (%)	Fuseaux	
		Min.	Max.
112	100		
80	100		
56	100		
40	100		
31,5	100		
20	100		
14	100		
10	100		
5	100		
2,5	100		
1,25	100		
0,630	99		
0,315	92		
0,160	55		
0,080	28,2		



Description granulométrique:

Symbol USCS:

Essai Proctor Modifié (BNQ 2501-255)

Méthode d'essai:

Masse vol. sèche maximale:

0 kg/m³

Humidité optimale:

0,0 %

Gravier(%):	0
Sable(%):	71,8
Silt ^(%):	28,2
Argile(%):	
Cu:	
Cc:	
D ₁₀ :	
D ₁₅ :	
D ₃₀ :	0,0838
D ₅₀ :	0,1406
D ₆₀ :	0,1753
Module finesse	0,55

* Non-conformité

A: Lorsque le pourcentage d'argile n'est pas précisé, ce dernier est inclus.

PROPRIÉTÉ PHYSIQUES ET MÉCANIQUES DE L'ÉCHANTILLON

ESSAI LABORATOIRE

NORME

RÉSULTAT

EXIGENCES/SPÉCIFICATIONS

REMARQUES:

Préparé par:

Casey Johann, ing. jr

Date: 2019-10-23

Approuvé par:


Casey Johann, ing. jr

Date: 2019-10-23

RAPPORT D'ESSAIS LABORATOIRE

ESSAIS SUR SOLS, GRANULATS ET AUTRES ESSAIS

No. Dossier: P1905-1168-03

Nom projet: Caractérisation des berges

Client: CIMA+

No.référence: EM-6

No.Échantillon: 4020

Prélevé par: Client

Prélevé le: oct-19

Provenance: In situ

Localisation: Rivière Bulstrode

Essais complétés le: 2019-10-23

Type matériau: Matériaux en place

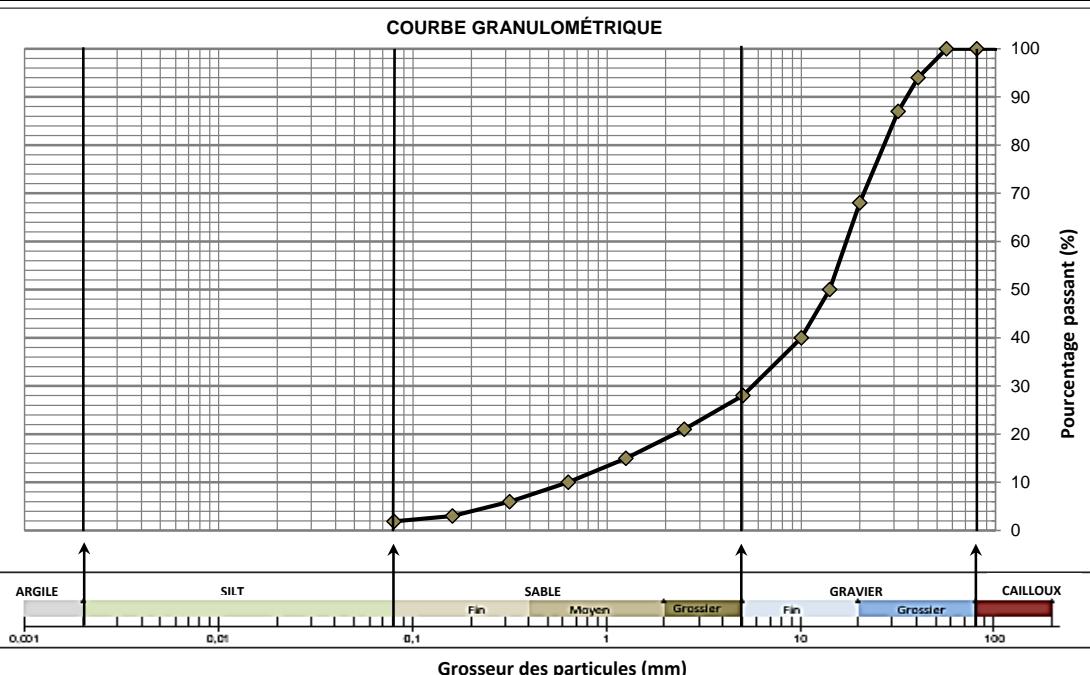
Calibre (fuseaux):

Usage:

Prélèvement: À la source

Tonnage:

Analyse granulométrique			
Diamètre (mm)	Passant (%)	Fuseaux	
		Min.	Max.
112	100		
80	100		
56	100		
40	94		
31,5	87		
20	68		
14	50		
10	40		
5	28		
2,5	21		
1,25	15		
0,630	10		
0,315	6		
0,160	3		
0,080	1,9		



Description granulométrique:
Symbole USCS:

Essai Proctor Modifié (BNQ 2501-255)

Méthode d'essai:

Masse vol. sèche maximale:

0 kg/m³

Humidité optimale:

0,0 %

Gravier(%):	72
Sable(%):	26,1
Silt ^(%):	1,9
Argile(%):	
Cu:	27,1
Cc:	2,9
D ₁₀ :	0,6300
D ₁₅ :	1,2500
D ₃₀ :	5,6123
D ₅₀ :	14,0000
D ₆₀ :	17,0681
Module finesse	5,17

* Non-conformité

A: Lorsque le pourcentage d'argile n'est pas précisé, ce dernier est inclus.

PROPRIÉTÉ PHYSIQUES ET MÉCANIQUES DE L'ÉCHANTILLON

ESSAI LABORATOIRE

NORME

RÉSULTAT

EXIGENCES/SPÉCIFICATIONS

REMARQUES:

Préparé par:

Casey Johann, ing. jr

Date: 2019-10-23

Approuvé par:


Casey Johann, ing. jr

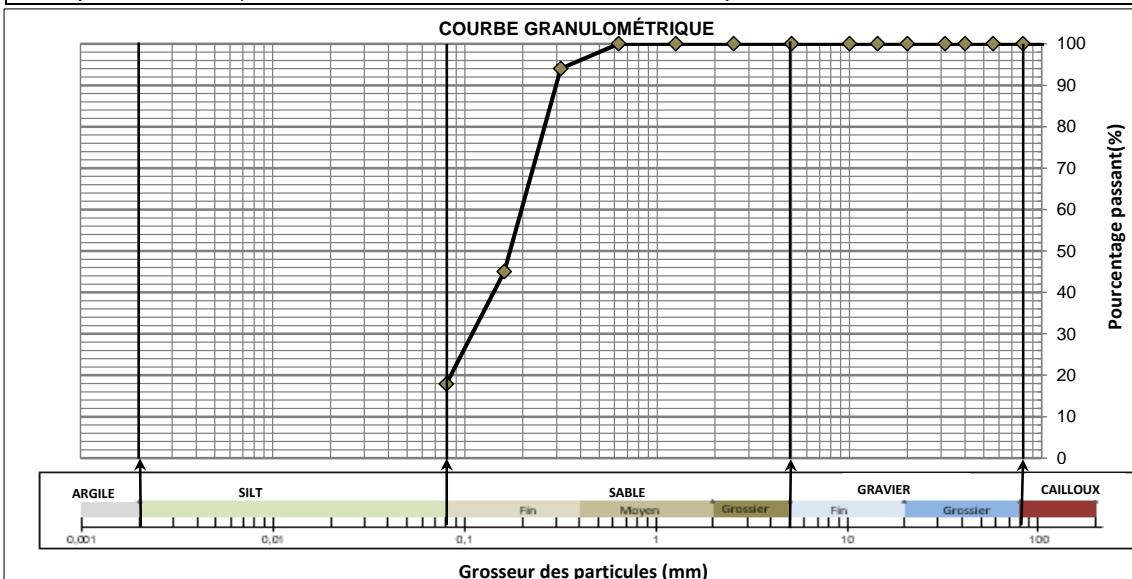
Date: 2019-10-23

RAPPORT D'ESSAIS LABORATOIRE
GÉOTECHNIQUE-ESSAIS SUR SOLS, GRANULATS ET AUTRES ESSAIS

No. Dossier: P1905-1168-03
Nom projet: Caractérisation des berges, Rivière Bulstrode
Client: CIMA+ : Dossier HS00233
Prélevé : oct-19
Prélevé par: Guillaume Lapointe

Sondage:
Échantillon: EM7
Profondeur:
No. réf. éch. labo: 5614
Essais complétés le: 2019-11-29

Type matériau: Matériaux en place
Calibre (fuseaux):
Usage:



ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE (LC 21-040, BNQ 2501-025)			
Diamètre (mm)	Passant (%)	Fuseaux	
		Min.	Max.
112	100		
80	100		
56	100		
40	100		
31,5	100		
20	100		
14	100		
10	100		
5	100		
2,5	100		
1,25	100		
0,630	100		
0,315	94		
0,160	45		
0,080	17,9		
		Gravier(%):	0
		Sable(%):	82,1
		Silt (%):	17,9
		Argile(%):	
		Cu:	
		Cc:	
		D10:	
		D15:	
		D30:	0,1090
		D50:	0,0081
		D60:	0,0021
		D85:	0,0366

Description granulométrique:

Symbol USCS:

DÉTERMINATION DE LA LIMITÉ DE LIQUIDITÉ ET DE LA LIMITÉ DE PLASTICITÉ (BNQ 2501-092)

Méthode opératoire:
Teneur en eau naturelle (%) w_N :
Mode opératoire:
Limite de liquidité (%) w_L :
Préparation sols séchage:
Limite de plasticité (%) w_p :
Indice de plasticité (%) I_p :
Indice de liquidité I_L :

Légende: A: Lorsque le pourcentage d'argile n'est pas précisé, ce dernier est inclus.
* : Non-conformité

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET MÉCANIQUES DE L'ÉCHANTILLON				
ESSAI LABORATOIRE	NORME	RÉSULTAT	EXIGENCES	REMARQUES

Préparé par : _____

Sylvie Daigle techn.sr

Date: 2019-11-29

Approuvé par: _____

Casey Johann ing.jr

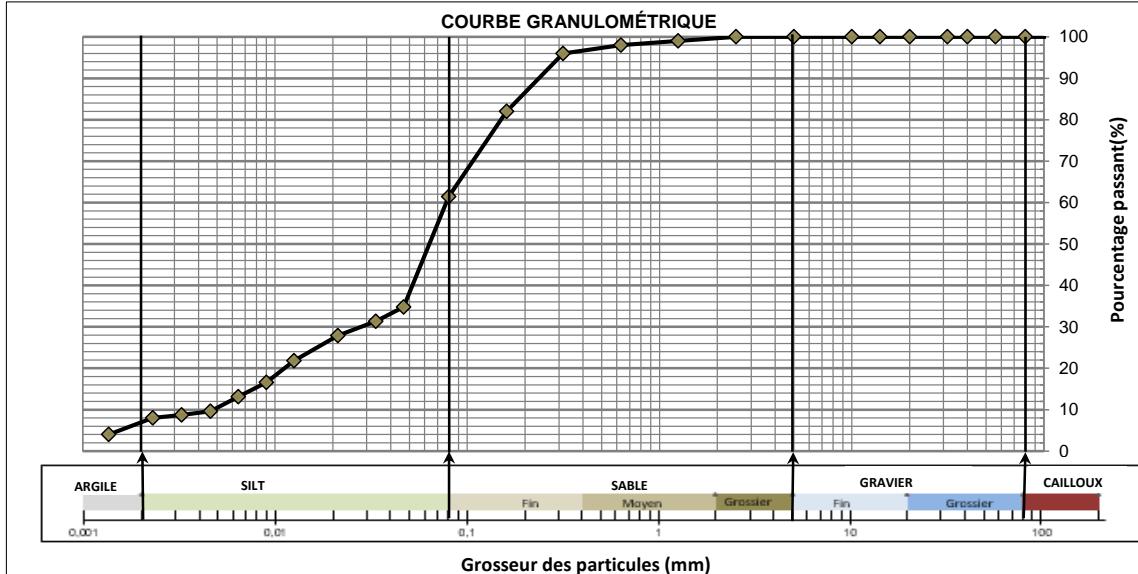
Date: 2019-11-29

RAPPORT D'ESSAIS LABORATOIRE
GÉOTECHNIQUE-ESSAIS SUR SOLS, GRANULATS ET AUTRES ESSAIS

No. Dossier: P1905-1168-03
Nom projet: Caractérisation des berges, Rivière Bulstrode
Client: CIMA+ : Dossier HS00233
Prélevé : oct-19
Prélevé par: Guillaume Lapointe

Sondage:
Échantillon: EM10
Profondeur:
No. réf. éch. labo: 5615
Essais complétés le: 2019-12-03

Type matériau: Matériaux en place
Calibre (fuseaux):
Usage:



ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE (LC 21-040, BNQ 2501-025)			
Diamètre (mm)	Passant (%)	Fuseaux	
		Min.	Max.
112	100		
80	100		
56	100		
40	100		
31,5	100		
20	100		
14	100		
10	100		
5	100		
2,5	100		
1,25	99		
0,630	98		
0,315	96		
0,160	82		
0,080	61,4		
		Gravier(%):	0
		Sable(%):	38,6
0,0466	34,8	Silt (%):	54,5
0,0334	31,3	Argile(%):	6,9
0,0212	27,9	Cu:	16,2
0,0125	21,8	Cc:	2,1
0,0090	16,6	D10:	0,0048
0,0064	13,1	D15:	0,0077
0,0046	9,6	D30:	0,0281
0,0033	8,7	D50:	0,0635
0,0023	8,0	D60:	0,0778
0,0014	4,0	D85:	0,1850

Description granulométrique:

Symbole USCS:

DÉTERMINATION DE LA LIMITÉ DE LIQUIDITÉ ET DE LA LIMITÉ DE PLASTICITÉ (BNQ 2501-092)

Méthode opératoire:	Teneur en eau naturelle (%) w_N :
Mode opératoire:	Limite de liquidité (%) w_{LC} :
Préparation sols séchage:	Limite de plasticité (%) w_P :
	Indice de plasticité (%) I_P :
	Indice de liquidité I_{LC} :

Légende: A: Lorsque le pourcentage d'argile n'est pas précisé, ce dernier est inclus.
*: Non-conformité

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET MÉCANIQUES DE L'ÉCHANTILLON				
ESSAI LABORATOIRE	NORME	RÉSULTAT	EXIGENCES	REMARQUES

Préparé par :

Sylvie Daigle techn.sr

Date: 2019-12-03

Approuvé par:

Casey Johann

ing.jr

Date: 2019-12-03

RAPPORT D'ESSAIS LABORATOIRE

ESSAIS SUR SOLS, GRANULATS ET AUTRES ESSAIS

No. Dossier: P1905-1168-03

Nom projet: Caractérisation des berges

Client: CIMA+

No.référence: EM-11

No.Échantillon: 4021

Prélevé par: Client

Prélevé le: oct-19

Provenance: In situ

Localisation: Rivière Bulstrode

Essais complétés le: 2019-10-23

Type matériau: Matériaux en place

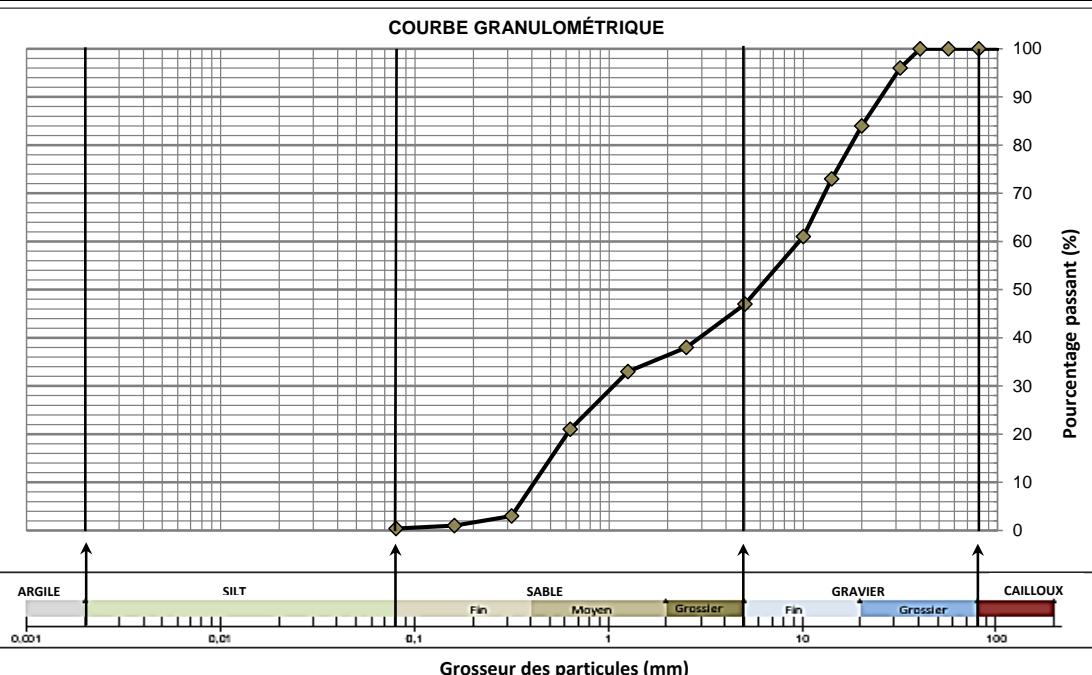
Calibre (fuseaux):

Usage:

Prélèvement: À la source

Tonnage:

Analyse granulométrique			
Diamètre (mm)	Passant (%)	Fuseaux	
		Min.	Max.
112	100		
80	100		
56	100		
40	100		
31,5	96		
20	84		
14	73		
10	61		
5	47		
2,5	38		
1,25	33		
0,630	21		
0,315	3		
0,160	1		
0,080	0,4		



Description granulométrique:
Symbole USCS:

Essai Proctor Modifié (BNQ 2501-255)

Méthode d'essai:

Masse vol. sèche maximale:

0 kg/m³

Humidité optimale:

0,0 %

Gravier(%):	53
Sable(%):	46,6
Silt ^(%):	0,4
Argile(%):	
Cu:	23,1
Cc:	0,3
D ₁₀ :	0,4125
D ₁₅ :	0,5000
D ₃₀ :	1,0532
D ₅₀ :	5,8006
D ₆₀ :	9,5170
Module finesse	4,58

* Non-conformité

A: Lorsque le pourcentage d'argile n'est pas précisé, ce dernier est inclus.

