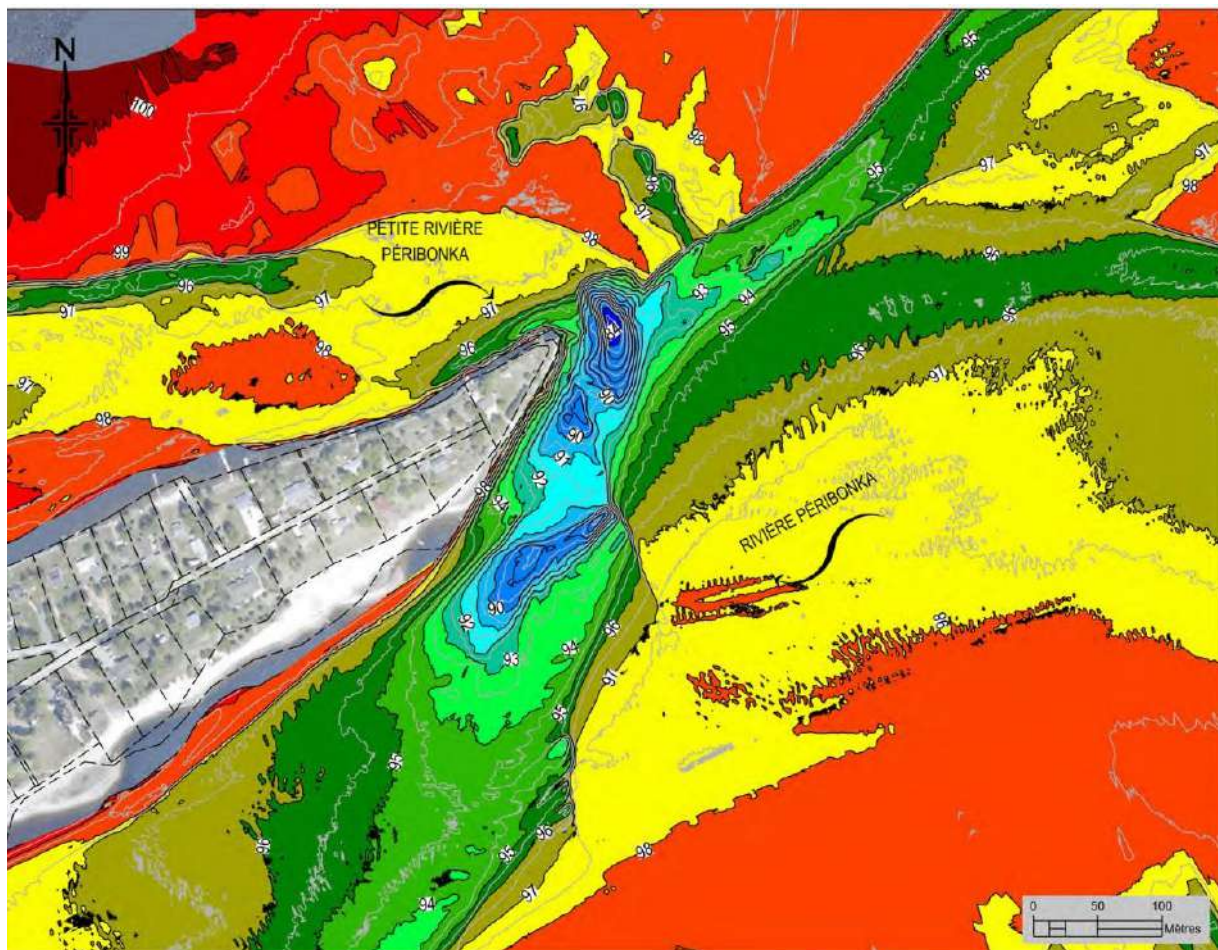


PROBLÉMATIQUE D'ÉROSION DE LA POINTE À LANGEVIN, VILLE DE DOLBEAU-MISTASSINI

DIAGNOSTIC

RIO TINTO – PROGRAMME DE STABILISATION DES BERGES DU
LAC SAINT-JEAN

MARS 2018





PROBLÉMATIQUE D'ÉROSION DE LA POINTE À LANGEVIN, VILLE DE DOLBEAU-MISTASSINI

DIAGNOSTIC

RIO TINTO – PROGRAMME DE STABILISATION DES
BERGES DU LAC SAINT-JEAN

VERSION PRÉLIMINAIRE

PROJET N° : 171-12050-00
DATE : MARS 2018

WSP CANADA INC.
1135, BOULEVARD LEBOURGNEUF
QUÉBEC (QUÉBEC) G2K 0M5

TÉLÉPHONE : +1 418-623-2254
TÉLÉCOPIEUR : +1 418-624-1857
WSP.COM

SIGNATURES

PRÉPARÉ PAR

Florent Sabarly, ing. jr, M. Sc. A.
N° OIQ : 5016946

Simon Nolin, ing., M. Sc.
N° OIQ : 137105

Philippe Morin, ing.
N° OIQ : 5016649

François Groux, ing., Master Génie de l'eau
N° OIQ : 5037284

RÉVISÉ PAR

Steve Renaud, ing., M. Sc.
N° OIQ : 121069

Pierre Pelletier, ing., M. Sc.
N° OIQ : 104363

Le présent rapport a été préparé par WSP Canada Inc. (WSP) pour le compte de Rio Tinto conformément à l'entente de services professionnels. La divulgation de tout renseignement faisant partie du présent rapport incombe uniquement au destinataire prévu. Son contenu reflète le meilleur jugement de WSP à la lumière des informations disponibles au moment de la préparation du rapport. Toute utilisation que pourrait en faire une tierce partie ou toute référence ou toutes décisions en découlant sont l'entière responsabilité de ladite tierce partie. WSP n'accepte aucune responsabilité quant aux dommages, s'il en était, que pourrait subir une tierce partie à la suite d'une décision ou d'un geste basé sur le présent rapport. Cet énoncé de limitation fait partie du présent rapport.

L'original du document technologique que nous vous transmettons a été authentifié et sera conservé par WSP pour une période minimale de dix ans. Étant donné que le fichier transmis n'est plus sous le contrôle de WSP et que son intégrité n'est pas assurée, aucune garantie n'est donnée sur les modifications ultérieures qui peuvent y être apportées.

ÉMISSION/RÉVISION	PRÉPARÉ POUR	DATE
Préliminaire	Rio Tinto	26-03-2018

ÉQUIPE DE RÉALISATION

RIO TINTO

Chargée de projet	Caroline Jolette
Directrice du programme	Sabrina Tremblay
Consultant en gestion hydrique	Bruno Larouche

WSP CANADA INC. (WSP)

Chargé de projet	François Groux, ing., Master Génie de l'eau
Hydraulique	Simon Nolin, ing., M. Sc. Mathieu Roy, ing., M. Sc. A. Florent Sabarly, ing. jr, M. Sc. A. Benoit Ruest, ing., M. Sc.
Géotechnique	Kristina Bondy, ing., M.Ing. Philippe Morin, ing. Alexandre Audet-Bouchard
Relevés	Alexandre Morin, géog. Pierre Hébert, tech.
Traitement de données	Alexandre Paradis, tech.