PROPRIÉTÉ PHYSIQUES ET MÉCANIQUES DE L'ÉCHANTILLON

ESSAI LABORATOIRE

NORME

RÉSULTAT

EXIGENCES/SPÉCIFICATIONS

REMARQUES:

Préparé par:

Casey Johann, ing. jr

Date: 2019-10-23

Approuvé par:


Casey Johann, ing. jr

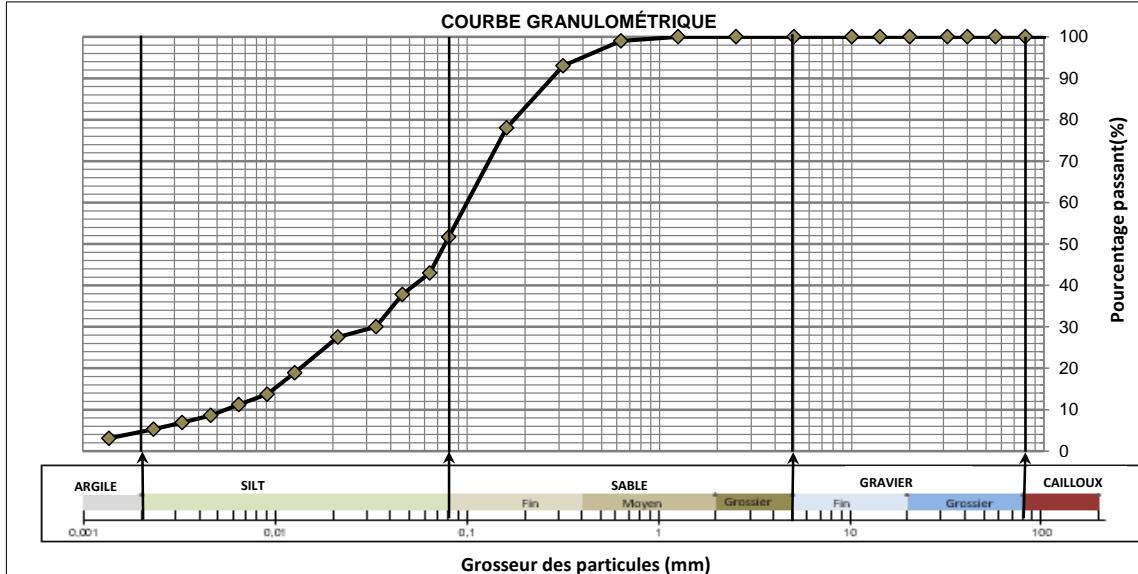
Date: 2019-10-23

RAPPORT D'ESSAIS LABORATOIRE
GÉOTECHNIQUE-ESSAIS SUR SOLS, GRANULATS ET AUTRES ESSAIS

No. Dossier: P1905-1168-03
Nom projet: Caractérisation des berges, Rivière Bulstrode
Client: CIMA+ : Dossier HS00233
Prélevé : oct-19
Prélevé par: Guillaume Lapointe

Sondage:
Échantillon: EM13
Profondeur:
No. réf. éch. labo: 5616
Essais complétés le: 2019-12-03

Type matériau: Matériaux en place
Calibre (fuseaux):
Usage:



ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE (LC 21-040, BNQ 2501-025)			
Diamètre (mm)	Passant (%)	Fuseaux	
		Min.	Max.
112	100		
80	100		
56	100		
40	100		
31,5	100		
20	100		
14	100		
10	100		
5	100		
2,5	100		
1,25	100		
0,630	99		
0,315	93		
0,160	78		
0,080	51,7		
		Gravier(%):	0
0,0637	43,0	Sable(%):	48,3
0,0460	37,8	Silt (%):	47,0
0,0335	30,0	Argile(%):	4,7
0,0212	27,5	Cu:	18,1
0,0126	18,9	Cc:	2,0
0,0091	13,7	D10:	0,0055
0,0065	11,2	D15:	0,0099
0,0046	8,6	D30:	0,0335
0,0033	6,9	D50:	0,0765
0,0023	5,3	D60:	0,0996
0,0014	3,1	D85:	0,2195

Description granulométrique:

Symbol USCS:

DÉTERMINATION DE LA LIMITÉ DE LIQUIDITÉ ET DE LA LIMITÉ DE PLASTICITÉ (BNQ 2501-092)

Méthode opératoire:
Teneur en eau naturelle (%) w_N :
Mode opératoire:
Limite de liquidité (%) w_{LC} :
Préparation sols séchage:
Limite de plasticité (%) w_P :
Indice de plasticité (%) I_P :
Indice de liquidité I_{LC} :

Légende: A: Lorsque le pourcentage d'argile n'est pas précisé, ce dernier est inclus.
*: Non-conformité

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET MÉCANIQUES DE L'ÉCHANTILLON				
ESSAI LABORATOIRE	NORME	RÉSULTAT	EXIGENCES	REMARQUES

Préparé par : _____

Sylvie Daigle techn.sr

Date: 2019-12-03

Approuvé par: _____

Casey Johann

Date: 2019-12-03

RAPPORT D'ESSAIS LABORATOIRE

ESSAIS SUR SOLS, GRANULATS ET AUTRES ESSAIS

No. Dossier: P1905-1168-03

Nom projet: Caractérisation des berges

Client: CIMA+

No.référence: EM-15

No.Échantillon: 4022

Prélevé par: Client

Prélevé le: oct-19

Provenance: In situ

Localisation: Rivière Bulstrode

Essais complétés le: 2019-10-23

Type matériau: Matériaux en place

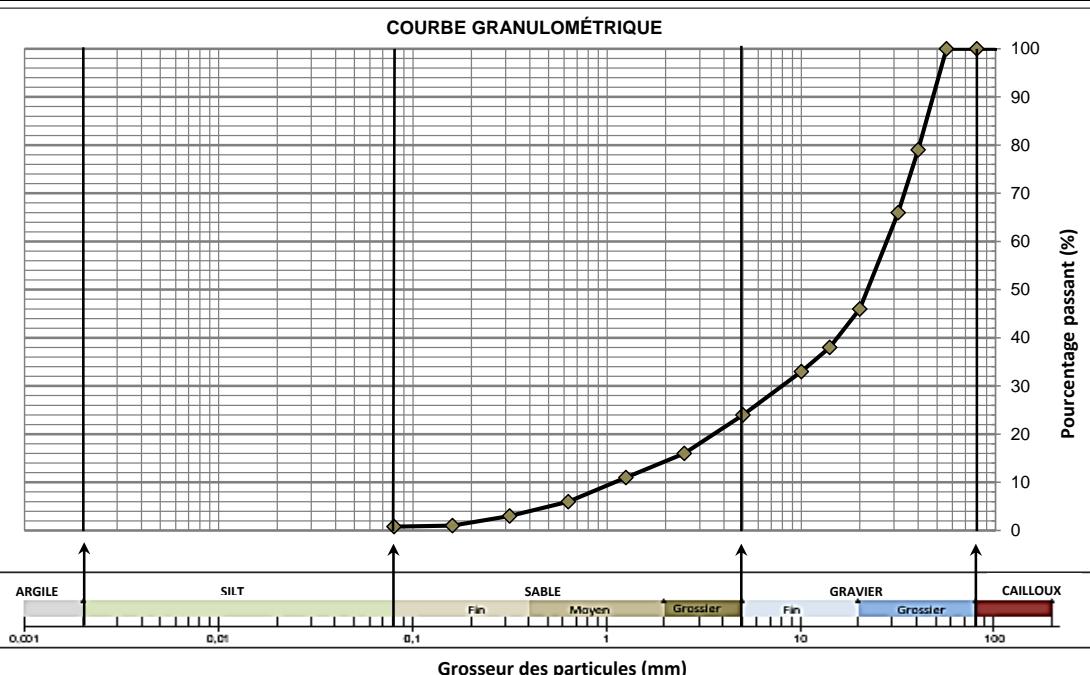
Calibre (fuseaux):

Usage:

Prélèvement: À la source

Tonnage:

Analyse granulométrique			
Diamètre (mm)	Passant (%)	Fuseaux	
		Min.	Max.
112	100		
80	100		
56	100		
40	79		
31,5	66		
20	46		
14	38		
10	33		
5	24		
2,5	16		
1,25	11		
0,630	6		
0,315	3		
0,160	1		
0,080	0,8		



Description granulométrique: Symbol USCS:	Essai Proctor Modifié (BNQ 2501-255)
	Méthode d'essai: [redacted]
	Masse vol. sèche maximale: 0 kg/m³

Gravier(%):	76
Sable(%):	23,2
Silt ^(%):	0,8
Argile(%):	
Cu:	25,2
Cc:	2,1
D ₁₀ :	1,0899
D ₁₅ :	2,1764
D ₃₀ :	7,9370
D ₅₀ :	21,9021
D ₆₀ :	27,4869
Module finesse	5,39

* Non-conformité A: Lorsque le pourcentage d'argile n'est pas précisé, ce dernier est inclus.

PROPRIÉTÉ PHYSIQUES ET MÉCANIQUES DE L'ÉCHANTILLON

ESSAI LABORATOIRE	NORME	RÉSULTAT	EXIGENCES/SPÉCIFICATIONS

REMARQUES:

Préparé par:

Casey Johann, ing. jr

Date: 2019-10-23

Approuvé par:

Date: 2019-10-23

Casey Johann, ing. jr

RAPPORT D'ESSAIS LABORATOIRE

ESSAIS SUR SOLS, GRANULATS ET AUTRES ESSAIS

No. Dossier: P1905-1168-03

Nom projet: Caractérisation des berges

Client: CIMA+

No.référence: EM-18

No.Échantillon: 4023

Prélevé par: Client

Prélevé le: oct-19

Provenance: In situ

Localisation: Rivière Bulstrode

Essais complétés le: 2019-10-23

Type matériau: Matériaux en place

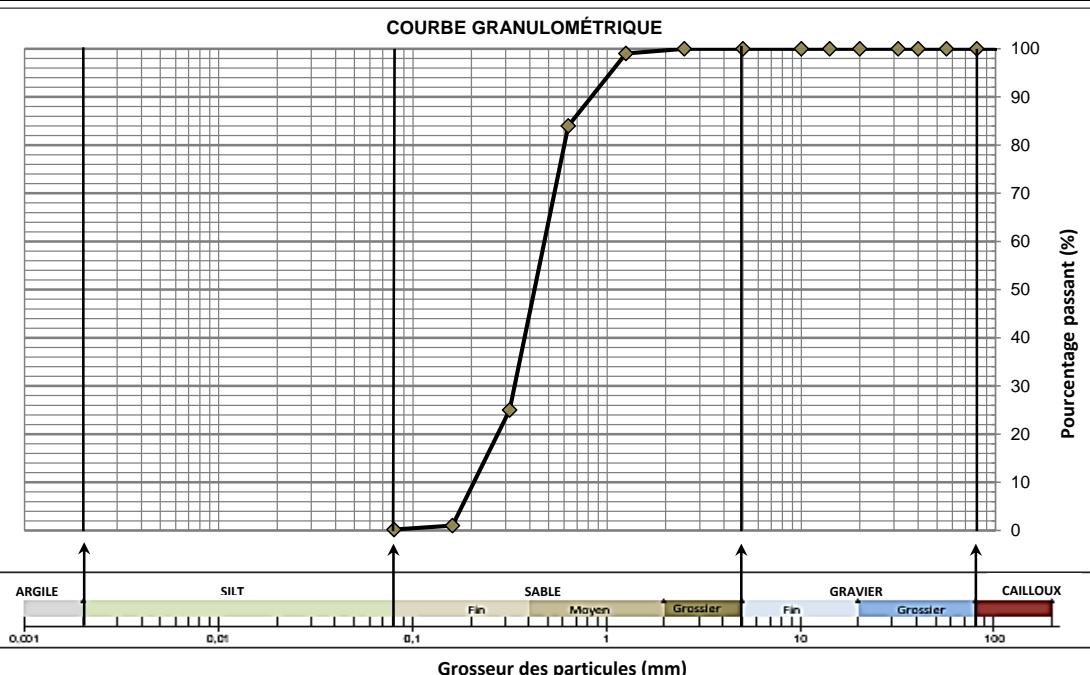
Calibre (fuseaux):

Usage:

Prélèvement: À la source

Tonnage:

Analyse granulométrique			
Diamètre (mm)	Passant (%)	Fuseaux	
		Min.	Max.
112	100		
80	100		
56	100		
40	100		
31,5	100		
20	100		
14	100		
10	100		
5	100		
2,5	100		
1,25	99		
0,630	84		
0,315	25		
0,160	1		
0,080	0,2		



Description granulométrique:

Symbol USCS:

Essai Proctor Modifié (BNQ 2501-255)

Méthode d'essai:

Masse vol. sèche maximale:

0 kg/m³

Humidité optimale:

0,0 %

Gravier(%):	0
Sable(%):	99,8
Silt ^(%):	0,2
Argile(%):	
Cu:	2,3
Cc:	1,1
D ₁₀ :	0,2063
D ₁₅ :	0,2375
D ₃₀ :	0,3341
D ₅₀ :	0,4225
D ₆₀ :	0,4752
Module finesse	1,92

* Non-conformité

A: Lorsque le pourcentage d'argile n'est pas précisé, ce dernier est inclus.

PROPRIÉTÉ PHYSIQUES ET MÉCANIQUES DE L'ÉCHANTILLON

ESSAI LABORATOIRE

NORME

RÉSULTAT

EXIGENCES/SPÉCIFICATIONS

REMARQUES:

Préparé par:

Casey Johann, ing. jr

Date: 2019-10-23

Approuvé par:


Casey Johann, ing. jr

Date: 2019-10-23

RAPPORT D'ESSAIS LABORATOIRE

ESSAIS SUR SOLS, GRANULATS ET AUTRES ESSAIS

No. Dossier: P1905-1168-03

Nom projet: Caractérisation des berges

Client: CIMA+

No.référence: EM-19

No.Échantillon: 4024

Prélevé par: Client

Prélevé le: oct-19

Provenance: In situ

Localisation: Rivière Bulstrode

Essais complétés le: 2019-10-23

Type matériau: Matériaux en place

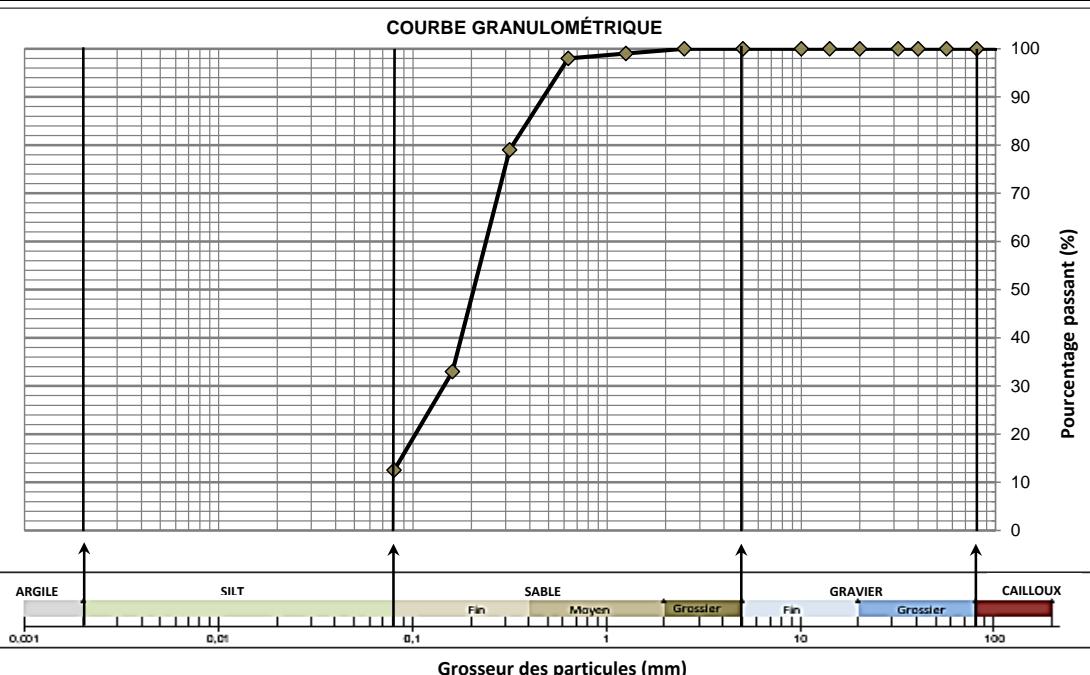
Calibre (fuseaux):

Usage:

Prélèvement: À la source

Tonnage:

Analyse granulométrique			
Diamètre (mm)	Passant (%)	Fuseaux	
		Min.	Max.
112	100		
80	100		
56	100		
40	100		
31,5	100		
20	100		
14	100		
10	100		
5	100		
2,5	100		
1,25	99		
0,630	98		
0,315	79		
0,160	33		
0,080	12,5		



Description granulométrique: Symbol USCS:	Essai Proctor Modifié (BNQ 2501-255)
	Méthode d'essai:
	Masse vol. sèche maximale: 0 kg/m³

Gravier(%):	0
Sable(%):	87,5
Silt ^(%):	12,5
Argile(%):	
Cu:	
Cc:	
D ₁₀ :	
D ₁₅ :	0,0871
D ₃₀ :	0,1446
D ₅₀ :	0,2055
D ₆₀ :	0,2381
Module finesse	0,91

* Non-conformité

A: Lorsque le pourcentage d'argile n'est pas précisé, ce dernier est inclus.

PROPRIÉTÉ PHYSIQUES ET MÉCANIQUES DE L'ÉCHANTILLON

	ESSAI LABORATOIRE	NORME	RÉSULTAT	EXIGENCES/SPÉCIFICATIONS
Cu:				
Cc:				
D ₁₀ :				
D ₁₅ :				
D ₃₀ :				
D ₅₀ :				
D ₆₀ :				

REMARQUES:

Préparé par:

Casey Johann, ing. jr

Date: 2019-10-23

Approuvé par:


Casey Johann, ing. jr

Date: 2019-10-23

RAPPORT D'ESSAIS LABORATOIRE

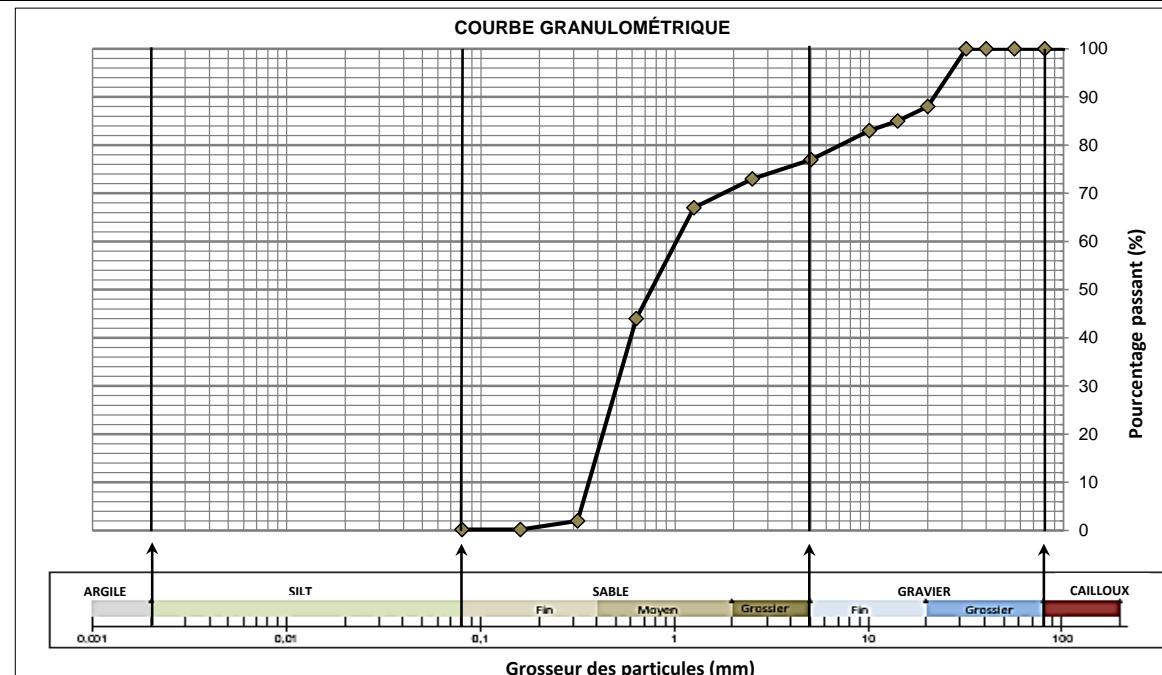
ESSAIS SUR SOLS, GRANULATS ET AUTRES ESSAIS

No. Dossier: P1905-1168-03
Nom projet: Caractérisation des berges
Client: CIMA+
No.référence: EM-20
No.Échantillon: 4025

Prélevé par: Client
Prélevé le: oct-19
Provenance: In situ
Localisation: Rivière Bulstrode
Essais complétés le: 2019-10-23

Type matériau: Matériaux en place
Calibre (fuseaux):
Usage:
Prélèvement: À la source
Tonnage:

Analyse granulométrique			
LC 21-040 <input checked="" type="checkbox"/>	BNQ 2501-02 <input type="checkbox"/>	CSA A23.2-2A <input type="checkbox"/>	
Diamètre (mm)	Passant (%)	Fuseaux	
		Min.	Max.
112	100		
80	100		
56	100		
40	100		
31,5	100		
20	88		
14	85		
10	83		
5	77		
2,5	73		
1,25	67		
0,630	44		
0,315	2		
0,160	0,2		
0,080	0,2		



Description granulométrique:
Symbole USCS:

Essai Proctor Modifié (BNQ 2501-255)

Méthode d'essai:
Masse vol. sèche maximale: 0 kg/m³
Humidité optimale: 0,0 %

Gravier(%):	23
Sable(%):	76,8
Silt ^(%):	0,2
Argile(%):	
Cu:	2,8
Cc:	0,7
D ₁₀ :	0,3595
D ₁₅ :	0,3904
D ₃₀ :	0,5000
D ₅₀ :	0,7533
D ₆₀ :	1,0147
Module finesse	3,37

* Non-conformité

A: Lorsque le pourcentage d'argile n'est pas précisé, ce dernier est inclus.

PROPRIÉTÉ PHYSIQUES ET MÉCANIQUES DE L'ÉCHANTILLON

	ESSAI LABORATOIRE	NORME	RÉSULTAT	EXIGENCES/SPÉCIFICATIONS
Cu:				
Cc:				
D ₁₀ :				
D ₁₅ :				
D ₃₀ :				
D ₅₀ :				
D ₆₀ :				
Module finesse				

REMARQUES:

Préparé par:

Casey Johann, ing. jr

Date: 2019-10-23

Approuvé par:

Date: 2019-10-23

RAPPORT D'ESSAIS LABORATOIRE

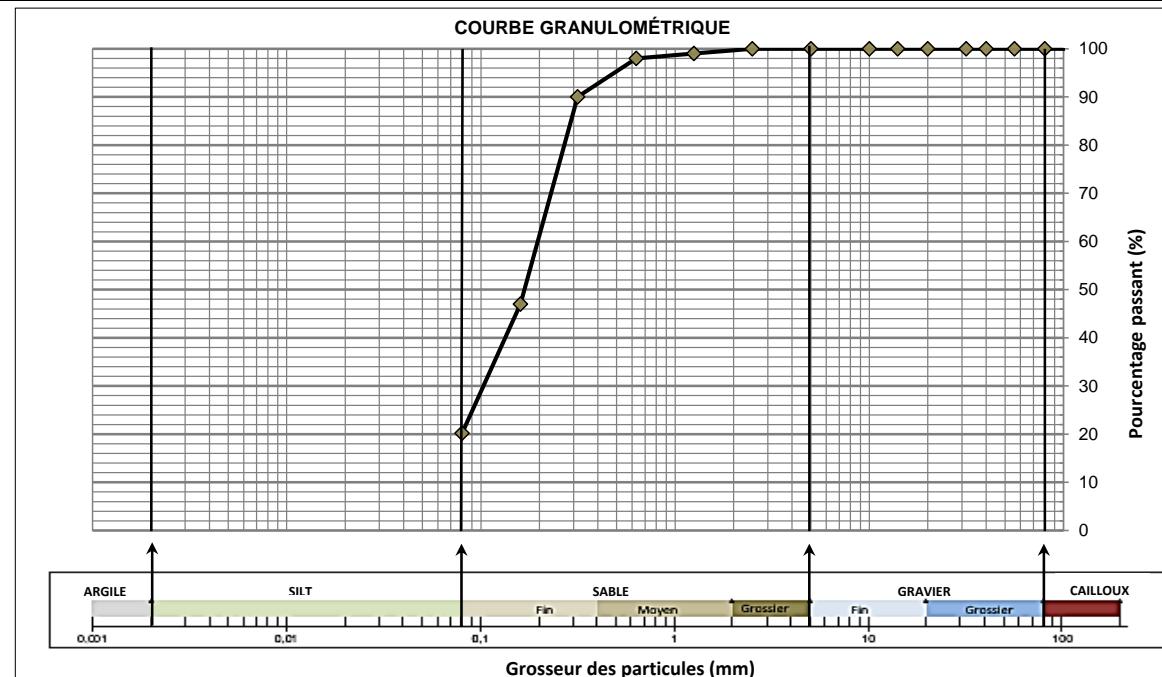
ESSAIS SUR SOLS, GRANULATS ET AUTRES ESSAIS

No. Dossier: P1905-1168-03
Nom projet: Caractérisation des berges
Client: CIMA+
No.référence: EM-21
No.Échantillon: 4026

Prélevé par: Client
Prélevé le: oct-19
Provenance: In situ
Localisation: Rivière Bulstrode
Essais complétés le: 2019-10-23

Type matériau: Matériaux en place
Calibre (fuseaux):
Usage:
Prélèvement: À la source
Tonnage:

Analyse granulométrique			
LC 21-040 <input checked="" type="checkbox"/>	BNQ 2501-02 <input type="checkbox"/>	CSA A23.2-2A <input type="checkbox"/>	
Diamètre (mm)	Passant (%)	Fuseaux	
		Min.	Max.
112	100		
80	100		
56	100		
40	100		
31,5	100		
20	100		
14	100		
10	100		
5	100		
2,5	100		
1,25	99		
0,630	98		
0,315	90		
0,160	47		
0,080	20,2		



Description granulométrique:
Symbole USCS:

Essai Proctor Modifié (BNQ 2501-255)

Méthode d'essai:
Masse vol. sèche maximale: 0 kg/m³
Humidité optimale: 0,0 %

Gravier(%):	0
Sable(%):	79,8
Silt ^(%):	20,2
Argile(%):	
Cu:	
Cc:	
D ₁₀ :	
D ₁₅ :	
D ₃₀ :	0,1031
D ₅₀ :	0,1677
D ₆₀ :	0,1964
Module finesse	0,66

* Non-conformité

A: Lorsque le pourcentage d'argile n'est pas précisé, ce dernier est inclus.

PROPRIÉTÉ PHYSIQUES ET MÉCANIQUES DE L'ÉCHANTILLON

	ESSAI LABORATOIRE	NORME	RÉSULTAT	EXIGENCES/SPÉCIFICATIONS
Cu:				
Cc:				
D ₁₀ :				
D ₁₅ :				
D ₃₀ :				
D ₅₀ :				
D ₆₀ :				

REMARQUES:

Préparé par:

Casey Johann, ing. jr

Date: 2019-10-23

Approuvé par:


Casey Johann, ing. jr

Date: 2019-10-23

RAPPORT D'ESSAIS LABORATOIRE

ESSAIS SUR SOLS, GRANULATS ET AUTRES ESSAIS

No. Dossier: P1905-1168-03

Nom projet: Caractérisation des berges

Client: CIMA+

No.référence: EM-22

No.Échantillon: 4027

Prélevé par: Client

Prélevé le: oct-19

Provenance: In situ

Localisation: Rivière Bulstrode

Essais complétés le: 2019-10-23

Type matériau: Matériaux en place

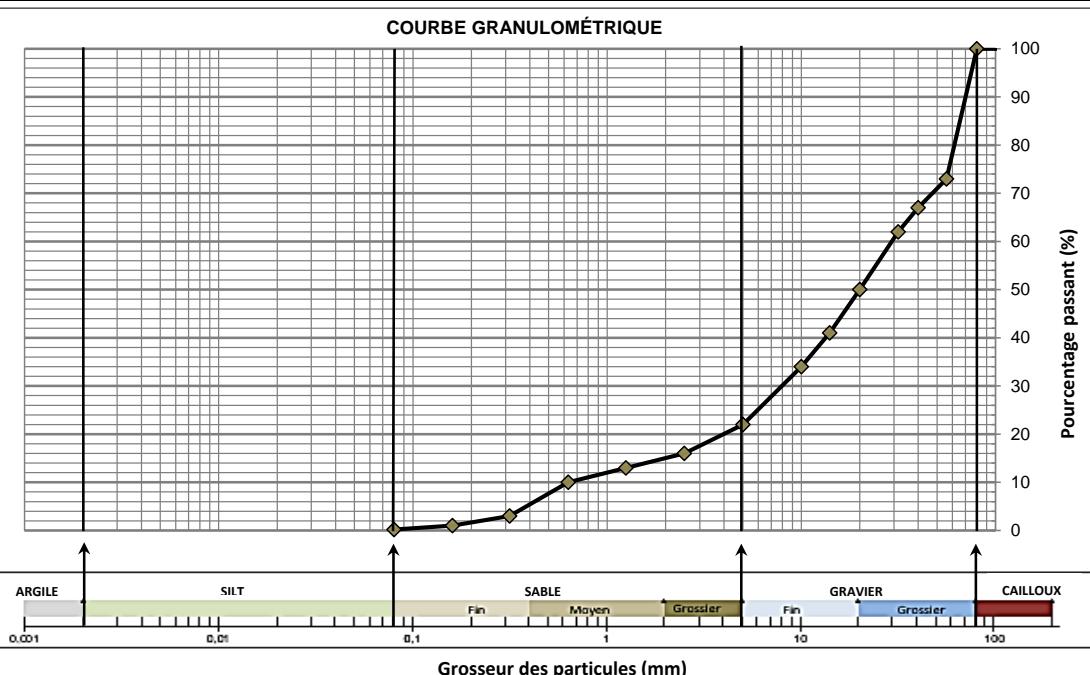
Calibre (fuseaux):

Usage:

Prélèvement: À la source

Tonnage:

Analyse granulométrique			
Diamètre (mm)	Passant (%)	Fuseaux	
		Min.	Max.
112	100		
80	100		
56	73		
40	67		
31,5	62		
20	50		
14	41		
10	34		
5	22		
2,5	16		
1,25	13		
0,630	10		
0,315	3		
0,160	1		
0,080	0,2		



Description granulométrique:
Symbole USCS:

Essai Proctor Modifié (BNQ 2501-255)

Méthode d'essai:

Masse vol. sèche maximale:

0 kg/m³

Humidité optimale:

0,0 %

Gravier(%):	78
Sable(%):	21,8
Silt ^(%):	0,2
Argile(%):	
Cu:	46,4
Cc:	3,4
D ₁₀ :	0,6300
D ₁₅ :	1,9843
D ₃₀ :	7,9370
D ₅₀ :	20,0000
D ₆₀ :	29,2032
Module finesse	5,35

* Non-conformité

A: Lorsque le pourcentage d'argile n'est pas précisé, ce dernier est inclus.

PROPRIÉTÉ PHYSIQUES ET MÉCANIQUES DE L'ÉCHANTILLON

	ESSAI LABORATOIRE	NORME	RÉSULTAT	EXIGENCES/SPÉCIFICATIONS
Cu:				
Cc:				
D ₁₀ :				
D ₁₅ :				
D ₃₀ :				
D ₅₀ :				
D ₆₀ :				
Module finesse				

REMARQUES:

Préparé par:

Casey Johann, ing. jr

Date: 2019-10-23

Approuvé par:


Casey Johann, ing. jr

Date: 2019-10-23

RAPPORT D'ESSAIS LABORATOIRE

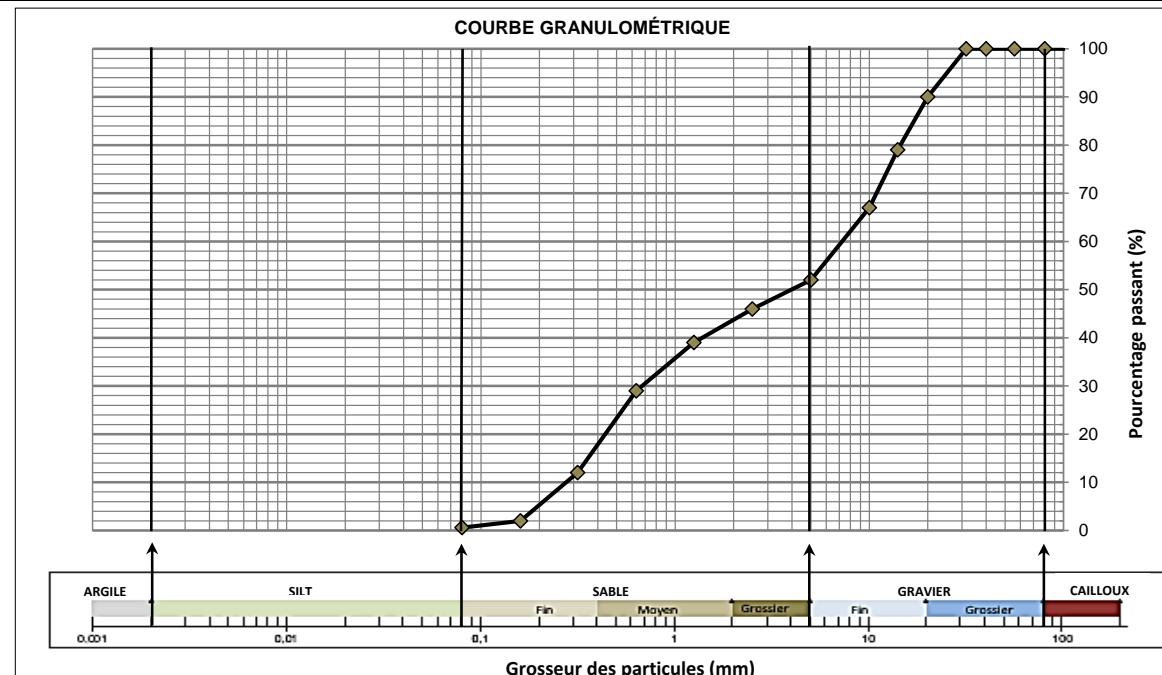
ESSAIS SUR SOLS, GRANULATS ET AUTRES ESSAIS

No. Dossier: P1905-1168-03
Nom projet: Caractérisation des berges
Client: CIMA+
No.référence: EM-23
No.Échantillon: 4028

Prélevé par: Client
Prélevé le: oct-19
Provenance: In situ
Localisation: Rivière Bulstrode
Essais complétés le: 2019-10-23

Type matériau: Matériaux en place
Calibre (fuseaux):
Usage:
Prélèvement: À la source
Tonnage:

Analyse granulométrique			
LC 21-040 <input checked="" type="checkbox"/>	BNQ 2501-02 <input type="checkbox"/>	CSA A23.2-2A <input type="checkbox"/>	
Diamètre (mm)	Passant (%)	Fuseaux	
		Min.	Max.
112	100		
80	100		
56	100		
40	100		
31,5	100		
20	90		
14	79		
10	67		
5	52		
2,5	46		
1,25	39		
0,630	29		
0,315	12		
0,160	2		
0,080	0,6		



Description granulométrique:
Symbole USCS:

Essai Proctor Modifié (BNQ 2501-255)

Méthode d'essai:
Masse vol. sèche maximale: 0 kg/m³
Humidité optimale: 0,0 %

Gravier(%):	48
Sable(%):	51,4
Silt ^(%):	0,6
Argile(%):	
Cu:	26,3
Cc:	0,2
D ₁₀ :	0,2751
D ₁₅ :	0,3560
D ₃₀ :	0,6747
D ₅₀ :	3,9685
D ₆₀ :	7,2363
Module finesse	4,20

* Non-conformité

A: Lorsque le pourcentage d'argile n'est pas précisé, ce dernier est inclus.

PROPRIÉTÉ PHYSIQUES ET MÉCANIQUES DE L'ÉCHANTILLON

ESSAI LABORATOIRE	NORME	RÉSULTAT	EXIGENCES/SPÉCIFICATIONS

REMARQUES:

Préparé par:

Casey Johann, ing. jr

Date: 2019-10-23

Approuvé par:

Casey Johann ing. jr

Date: 2019-10-23

RAPPORT D'ESSAIS LABORATOIRE

ESSAIS SUR SOLS, GRANULATS ET AUTRES ESSAIS

No. Dossier: P1905-1168-03

Nom projet: Caractérisation des berges

Client: CIMA+

No.référence: EM-24

No.Échantillon: 4029

Prélevé par: Client

Prélevé le: oct-19

Provenance: In situ

Localisation: Rivière Bulstrode

Essais complétés le: 2019-10-23

Type matériau: Matériaux en place

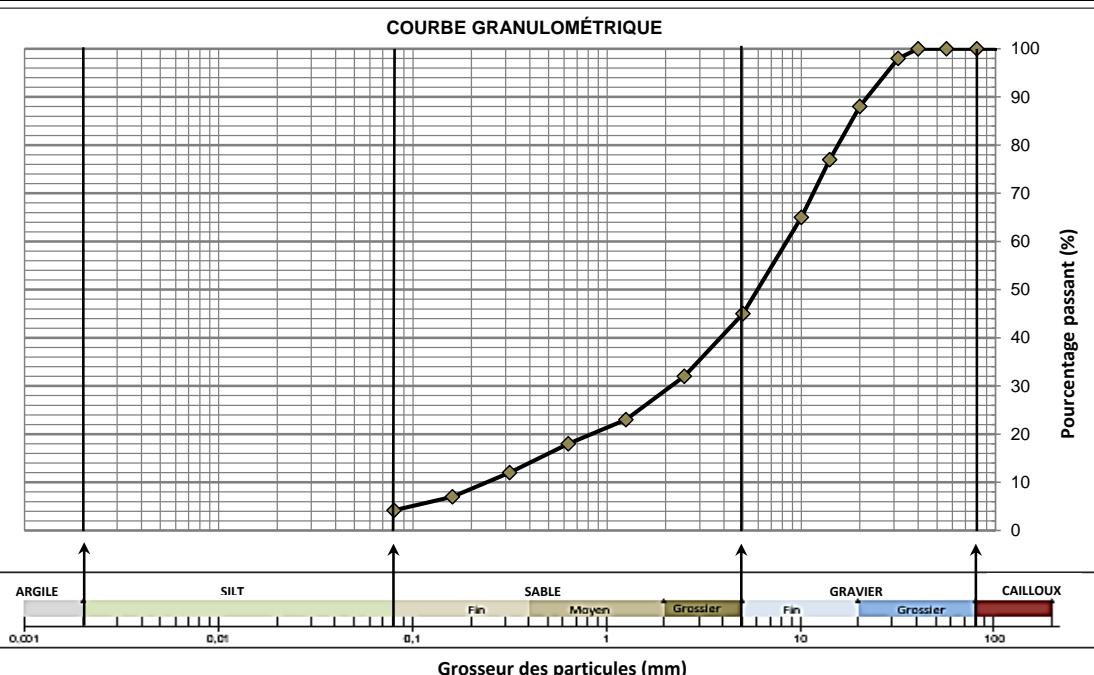
Calibre (fuseaux):

Usage:

Prélèvement: À la source

Tonnage:

Analyse granulométrique					
LC 21-040 <input checked="" type="checkbox"/>		BNQ 2501-02 <input type="checkbox"/>		CSA A23.2-2A <input type="checkbox"/>	
Diamètre (mm)	Passant (%)	Fuseaux			
		Min.	Max.		
112	100				
80	100				
56	100				
40	100				
31,5	98				
20	88				
14	77				
10	65				
5	45				
2,5	32				
1,25	23				
0,630	18				
0,315	12				
0,160	7				
0,080	4,2				



Description granulométrique:

Symbol USCS:

Essai Proctor Modifié (BNQ 2501-255)

Méthode d'essai:

Masse vol. sèche maximale:

0 kg/m³

Humidité optimale:

0,0 %

Gravier(%):	55
Sable(%):	40,8
Silt (%):	4,2
Argile(%):	
Cu:	35,0
Cc:	2,3
D ₁₀ :	0,2402
D ₁₅ :	0,4455
D ₃₀ :	2,1431
D ₅₀ :	5,9460
D ₆₀ :	8,4090
Module finesse	4,63

* Non-conformité

A: Lorsque le pourcentage d'argile n'est pas précisé, ce dernier est inclus.