Mise en plan	Patrick Audet, tech. Kevin Laroche, tech. François Sabourin, tech. Benoit Chabot, tech.
Comité de révision	Steve Renaud, ing., M. Sc. Pierre Pelletier, ing., M. Sc.
Traitement de texte et édition	Nancy Paquet, adj. administrative

Référence à citer :

WSP. 2017. *Problématique d'érosion de la Pointe à Langevin, Ville de Dolbeau-Mistassini – Diagnostic*. Rapport de WSP Canada Inc. à Rio Tinto. 83 p. et annexes.

SOMMAIRE

Le secteur de la Pointe à Langevin fait face à une problématique d'érosion, à la confluence de la rivière Péribonka et de la Petite rivière Péribonka, à Dolbeau-Mistassini. Bien que le phénomène d'érosion puisse se produire depuis de nombreuses années, c'est en 2016 que la problématique a été réellement mise en évidence à la suite d'un premier décrochement de talus localisé.

À la suite du premier glissement de terrain signalé en mars 2016, un empierrement a été mis en place en vue de stabiliser le talus au mois d'août de la même année. En dépit de cette intervention, de nouveaux décrochements, de plus grandes envergures, étaient signalés à partir de mars 2017 à l'endroit même du premier.

Le phénomène d'érosion apparaissant rapidement comme étant particulièrement complexe et différent des phénomènes d'érosion normalement traités dans le cadre du Programme de stabilisation des berges du lac Saint-Jean, aucune intervention efficace ne semblait possible à court terme (Norda Stelo, 2017). Pour s'en convaincre, Rio Tinto Alcan (RTA) a alors mandaté WSP Canada Inc. (WSP) afin de réaliser un diagnostic préliminaire de la situation à l'automne 2017, sur la base des informations alors disponibles. Dans le cadre de ses premières analyses, WSP a pu confirmer la nature complexe du processus d'érosion et mettre en évidence l'origine fluviale des désordres observés. En effet, il apparaissait que l'érosion en berge observée était due à un approfondissement majeur de la fosse formée au point de confluence par le mélange turbulent des eaux de la rivière Péribonka et de la Petite rivière Péribonka. Par ailleurs, l'hydraulicité particulièrement importante de la Petite rivière Péribonka en hiver et au printemps 2017, seul paramètre ayant été modifié dans les processus régissant l'hydrodynamique de la confluence, indiquait que cette dernière avait joué un rôle déclencheur dans l'approfondissement de la fosse et l'érosion des berges. Ces constats confirmaient alors que le traitement de la problématique observée à Pointe à Langevin, liée à de l'érosion fluviale, sortait du cadre du Programme de stabilisation des berges du lac Saint-Jean, dédié à contrer les problématiques d'érosion liées au rehaussement du niveau du lac par RTA.