PROPRIÉTÉ PHYSIQUES ET MÉCANIQUES DE L'ÉCHANTILLON

ESSAI LABORATOIRE	NORME	RÉSULTAT	EXIGENCES/SPÉCIFICATIONS

REMARQUES:

Préparé par:

Casey Johann, ing. jr

Date: 2019-10-23

Approuvé par:

Casey Johann, ing. jr

Date: 2019-10-23

RAPPORT D'ESSAIS LABORATOIRE

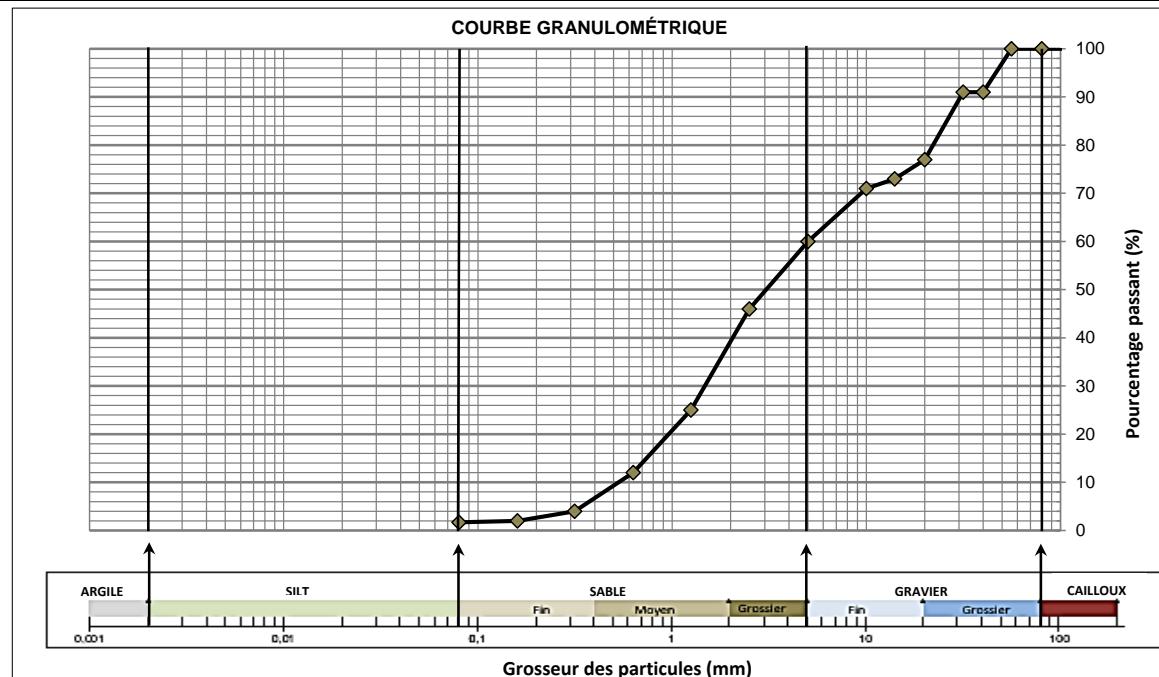
ESSAIS SUR SOLS, GRANULATS ET AUTRES ESSAIS

No. Dossier: P1905-1168-03
Nom projet: Caractérisation des berges
Client: CIMA+
No.référence: EM-25
No.Échantillon: 4030

Prélevé par: Client
Prélevé le: oct-19
Provenance: In situ
Localisation: Rivière Bulstrode
Essais complétés le: 2019-10-23

Type matériau: Matériaux en place
Calibre (fuseaux):
Usage:
Prélèvement: À la source
Tonnage:

Analyse granulométrique			
LC 21-040 <input checked="" type="checkbox"/>	BNQ 2501-02 <input type="checkbox"/>	CSA A23.2-2A <input type="checkbox"/>	
Diamètre (mm)	Passant (%)	Fuseaux	
		Min.	Max.
112	100		
80	100		
56	100		
40	91		
31,5	91		
20	77		
14	73		
10	71		
5	60		
2,5	46		
1,25	25		
0,630	12		
0,315	4		
0,160	2		
0,080	1,7		



Description granulométrique:
Symbole USCS:

Essai Proctor Modifié (BNQ 2501-255)

Méthode d'essai:
Masse vol. sèche maximale: 0 kg/m³
Humidité optimale: 0,0 %

Gravier(%):	40
Sable(%):	58,3
Silt ^(%):	1,7
Argile(%):	
Cu:	9,4
Cc:	0,8
D ₁₀ :	0,5298
D ₁₅ :	0,7379
D ₃₀ :	1,4743
D ₅₀ :	3,0475
D ₆₀ :	5,0000
Module finesse	4,51

* Non-conformité

A: Lorsque le pourcentage d'argile n'est pas précisé, ce dernier est inclus.

PROPRIÉTÉ PHYSIQUES ET MÉCANIQUES DE L'ÉCHANTILLON

	ESSAI LABORATOIRE	NORME	RÉSULTAT	EXIGENCES/SPÉCIFICATIONS
Cu:				
Cc:				
D ₁₀ :				
D ₁₅ :				
D ₃₀ :				
D ₅₀ :				
D ₆₀ :				

REMARQUES:

Préparé par:

Casey Johann, ing. jr

Date: 2019-10-23

Approuvé par:

Casey Johann, ing. jr

Date: 2019-10-23

RAPPORT D'ESSAIS LABORATOIRE

ESSAIS SUR SOLS, GRANULATS ET AUTRES ESSAIS

No. Dossier: P1905-1168-03

Nom projet: Caractérisation des berges

Client: CIMA+

No.référence: EM-26

No.Échantillon: 4031

Prélevé par: Client

Prélevé le: oct-19

Provenance: In situ

Localisation: Rivière Bulstrode

Essais complétés le: 2019-10-23

Type matériau: Matériaux en place

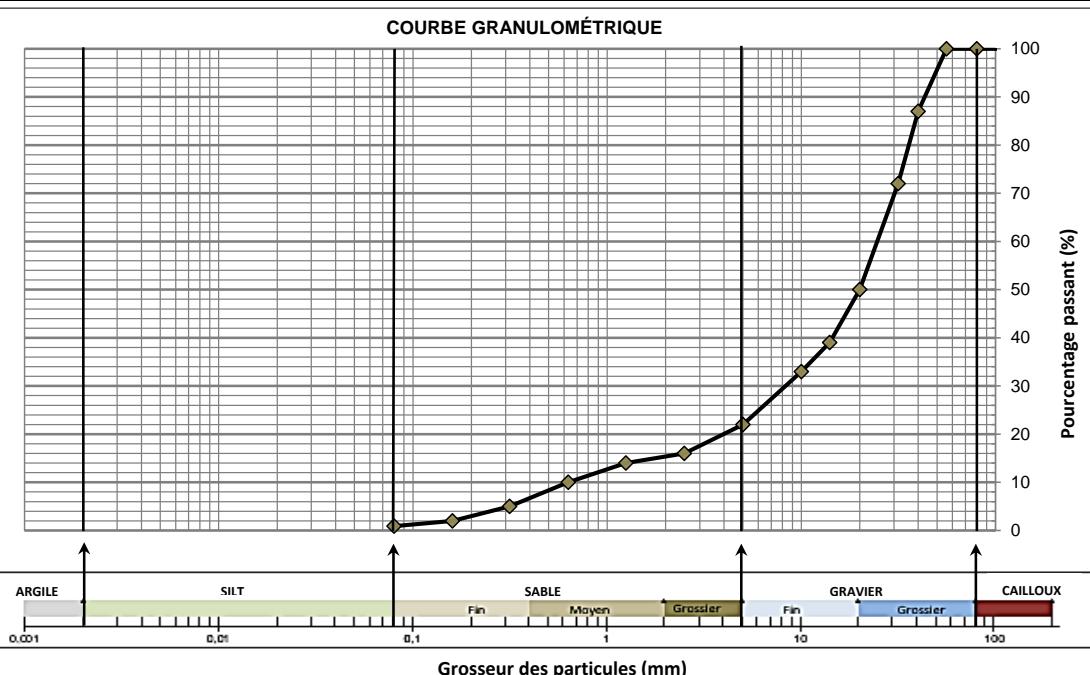
Calibre (fuseaux):

Usage:

Prélèvement: À la source

Tonnage:

Analyse granulométrique			
Diamètre (mm)	Passant (%)	Fuseaux	
		Min.	Max.
112	100		
80	100		
56	100		
40	87		
31,5	72		
20	50		
14	39		
10	33		
5	22		
2,5	16		
1,25	14		
0,630	10		
0,315	5		
0,160	2		
0,080	0,9		



Description granulométrique:
Symbole USCS:

Essai Proctor Modifié (BNQ 2501-255)

Méthode d'essai:

Masse vol. sèche maximale:

0 kg/m³

Humidité optimale:

0,0 %

Gravier(%):	78
Sable(%):	21,1
Silt ^(%):	0,9
Argile(%):	
Cu:	39,0
Cc:	4,4
D ₁₀ :	0,6300
D ₁₅ :	1,7678
D ₃₀ :	8,2775
D ₅₀ :	20,0000
D ₆₀ :	24,5869
Module finesse	5,31

* Non-conformité

A: Lorsque le pourcentage d'argile n'est pas précisé, ce dernier est inclus.

PROPRIÉTÉ PHYSIQUES ET MÉCANIQUES DE L'ÉCHANTILLON

ESSAI LABORATOIRE

NORME

RÉSULTAT

EXIGENCES/SPÉCIFICATIONS

REMARQUES:

Préparé par:

Casey Johann, ing. jr

Date: 2019-10-23

Approuvé par:


Casey Johann, ing. jr

Date: 2019-10-23

RAPPORT D'ESSAIS LABORATOIRE

ESSAIS SUR SOLS, GRANULATS ET AUTRES ESSAIS

No. Dossier: P1905-1168-03

Nom projet: Caractérisation des berges

Client: CIMA+

No.référence: EM-27

No.Échantillon: 4032

Prélevé par: Client

Prélevé le: oct-19

Provenance: In situ

Localisation: Rivière Bulstrode

Essais complétés le: 2019-10-23

Type matériau: Matériaux en place

Calibre (fuseaux):

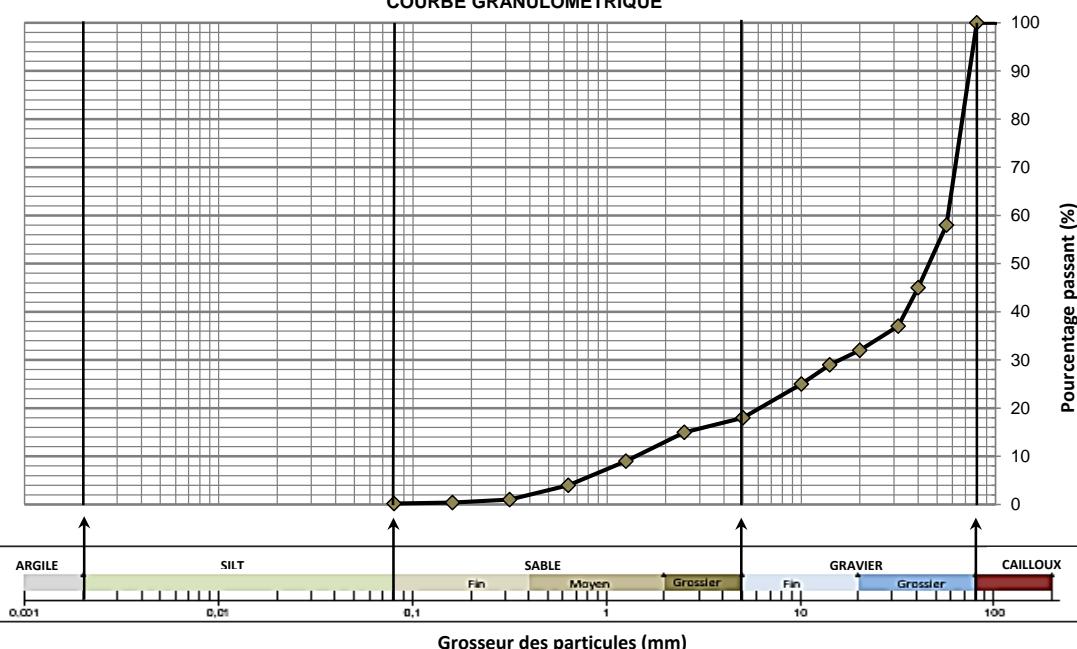
Usage:

Prélèvement: À la source

Tonnage:

Analyse granulométrique			
Diamètre (mm)	Passant (%)	Fuseaux	
		Min.	Max.
112	100		
80	100		
56	58		
40	45		
31,5	37		
20	32		
14	29		
10	25		
5	18		
2,5	15		
1,25	9		
0,630	4		
0,315	1		
0,160	0,4		
0,080	0,2		

COURBE GRANULOMÉTRIQUE



Description granulométrique:

Symbol USCS:

Essai Proctor Modifié (BNQ 2501-255)

Méthode d'essai:

Masse vol. sèche maximale:

0 kg/m³

Humidité optimale:

0,0 %

Gravier(%):	82
Sable(%):	17,8
Silt ^(%):	0,2
Argile(%):	
Cu:	40,6
Cc:	3,1
D ₁₀ :	1,4031
D ₁₅ :	2,5000
D ₃₀ :	15,7675
D ₅₀ :	45,5264
D ₆₀ :	56,9593
Module finesse	5,53

* Non-conformité

A: Lorsque le pourcentage d'argile n'est pas précisé, ce dernier est inclus.

PROPRIÉTÉ PHYSIQUES ET MÉCANIQUES DE L'ÉCHANTILLON

	ESSAI LABORATOIRE	NORME	RÉSULTAT	EXIGENCES/SPÉCIFICATIONS
Cu:				
Cc:				
D ₁₀ :				
D ₁₅ :				
D ₃₀ :				
D ₅₀ :				
D ₆₀ :				
Module finesse				

REMARQUES:

Préparé par:

Casey Johann, ing. jr

Date: 2019-10-23

Approuvé par:


Casey Johann, ing. jr

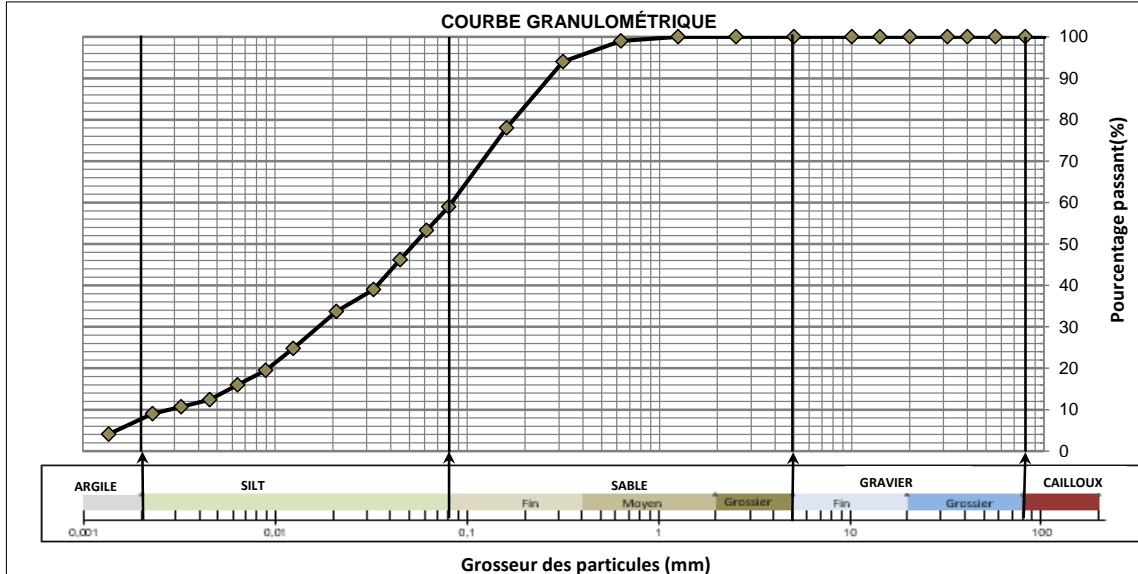
Date: 2019-10-23

RAPPORT D'ESSAIS LABORATOIRE
GÉOTECHNIQUE-ESSAIS SUR SOLS, GRANULATS ET AUTRES ESSAIS

No. Dossier: P1905-1168-03
Nom projet: Caractérisation des berges, Rivière Bulstrode
Client: CIMA+ : Dossier HS00233
Prélevé : oct-19
Prélevé par: Guillaume Lapointe

Sondage:
Échantillon: EM28
Profondeur:
No. réf. éch. labo: 5617
Essais complétés le: 2019-12-03

Type matériau: Matériaux en place
Calibre (fuseaux):
Usage:



Description granulométrique:

Symbole USCS:

DÉTERMINATION DE LA LIMITÉ DE LIQUIDITÉ ET DE LA LIMITÉ DE PLASTICITÉ (BNQ 2501-092)

Méthode opératoire:	Teneur en eau naturelle (%) w_N :
Mode opératoire:	Limite de liquidité (%) w_{LC} :
Préparation sols séchage:	Limite de plasticité (%) w_p :
	Indice de plasticité (%) I_p :
	Indice de liquidité I_{LC} :

ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE (LC 21-040, BNQ 2501-025)			
Diamètre (mm)	Passant (%)	Fuseaux	
		Min.	Max.
112	100		
80	100		
56	100		
40	100		
31,5	100		
20	100		
14	100		
10	100		
5	100		
2,5	100		
1,25	100		
0,630	99		
0,315	94		
0,160	78		
0,080	59,0		
		Gravier(%):	0
0,0615	53,3	Sable(%):	41,0
0,0448	46,2	Silt (%):	51,3
0,0325	39,0	Argile(%):	7,7
0,0208	33,7	Cu:	29,6
0,0124	24,8	Cc:	1,2
0,0089	19,5	D10:	0,0028
0,0064	16,0	D15:	0,0058
0,0046	12,4	D30:	0,0168
0,0032	10,7	D50:	0,0531
0,0023	9,0	D60:	0,0830
0,0014	4,1	D85:	0,2152

Légende: A: Lorsque le pourcentage d'argile n'est pas précisé, ce dernier est inclus.
*: Non-conformité

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES ET MÉCANIQUES DE L'ÉCHANTILLON				
ESSAI LABORATOIRE	NORME	RÉSULTAT	EXIGENCES	REMARQUES

Préparé par : _____

Sylvie Daigle techn.sr

Date: 2019-12-03

Approuvé par: _____


Casey Johann ing.jr

Date: 2019-12-03

RAPPORT D'ESSAIS LABORATOIRE

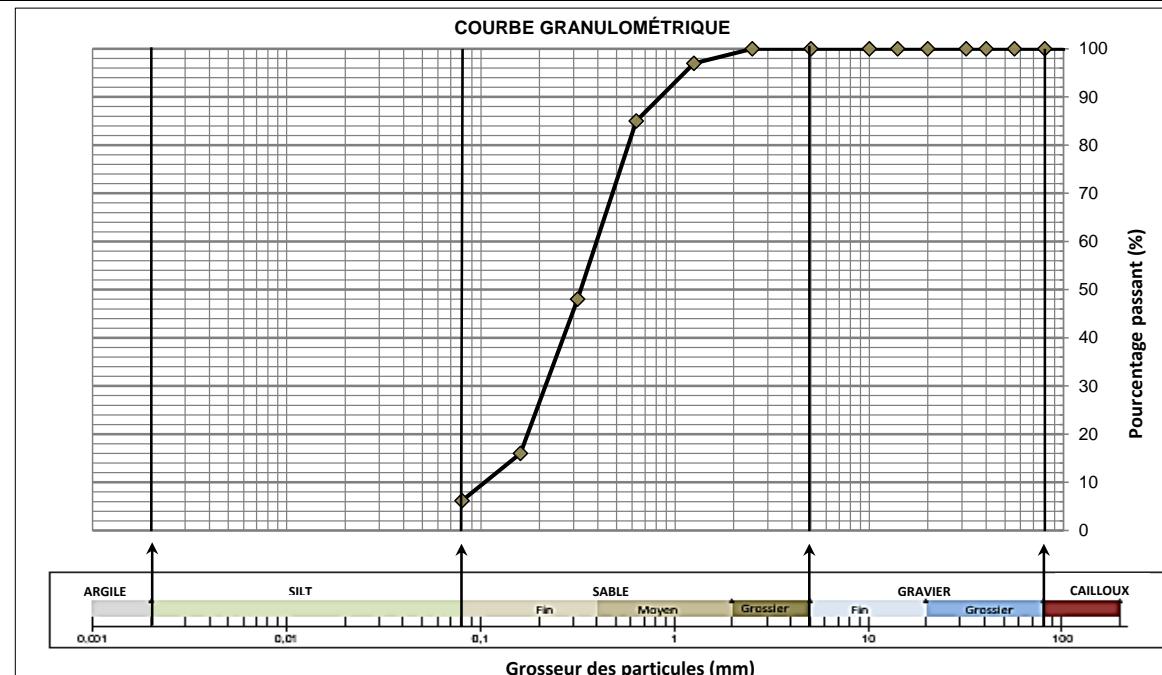
ESSAIS SUR SOLS, GRANULATS ET AUTRES ESSAIS

No. Dossier: P1905-1168-03
Nom projet: Caractérisation des berges
Client: CIMA+
No.référence: EM-29
No.Échantillon: 4033

Prélevé par: Client
Prélevé le: oct-19
Provenance: In situ
Localisation: Rivière Bulstrode
Essais complétés le: 2019-10-23

Type matériau: Matériaux en place
Calibre (fuseaux):
Usage:
Prélèvement: À la source
Tonnage:

Analyse granulométrique			
Diamètre (mm)	Passant (%)	Fuseaux	
		Min.	Max.
112	100		
80	100		
56	100		
40	100		
31,5	100		
20	100		
14	100		
10	100		
5	100		
2,5	100		
1,25	97		
0,630	85		
0,315	48		
0,160	16		
0,080	6,2		



Description granulométrique:
Symbole USCS:

Essai Proctor Modifié (BNQ 2501-255)

Méthode d'essai:

0 kg/m³

Masse vol. sèche maximale:

0,0 %

Humidité optimale:

Gravier(%):	0
Sable(%):	93,8
Silt ^(%):	6,2
Argile(%):	
Cu:	3,8
Cc:	1,1
D ₁₀ :	0,1047
D ₁₅ :	0,1491
D ₃₀ :	0,2152
D ₅₀ :	0,3270
D ₆₀ :	0,3944
Module finesse	1,55

* Non-conformité

A: Lorsque le pourcentage d'argile n'est pas précisé, ce dernier est inclus.

PROPRIÉTÉ PHYSIQUES ET MÉCANIQUES DE L'ÉCHANTILLON

	ESSAI LABORATOIRE	NORME	RÉSULTAT	EXIGENCES/SPÉCIFICATIONS
Cu:				
Cc:				
D ₁₀ :				
D ₁₅ :				
D ₃₀ :				
D ₅₀ :				
D ₆₀ :				
Module finesse				

REMARQUES:

Préparé par:

Casey Johann, ing. jr

Date: 2019-10-23

Approuvé par:

Date: 2019-10-23

RAPPORT D'ESSAIS LABORATOIRE

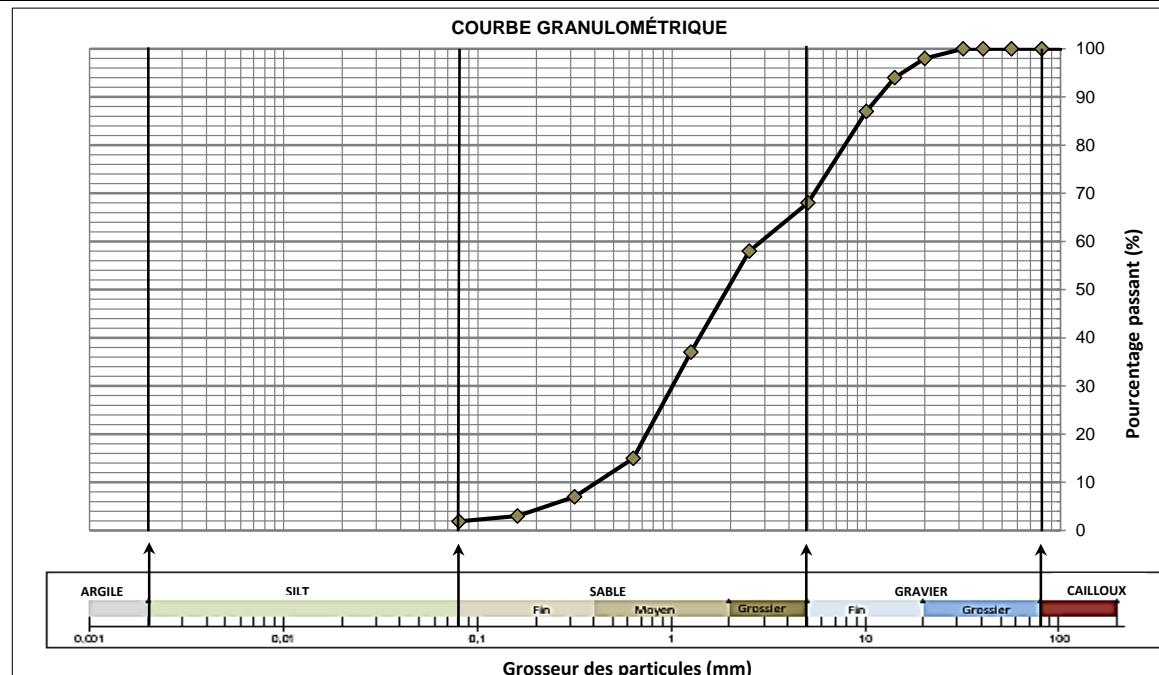
ESSAIS SUR SOLS, GRANULATS ET AUTRES ESSAIS

No. Dossier: P1905-1168-03
Nom projet: Caractérisation des berges
Client: CIMA+
No.référence: EM-30
No.Échantillon: 4034

Prélevé par: Client
Prélevé le: oct-19
Provenance: In situ
Localisation: Rivière Bulstrode
Essais complétés le: 2019-10-23

Type matériau: Matériaux en place
Calibre (fuseaux):
Usage:
Prélèvement: À la source
Tonnage:

Analyse granulométrique			
LC 21-040 <input checked="" type="checkbox"/>	BNQ 2501-02 <input type="checkbox"/>	CSA A23.2-2A <input type="checkbox"/>	
Diamètre (mm)	Passant (%)	Fuseaux	
		Min.	Max.
112	100		
80	100		
56	100		
40	100		
31,5	100		
20	98		
14	94		
10	87		
5	68		
2,5	58		
1,25	37		
0,630	15		
0,315	7		
0,160	3		
0,080	1,9		



Description granulométrique:
Symbole USCS:

Essai Proctor Modifié (BNQ 2501-255)

Méthode d'essai:
Masse vol. sèche maximale: 0 kg/m³
Humidité optimale: 0,0 %

Gravier(%):	32
Sable(%):	66,1
Silt ^(%):	1,9
Argile(%):	
Cu:	7,0
Cc:	0,9
D ₁₀ :	0,4085
D ₁₅ :	0,6300
D ₃₀ :	1,0051
D ₅₀ :	1,9198
D ₆₀ :	2,8717
Module finesse	4,13

* Non-conformité

A: Lorsque le pourcentage d'argile n'est pas précisé, ce dernier est inclus.

PROPRIÉTÉ PHYSIQUES ET MÉCANIQUES DE L'ÉCHANTILLON

	ESSAI LABORATOIRE	NORME	RÉSULTAT	EXIGENCES/SPÉCIFICATIONS
Cu:	7,0			
Cc:	0,9			
D ₁₀ :	0,4085			
D ₁₅ :	0,6300			
D ₃₀ :	1,0051			
D ₅₀ :	1,9198			
D ₆₀ :	2,8717			
Module finesse	4,13			

REMARQUES:

Préparé par:

Casey Johann, ing. jr

Date: 2019-10-23

Approuvé par:

Date: 2019-10-23

RAPPORT D'ESSAIS LABORATOIRE

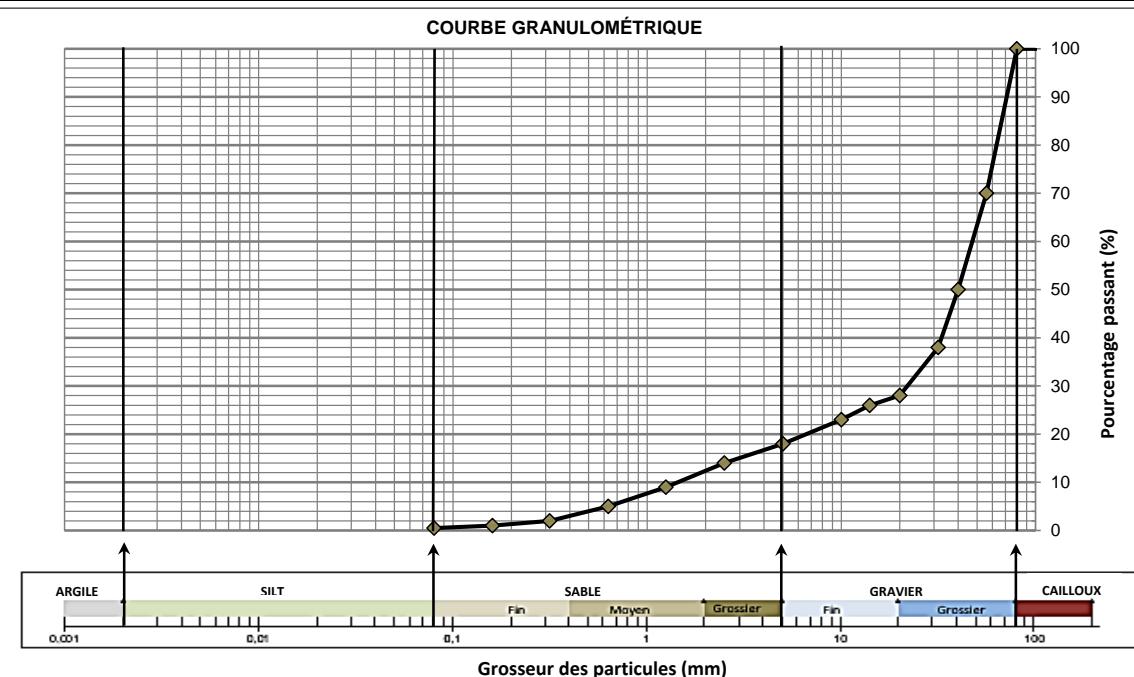
ESSAIS SUR SOLS, GRANULATS ET AUTRES ESSAIS

No. Dossier: P1905-1168-03
Nom projet: Caractérisation des berges
Client: CIMA+
No.référence: EM-31
No.Échantillon: 4035

Prélevé par: Client
Prélevé le: oct-19
Provenance: In situ
Localisation: Rivière Bulstrode
Essais complétés le: 2019-10-23

Type matériau: Matériaux en place
Calibre (fuseaux):
Usage:
Prélèvement: À la source
Tonnage:

Analyse granulométrique			
LC 21-040 <input checked="" type="checkbox"/>	BNQ 2501-02 <input type="checkbox"/>	CSA A23.2-2A <input type="checkbox"/>	
Diamètre (mm)	Passant (%)	Fuseaux	
		Min.	Max.
112	100		
80	100		
56	70		
40	50		
31,5	38		
20	28		
14	26		
10	23		
5	18		
2,5	14		
1,25	9		
0,630	5		
0,315	2		
0,160	1		
0,080	0,5		



Gravier(%):	82
Sable(%):	17,5
Silt ^(%):	0,5
Argile(%):	
Cu:	33,0
Cc:	7,1
D10:	1,4359
D15:	2,9730
D30:	21,9021
D50:	40,0000
D60:	47,3286
Module finesse	5,52

■ * Non-conformite

A: Lorsque le pourcentage d'argile n'est pas précisé, ce dernier est inclus.

PROPRIÉTÉ PHYSIQUES ET MÉCANIQUES DE L'ÉCHANTILLON

REMARQUES

Préparé par :

Date: 2019-10-23

Approuvé par:

Casey Johnson

Date: 2019-10-23

Notes : Ce rapport ne doit pas être reproduit, sans l'autorisation écrite de Protekna Services Techniques inc. Le résultat s'applique exclusivement à l'échantillon analysé.

RAPPORT D'ESSAIS LABORATOIRE

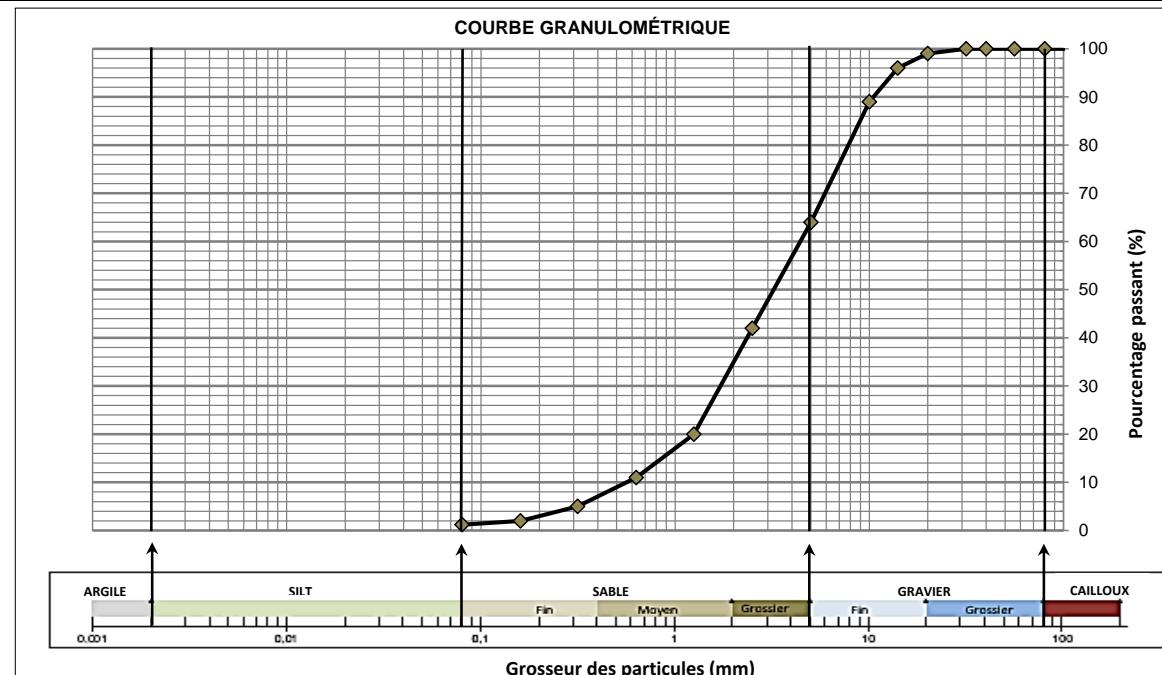
ESSAIS SUR SOLS, GRANULATS ET AUTRES ESSAIS

No. Dossier: P1905-1168-03
Nom projet: Caractérisation des berges
Client: CIMA+
No.référence: EM-32
No.Échantillon: 4036

Prélevé par: Client
Prélevé le: oct-19
Provenance: In situ
Localisation: Rivière Bulstrode
Essais complétés le: 2019-10-23

Type matériau: Matériaux en place
Calibre (fuseaux):
Usage:
Prélèvement: À la source
Tonnage:

Analyse granulométrique			
Diamètre (mm)	Passant (%)	Fuseaux	
		Min.	Max.
112	100		
80	100		
56	100		
40	100		
31,5	100		
20	99		
14	96		
10	89		
5	64		
2,5	42		
1,25	20		
0,630	11		
0,315	5		
0,160	2		
0,080	1,2		



Description granulométrique:
Symbole USCS:

Essai Proctor Modifié (BNQ 2501-255)

Méthode d'essai:
Masse vol. sèche maximale: 0 kg/m³
Humidité optimale: 0,0 %

Gravier(%):	36
Sable(%):	62,8
Silt ^(%):	1,2
Argile(%):	
Cu:	7,9
Cc:	1,2
D ₁₀ :	0,5613
D ₁₅ :	0,8543
D ₃₀ :	1,7129
D ₅₀ :	3,2167
D ₆₀ :	4,4080
Module finesse	4,55

* Non-conformité

A: Lorsque le pourcentage d'argile n'est pas précisé, ce dernier est inclus.

PROPRIÉTÉ PHYSIQUES ET MÉCANIQUES DE L'ÉCHANTILLON

	ESSAI LABORATOIRE	NORME	RÉSULTAT	EXIGENCES/SPÉCIFICATIONS
Cu:	7,9			
Cc:	1,2			
D ₁₀ :	0,5613			
D ₁₅ :	0,8543			
D ₃₀ :	1,7129			
D ₅₀ :	3,2167			
D ₆₀ :	4,4080			
Module finesse	4,55			

REMARQUES:

Préparé par:

Casey Johann, ing. jr

Date: 2019-10-23

Approuvé par:


Casey Johann

Date: 2019-10-23

B

Annexe B Relevé des ouvrages sur le tronçon de la Bulstrode



T: 514-389-2802
300-740, rue Notre-Dame-Ouest, Montréal QC H3C 3M6 CANADA

Vue en plan du barrage Sainte-Sophie



NOTES:

CIMA+

T-214-309-2002
800-740, rue Notre-Dame-Ouest, Montréal QC H3C 3M6 CANADA

Vue en plan du barrage de Princeville

DESSINÉ PAR :	ÉCHELLE :
A. Guérin-H.	1:150
CONÇU PAR :	DATE :
-	2020/02/24
VÉRIFIÉ PAR :	DESSIN No:
-	Figure B.2



NOTES

CIMA+

T: 514-332-2462
388-740, rue Notre-Dame-Gauch, Montréal QC H3C 3M6 CA

Vue en plan du pont de la route Lambert

DESSINÉ PAR :	ÉCHELLE :
A. Guérin-H.	1:150
CONÇU PAR :	DATE :
-	2020/02/24
VÉRIFIÉ PAR :	DESSIN No:
-	Figure B.3



NOTES:

CIMA+

T-514-389-2000
800-740, rue Notre-Dame-Ouest, Montréal QC H3C 3P6 CANADA

Vue en plan du pont de VTT

DESSINÉ PAR :	ÉCHELLE :
A. Guérin-H.	1:150
CONÇU PAR :	DATE :
-	2020/02/24
VÉRIFIÉ PAR :	DESSIN No:
-	Figure B.4



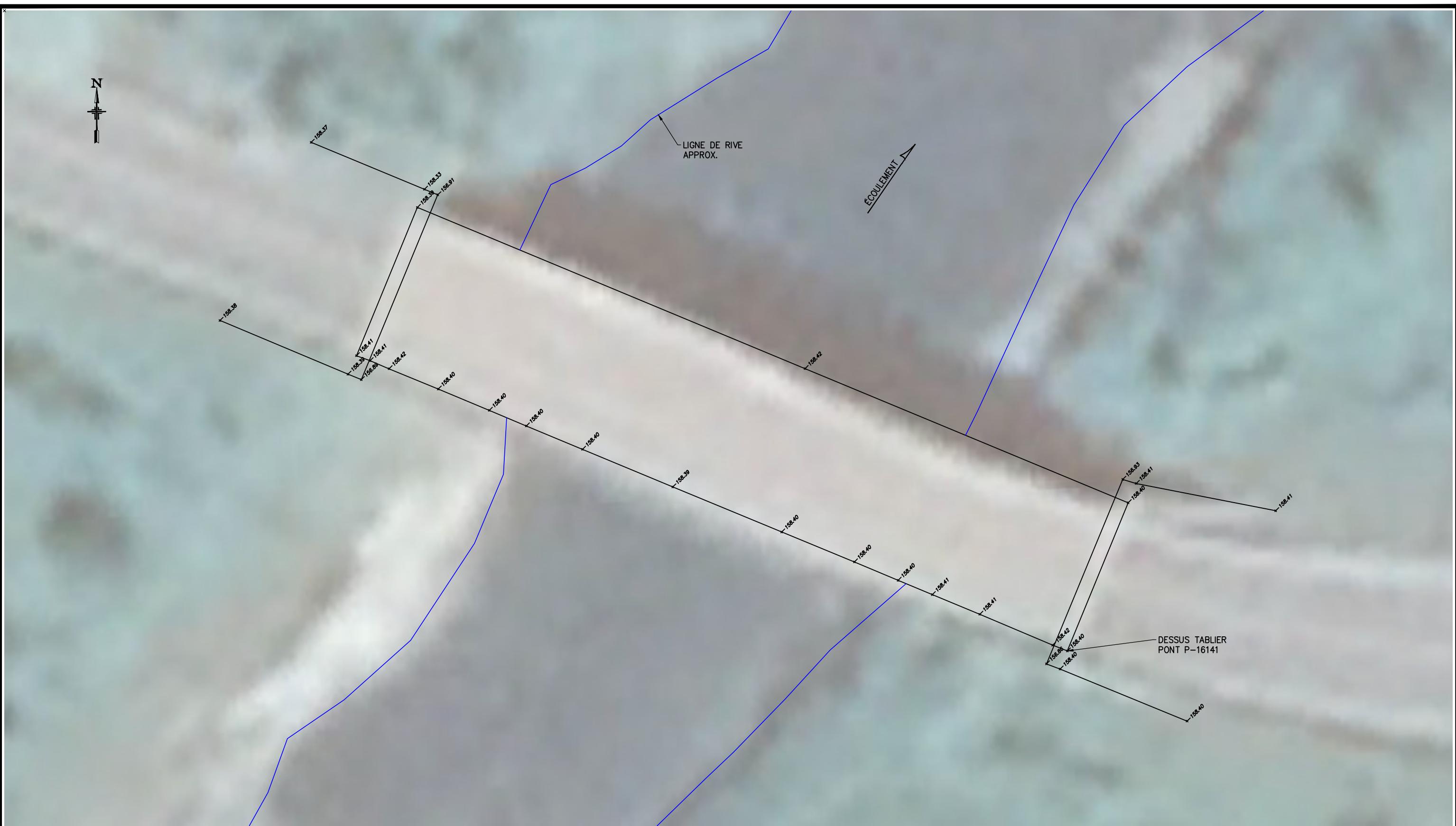
NOTES

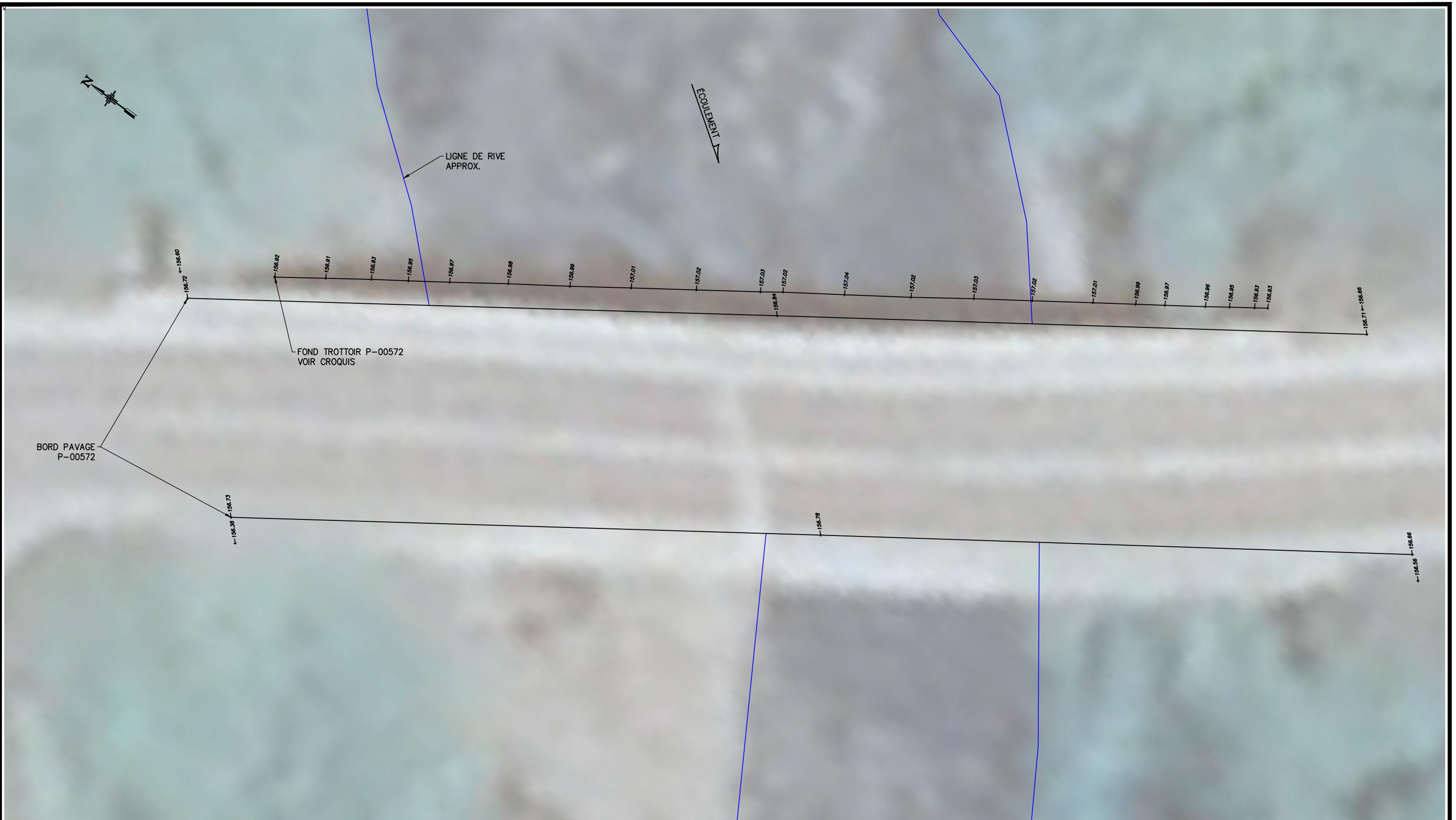
CIMA

T: 514-333-2462
880-740, rue Notre-Dame-Gauch, Montréal QC H3C 3M6 CA

Vue en plan du pont du 13e rang

DESSINÉ PAR :	ÉCHELLE :
A. Guérin-H.	1:150
CONÇU PAR :	DATE :
-	2020/02/24
VÉRIFIÉ PAR :	DESSIN No:
-	Figure B.5





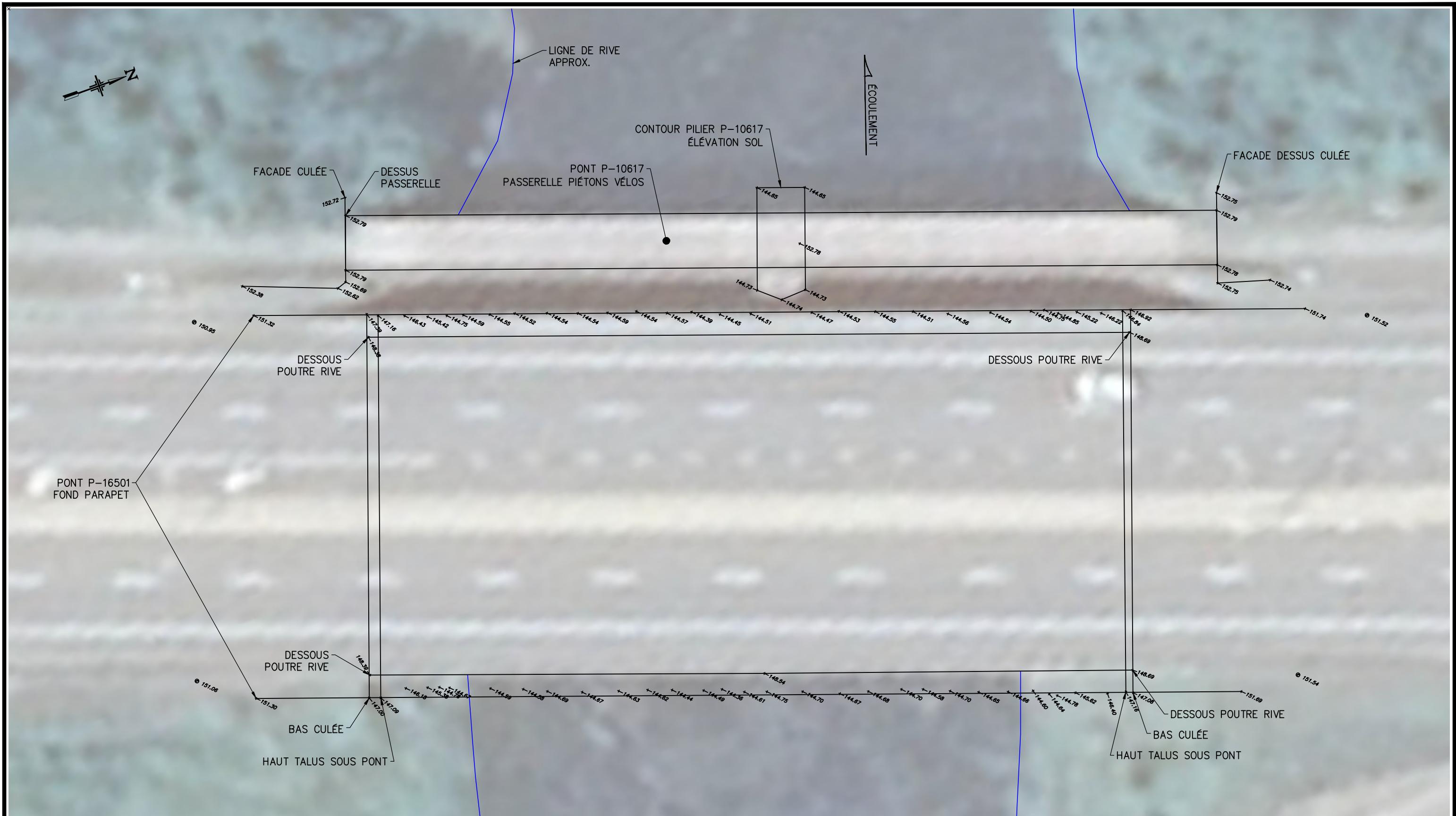
NOTES

CIMA+

T: 514-389-2982

Vue en plan du pont route 263 - P-00572

DESSINÉ PAR :	ÉCHELLE :
A. Guérin-H.	1:150
CONÇU PAR :	DATE :
-	2020/02/24
VÉRIFIÉ PAR :	DESSIN No:
-	Figure B.7



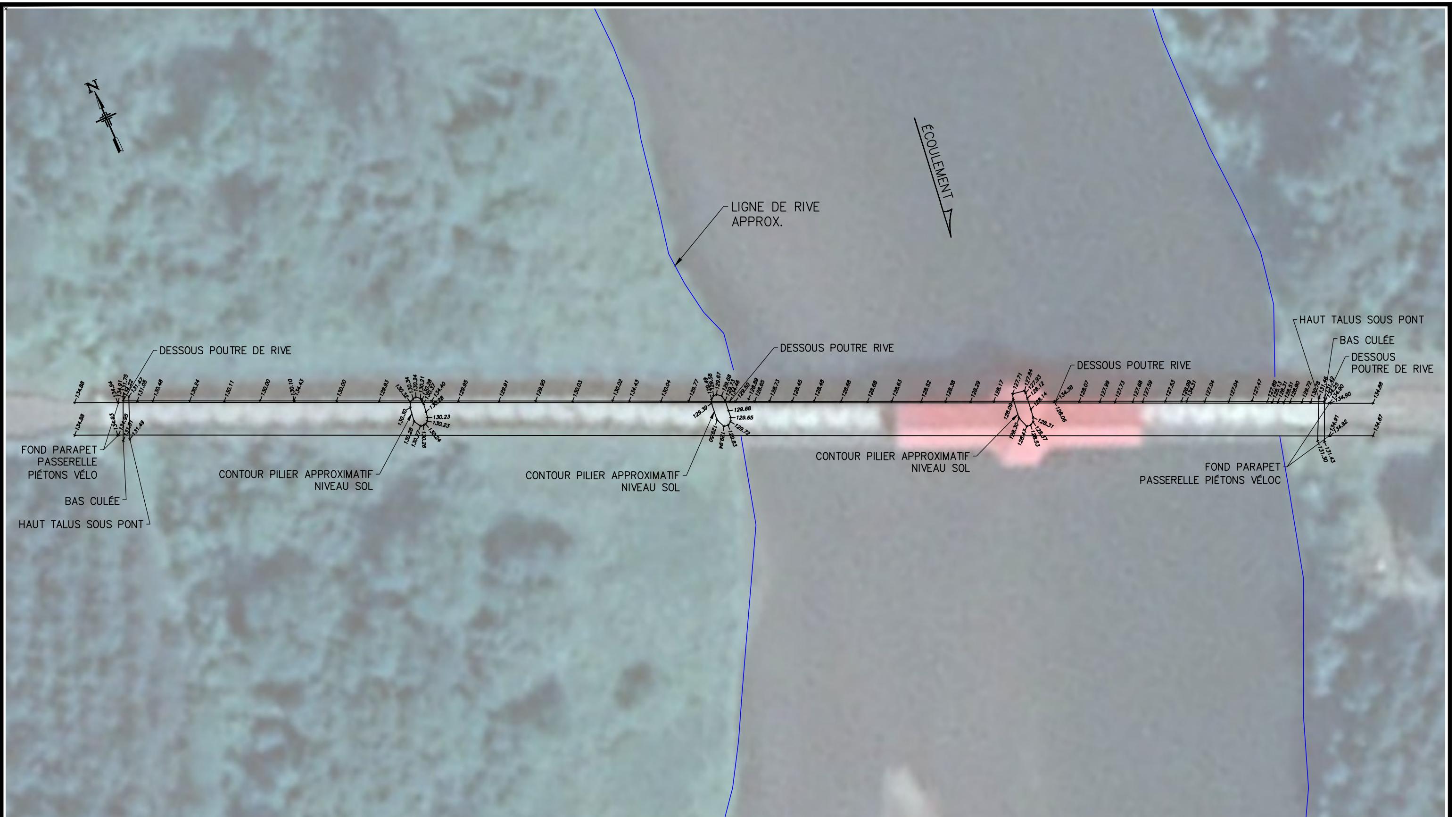
NOTES

CIMA+

T: 514 339-2462

Vue en plan du pont cycliste et piétonnier et du pont de la route 116

DESSINÉ PAR :	ÉCHELLE :
A. Guérin-H.	1:250
CONCU PAR :	DATE :
-	2020/02/24
VÉRIFIÉ PAR :	DESSIN No:
-	Figure B.8



NOTE

CIMA+

T: 514-337-2462

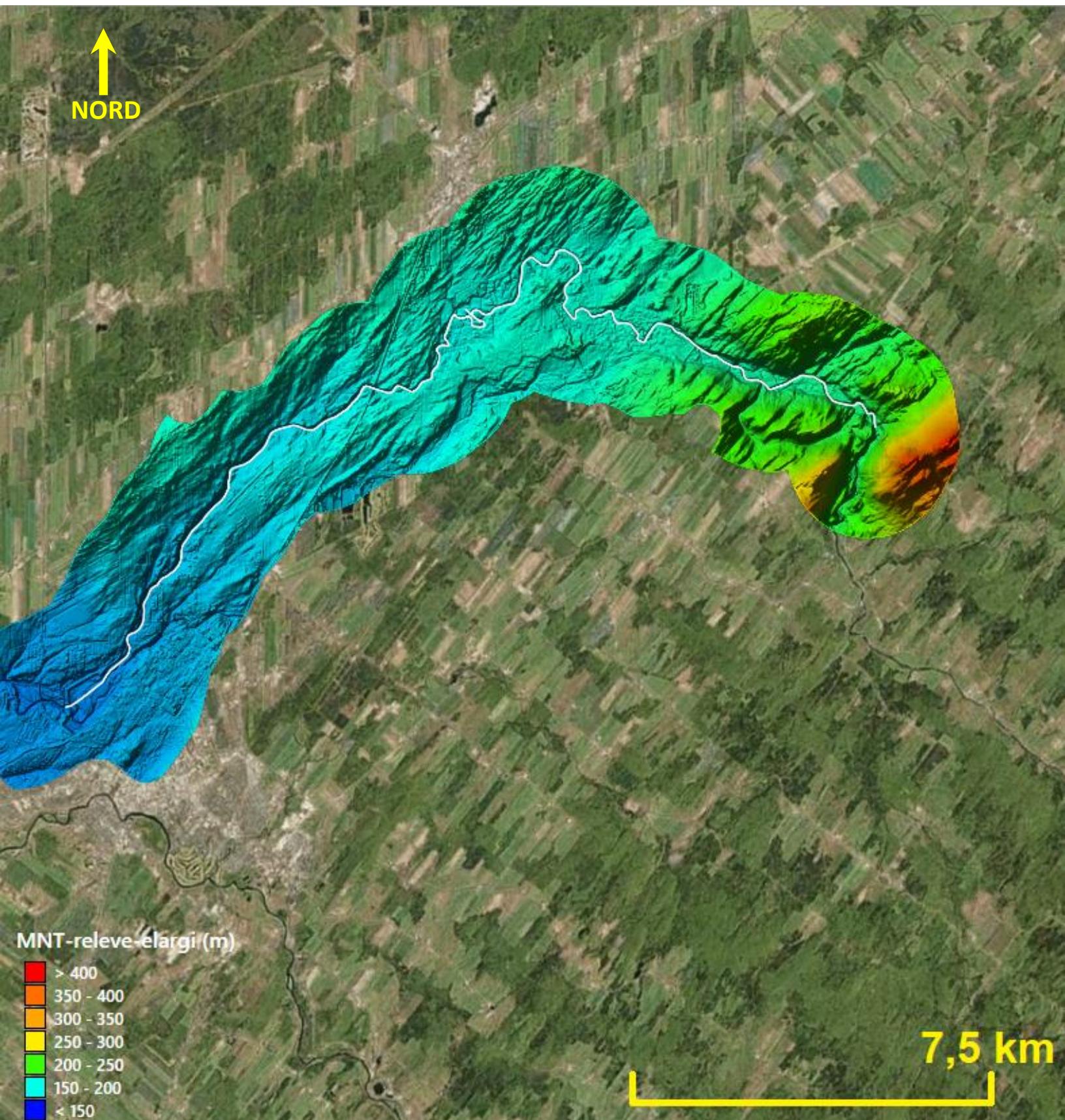
Vue en plan de la passerelle du réservoir Beaudet

DESSINÉ PAR :	ÉCHELLE :
A. Guérin-H.	1:500
CONÇU PAR :	DATE :
-	2020/02/24
VÉRIFIÉ PAR :	DESSIN No:
-	Figure B.9

C

Annexe C Modèle numérique de terrain





D

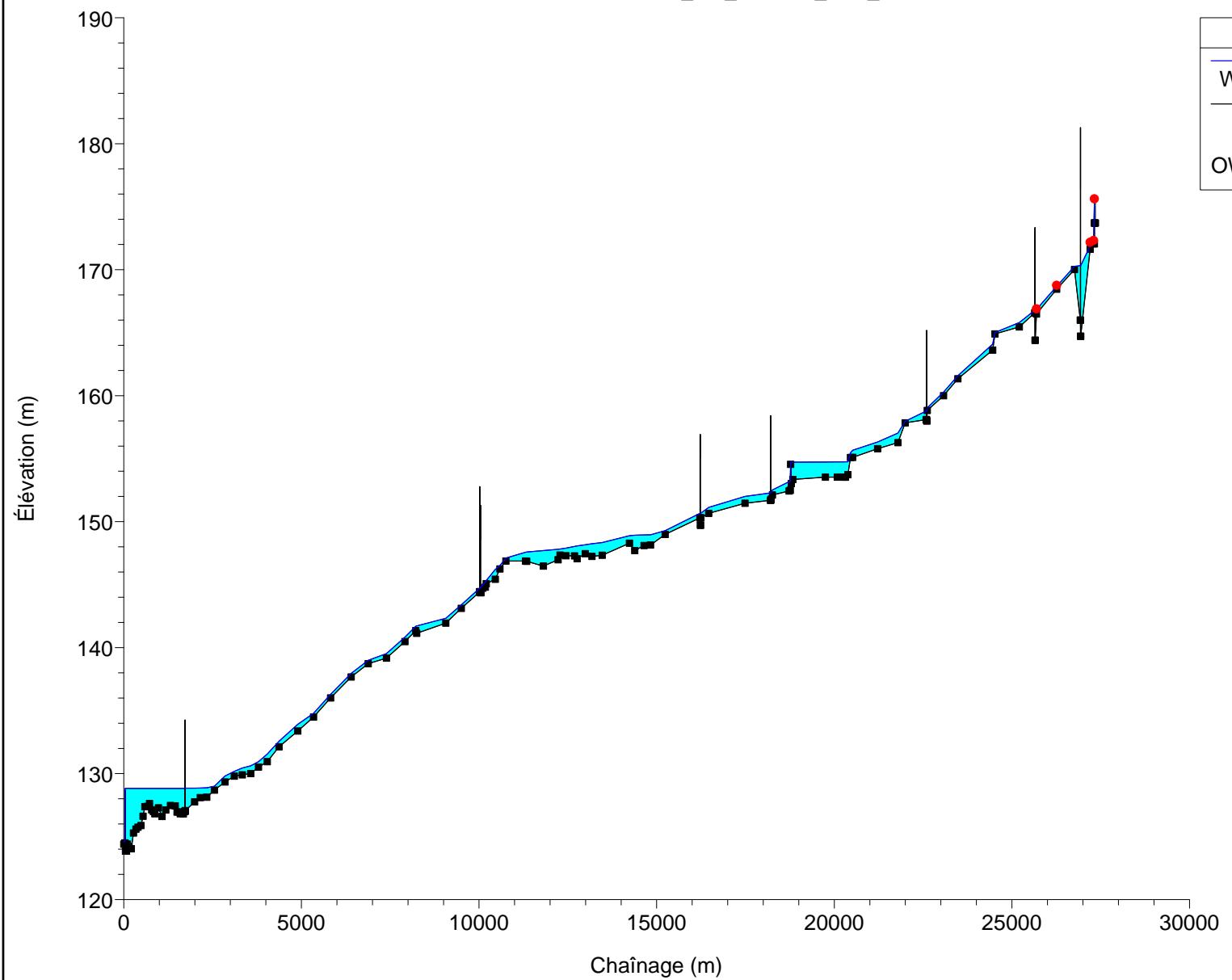
Annexe D Sections transversales du modèle HEC-RAS

HEC-RAS Model

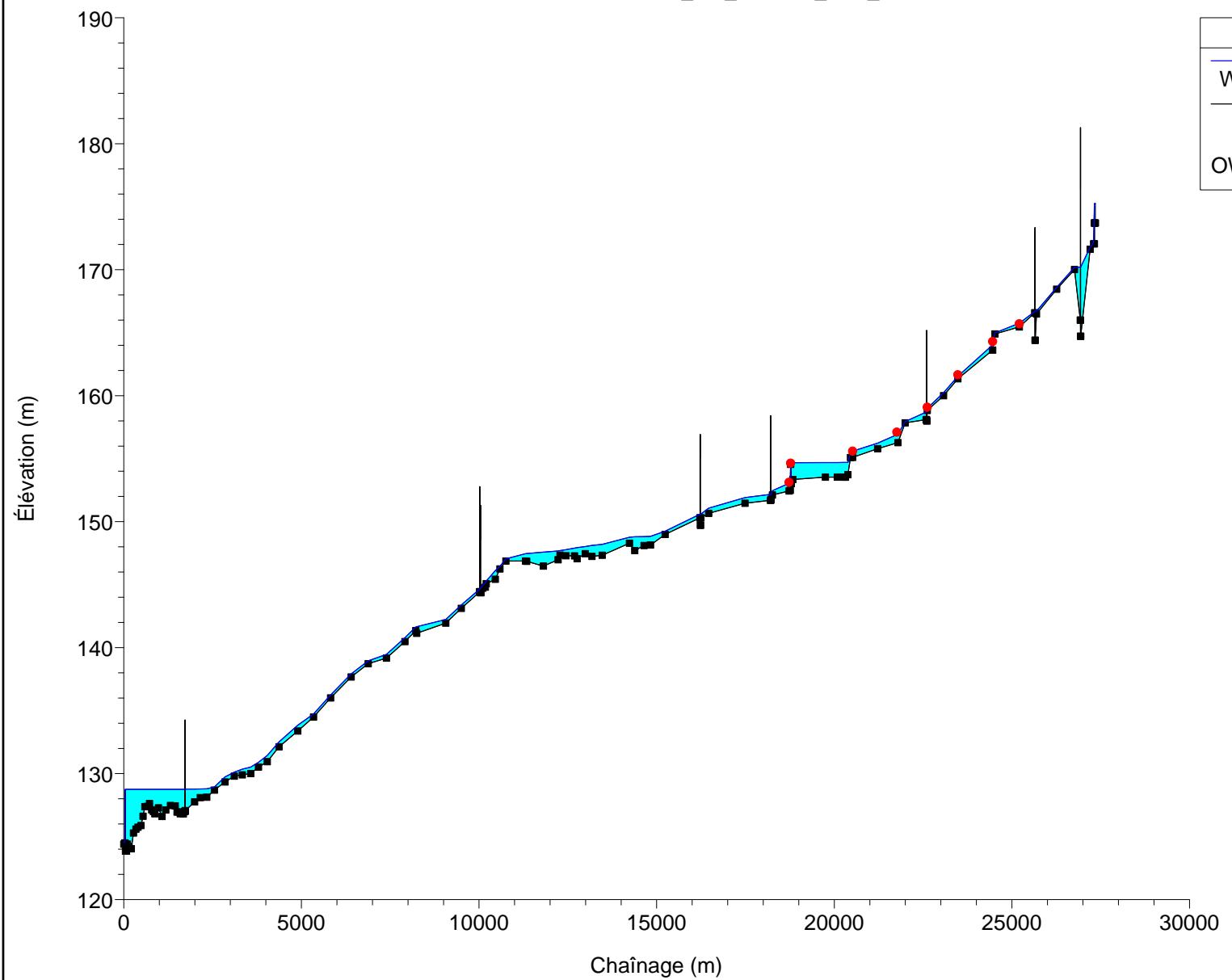
Plan: calib_bar_beaudet_lidar_2 12/20/2019

Legend

- WS 20/08/2019
- Ground
- OWS 20/08/2019



Legend	
WS 21/08/2019	—■—
Ground	—○—
OWS 21/08/2019	●

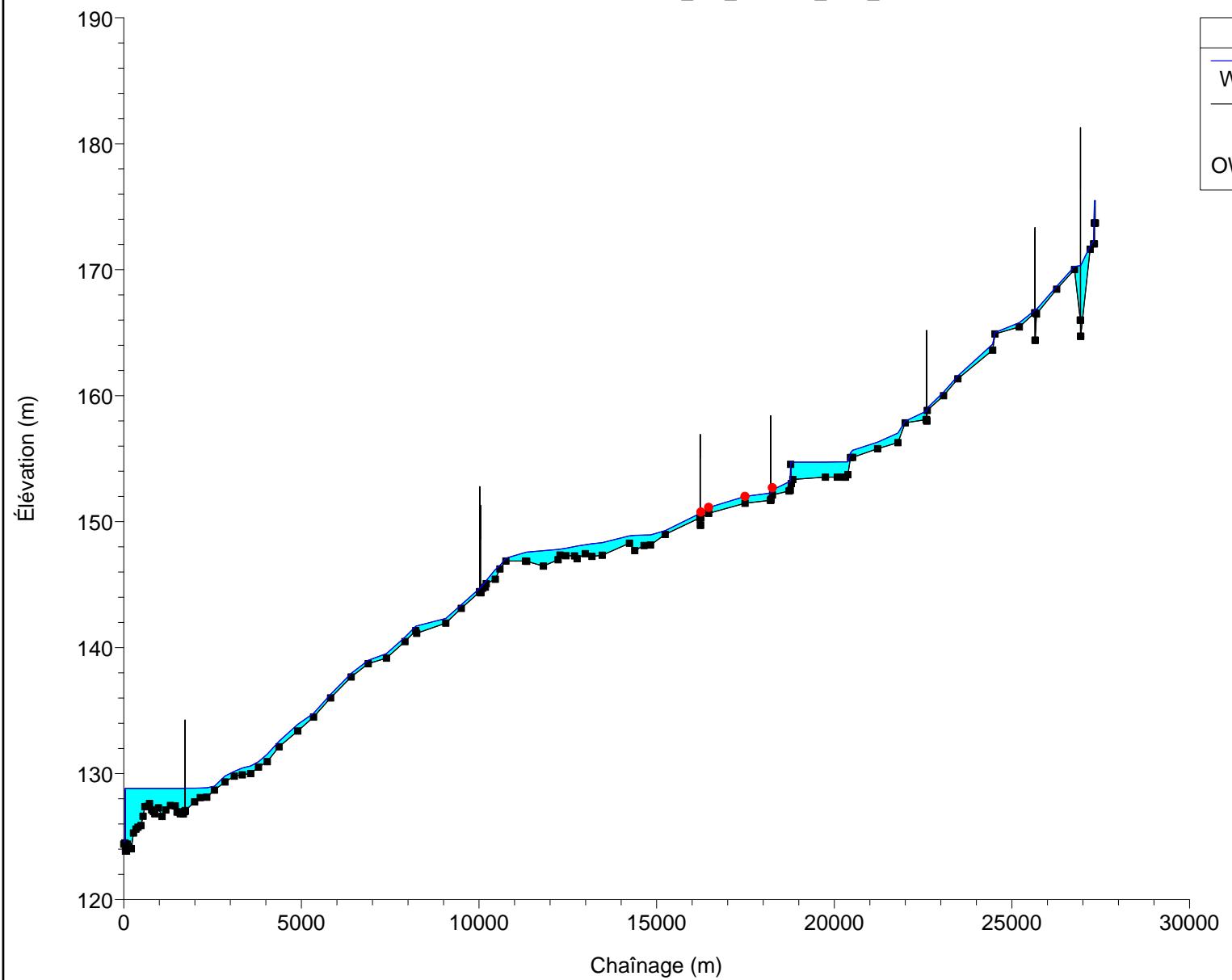


HEC-RAS Model

Plan: calib_bar_beaudet_lidar_2 12/20/2019

Legend

- WS 22/08/2019
- Ground
- OWS 22/08/2019

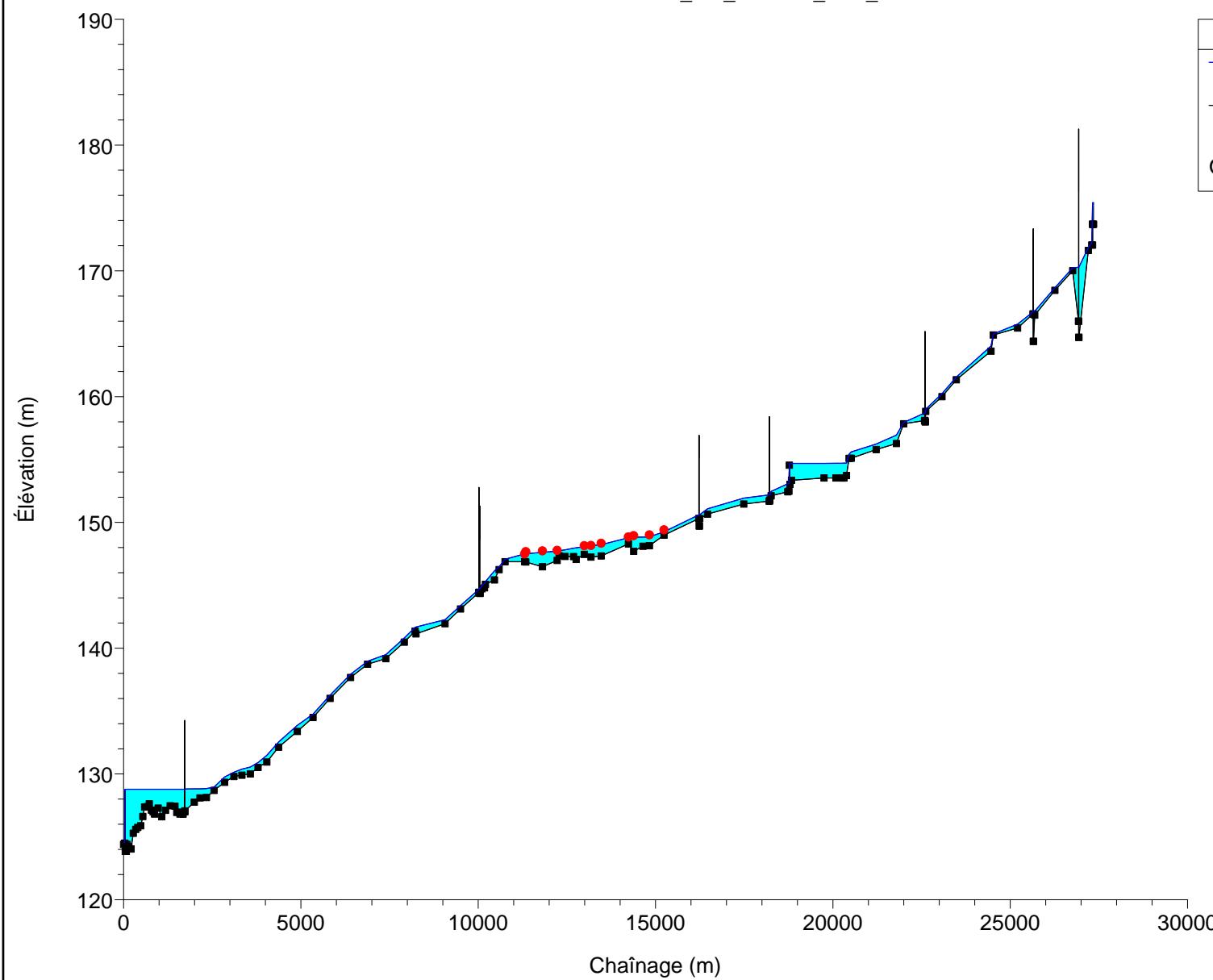


HEC-RAS Model

Plan: calib_bar_beaudet_lidar_2 12/20/2019

Legend

- WS 23/08/2019
- Ground
- OWS 23/08/2019

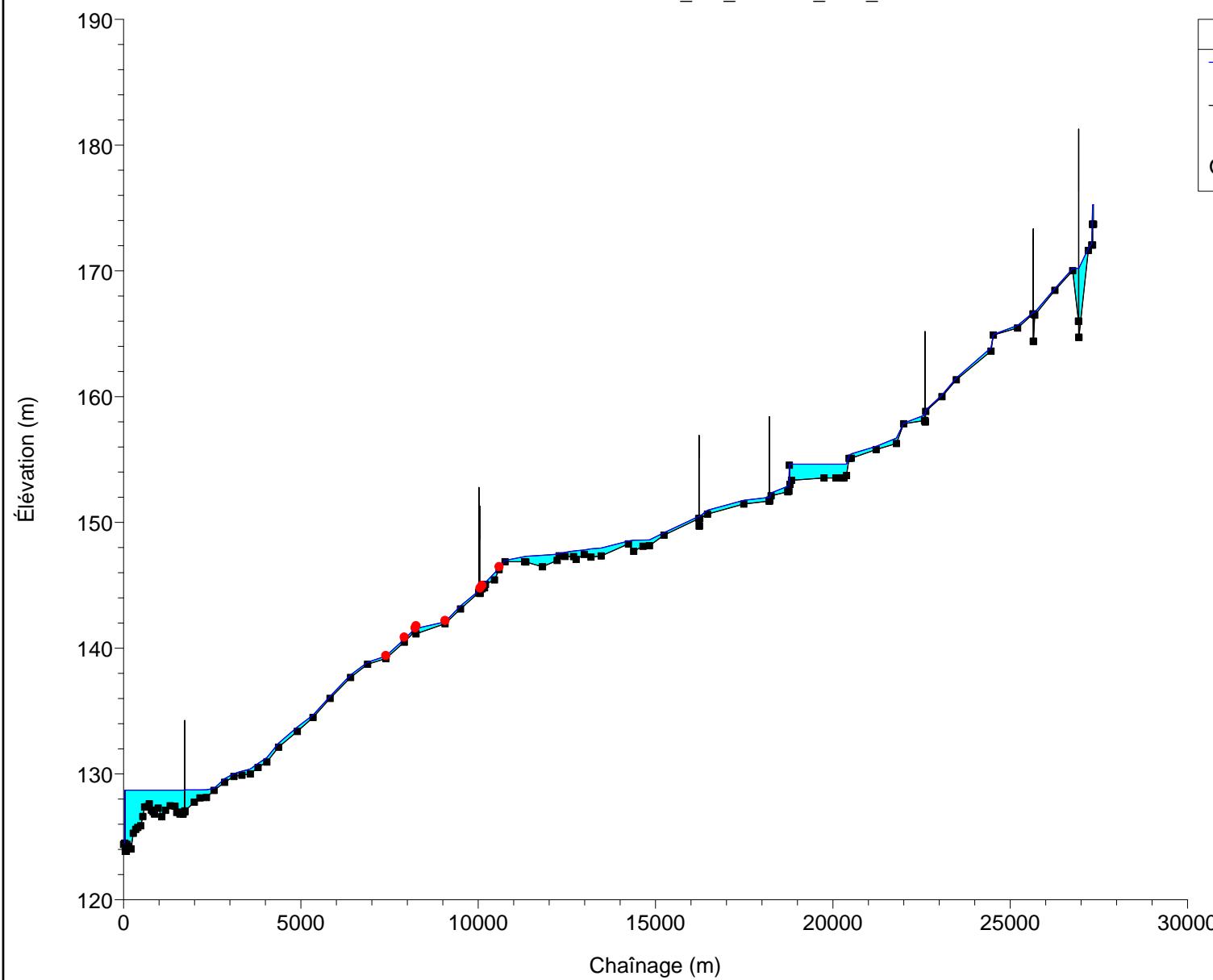


HEC-RAS Model

Plan: calib_bar_beaudet_lidar_2 12/20/2019

Legend

- WS 26/08/2019
- Ground
- OWS 26/08/2019

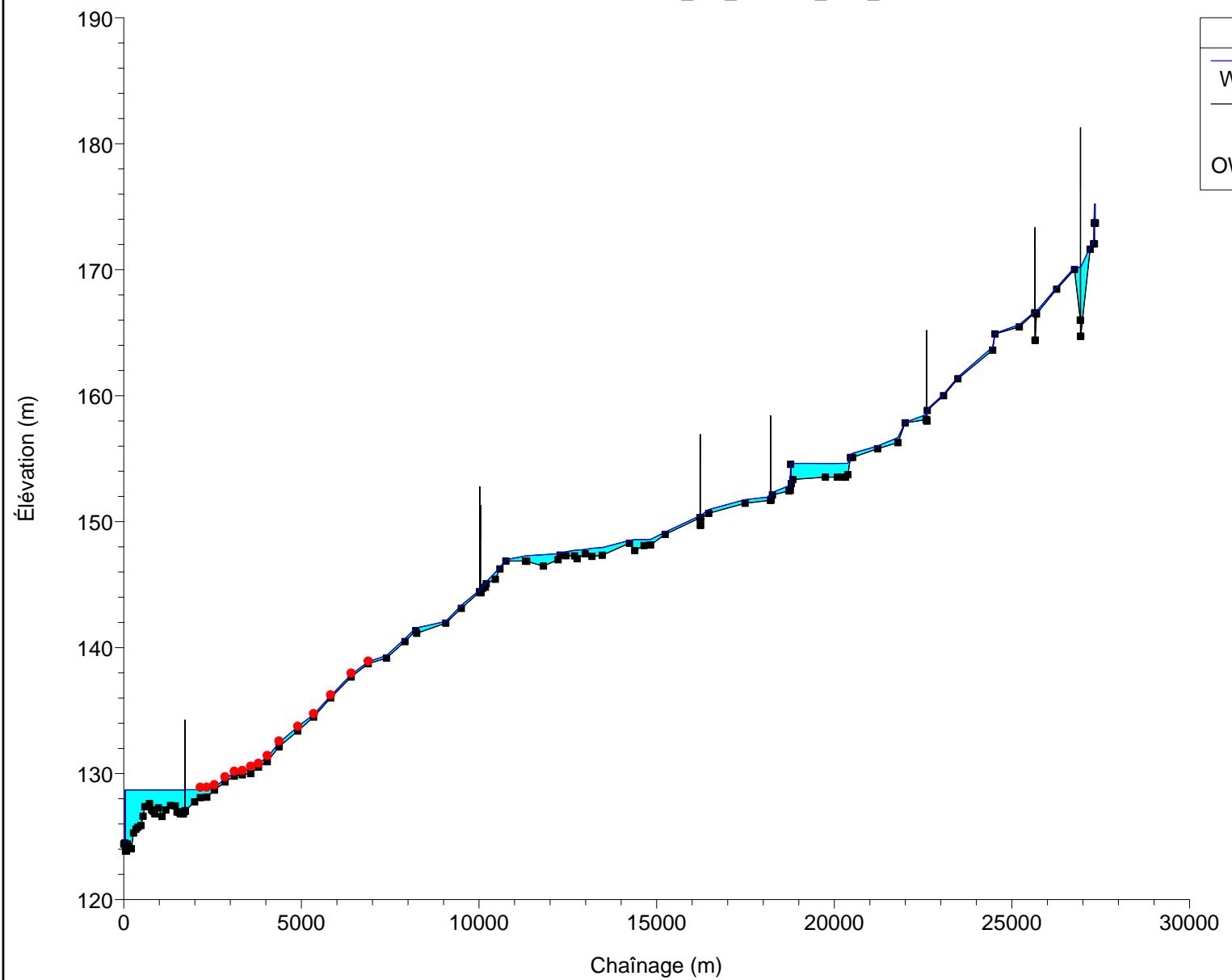


HEC-RAS Model

Plan: calib_bar_beaudet_lidar_2 12/20/2019

Legend

- WS 27/08/2019
- Ground
- OWS 27/08/2019

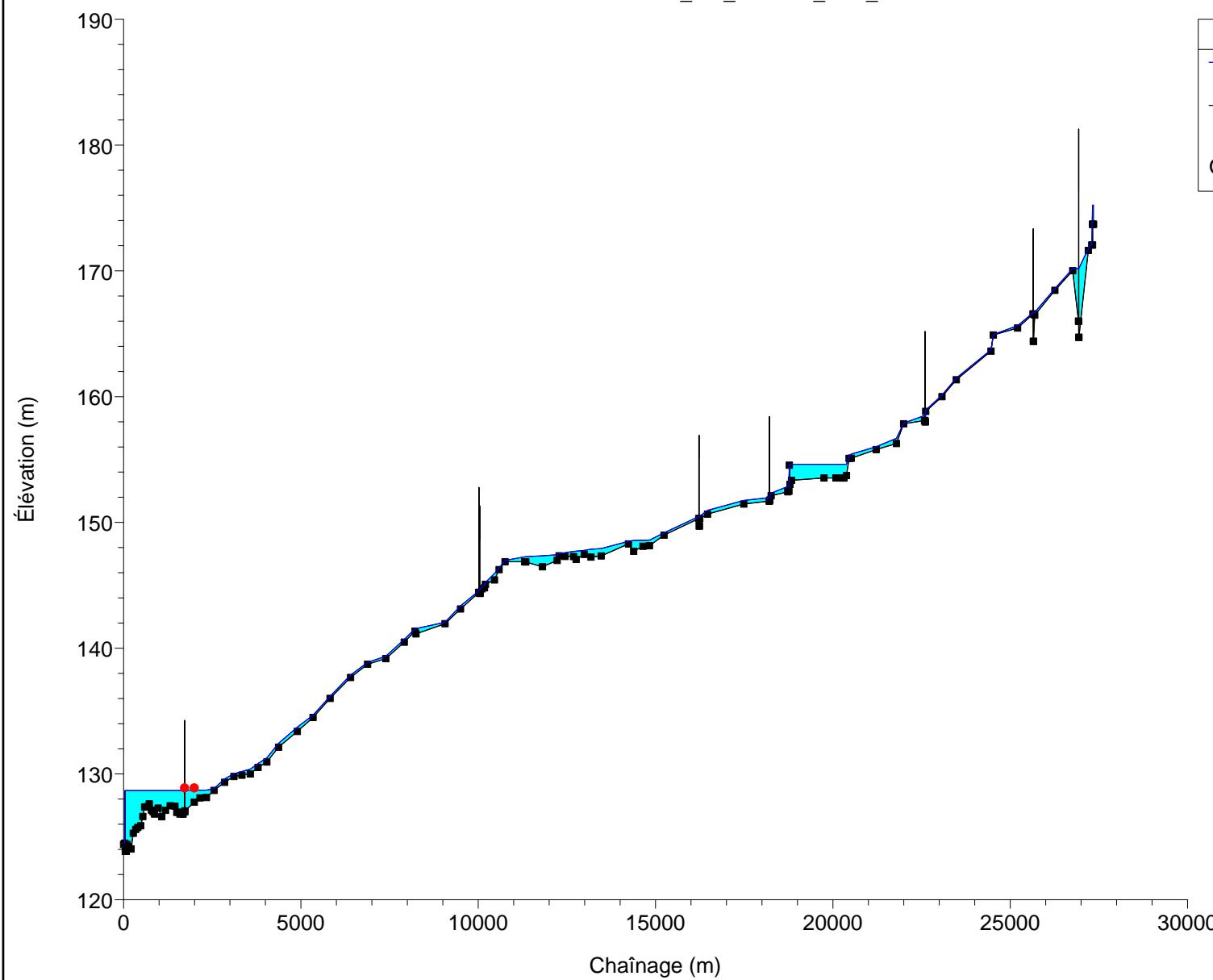


HEC-RAS Model

Plan: calib_bar_beaudet_lidar_2 12/20/2019

Legend

- WS 28/08/2019
- Ground
- OWS 28/08/2019

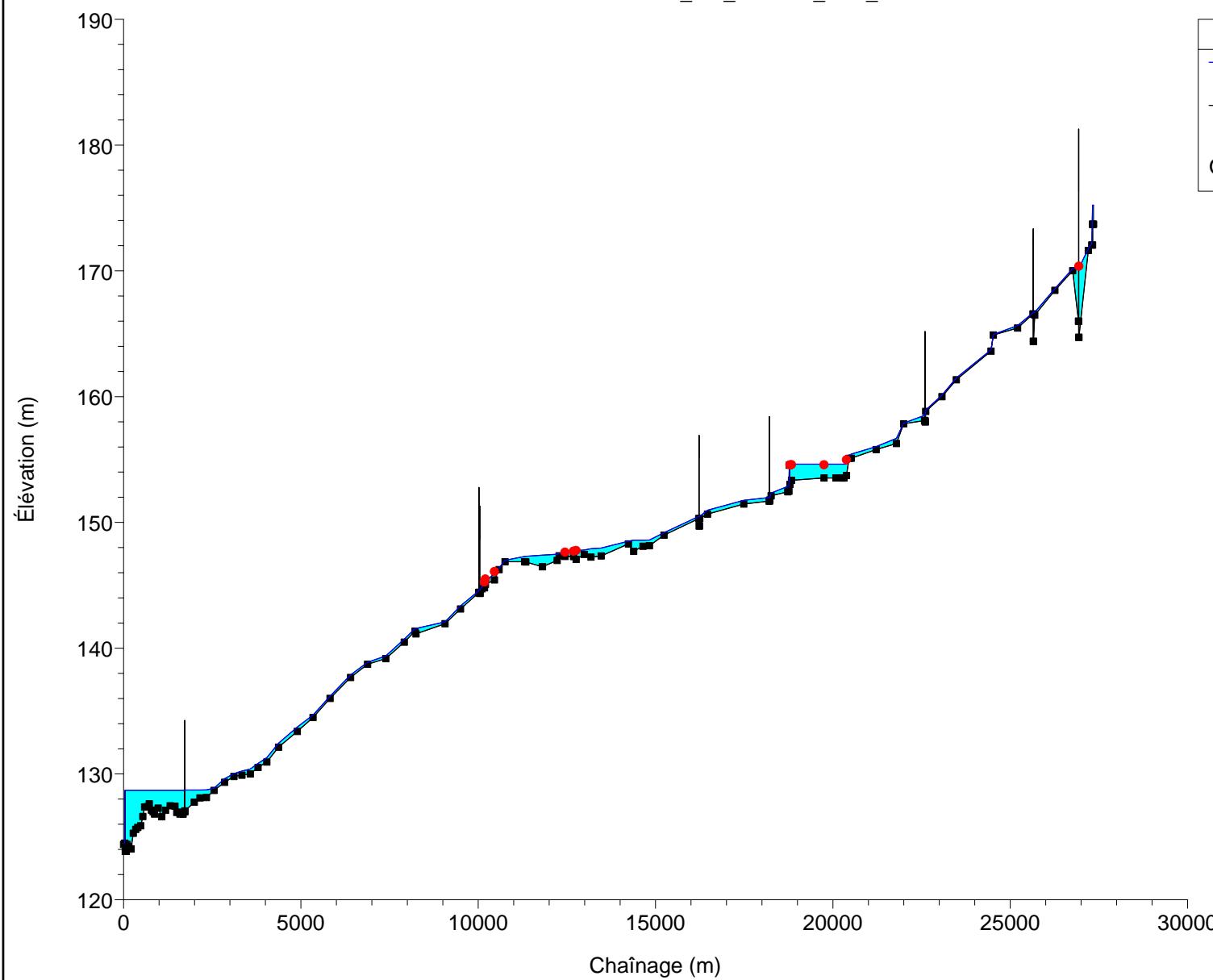


HEC-RAS Model

Plan: calib_bar_beaudet_lidar_2 12/20/2019

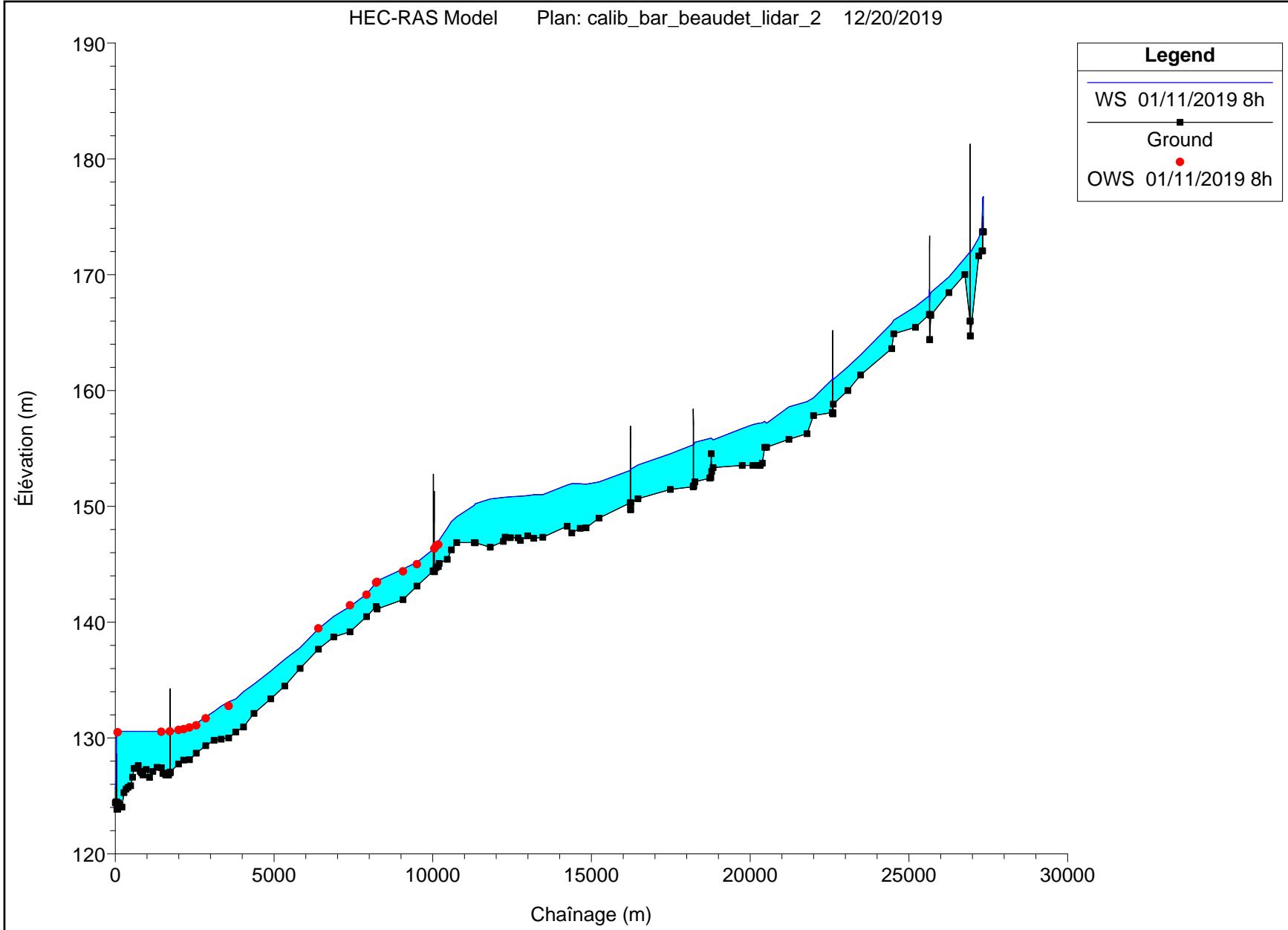
Legend

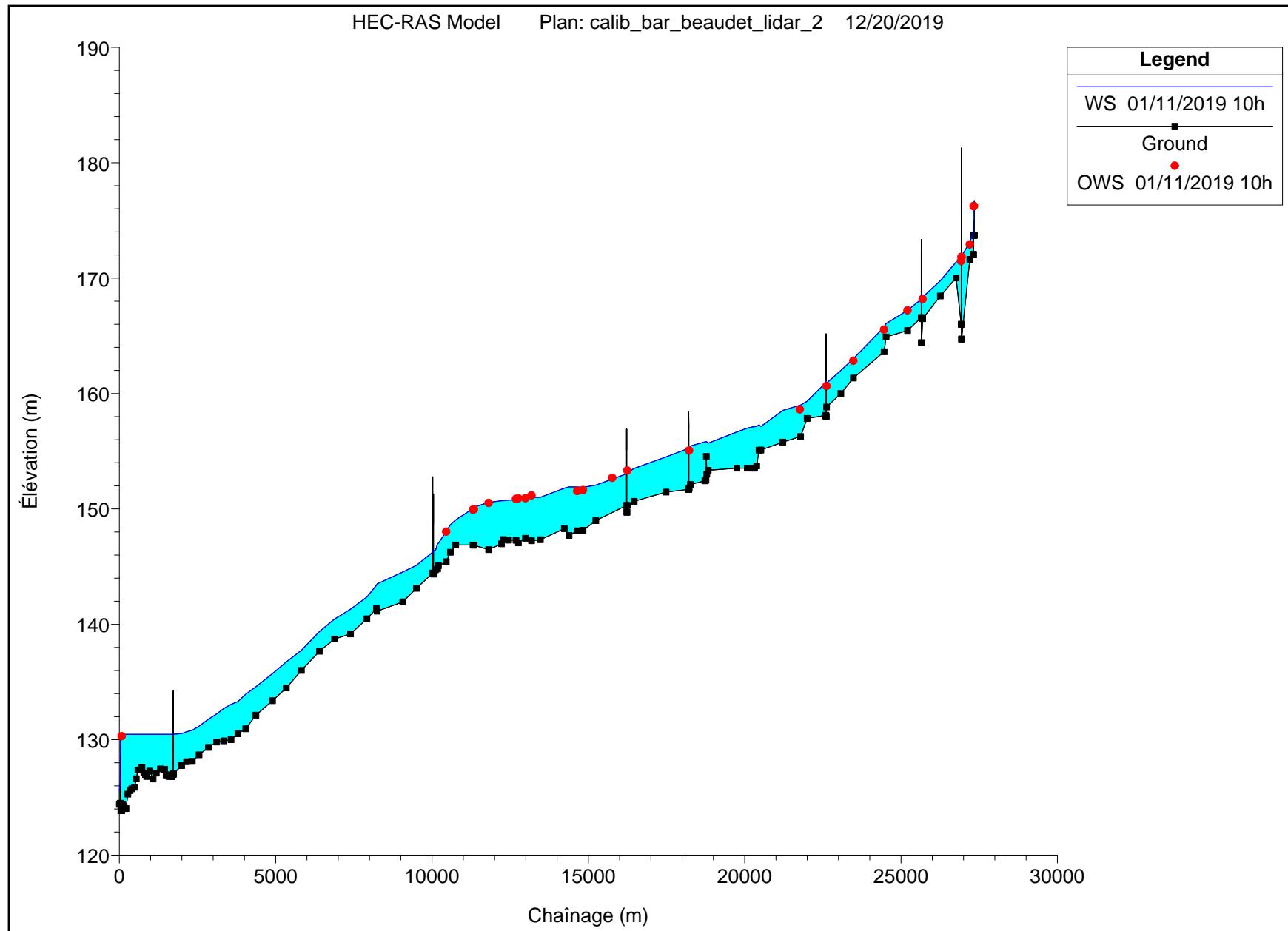
- WS 29/08/2019
- Ground
- OWS 29/08/2019



HEC-RAS Model

Plan: calib_bar_beaudet_lidar_2 12/20/2019





E

Annexe E Calibration des du modèle HEC-RAS