Malgré tout, RTA a souhaité poursuivre son engagement en mandatant WSP pour élaborer un plan de travail permettant d'aboutir à l'obtention d'un document d'aide à la décision destiné aux différents partenaires du projet afin de déterminer les suites à donner. Le plan de travail proposé par WSP s'articule en deux étapes distinctes, soit d'abord la réalisation d'un diagnostic complet de la situation puis la réalisation d'une étude de faisabilité technico-économique permettant de documenter et comparer deux concepts d'aménagement avec le choix possible du statu quo.

La première étape, le diagnostic complet qui fait l'objet du présent rapport, intègre des acquisitions de données, notamment bathymétriques, hydrométriques et géotechniques, et la mise en œuvre d'outils de modélisation numérique en trois dimensions afin de bien comprendre et caractériser les processus d'érosion en cours.

Les principales conclusions du diagnostic complet sont les suivantes :

- la fosse située à l'extrémité de la pointe, très profonde (environ 14 m), présente un axe qui indique clairement l'existence d'un lien direct entre la formation de celle-ci et l'entrée des écoulements de la Petite rivière Péribonka dans la Péribonka;
- l'évolution importante et rapide de la fosse entre novembre 2016 et juin 2017 indique que des conditions particulières sont survenues au cours de l'hiver et du printemps 2017;
- la fosse est très localisée et son approfondissement ne s'accompagne pas d'un étirement vers l'aval. Un phénomène d'érosion régressive (recul vers l'amont) semble se produire, sans toutefois conduire à un approfondissement très marqué pour l'instant. Les risques d'érosion semblent donc, à ce stade, limités à l'extrémité de la Pointe à Langevin;
- le débit de la Petite rivière Péribonka est sans doute la variable principale pour expliquer les évolutions morphologiques au point de confluence. Les débits de la Petite rivière Péribonka ont en effet été particulièrement élevés en 2017 par rapport aux moyennes historiques, notamment pour la période du 15 février au 15 mai (+66 %). Le débit moyen de la Petite rivière Péribonka observé en 2017 sur la période 15 février-15 mai constitue le maximum historique enregistré depuis 1975;
- la durabilité de l'exposition à des débits soutenus lors de la période d'intérêt joue un rôle important dans l'envergure des ajustements hydrosédimentaires au point de confluence observés en 2017;
- les dépôts sédimentaires observés consistent en des sols granulaires lâches. Ces sols sont fins, non cohésifs et lâches, et apparaissent donc très vulnérables à l'érosion;
- les calculs de stabilité de talus indiquent que l'extrémité de la pointe est instable et que des glissements de terrain peuvent survenir à tout moment. Un recul de talus de l'ordre de 4 à 6 m doit être considéré à court terme. Toutefois, en aval de la fosse principale, le coefficient de sécurité calculé augmente progressivement et passe rapidement au-dessus de la limite de 1 en conditions statiques. Les problèmes d'instabilité sont donc concentrés à l'extrémité de la pointe, au droit de la fosse principale;
- un nouvel approfondissement de la fosse conduirait vraisemblablement à de nouveaux reculs de talus en surface;
- d'après les modèles hydrodynamiques, les débits significativement plus élevés de la Petite rivière Péribonka en mars puis en avril et en mai semblent avoir d'abord initié de l'érosion dans la fosse, alors que le couvert de glace créait une contrainte supplémentaire, puis accentué l'érosion en avril et au début de mai. La fosse se serait donc approfondie et déplacée sensiblement vers le large sous l'effet de contraintes hydrauliques quasi-continues sur une longue période de temps. Ce serait donc la durabilité de l'exposition à des contraintes érosives qui explique l'importance de l'approfondissement de la fosse survenu en 2017 et ayant conduit à des reculs importants en berge à l'extrémité de la Pointe à Langevin;
- la fosse pourrait de nouveau subir une évolution au cours des prochains mois ou années. En effet, l'équilibre ne semble pas atteint et des débits équivalents à ceux observés en 2017 pourraient relancer le processus d'érosion. Au-delà de ce constat, il semble que des conditions hydrométéorologiques normales soient suffisantes pour entretenir la fosse qui s'est formée. Il apparaît donc peu probable que la situation se résorbe d'elle-même dans le futur;

- en conditions normales d'été-automne, les vitesses d'écoulement ne semblent pas pouvoir générer d'érosion d'origine fluviale dans le secteur de la Pointe à Langevin et les phénomènes de recirculation sont très peu marqués. On peut confirmer que la dynamique fluviale est fortement atténuée dans ces conditions et que l'érosion d'origine fluviale est absente la plus longue partie de l'année;
- les modèles élaborés permettent de représenter les conditions hydrodynamiques d'un vaste secteur et dans des conditions très variables. On dispose désormais de tous les outils nécessaires pour étudier d'éventuelles interventions afin d'en déterminer l'efficacité potentielle et les impacts.

À l'issue des conclusions du diagnostic, plusieurs pistes de solutions sont présentées. Il ressort que les solutions les plus pertinentes semblent être celles qui ont un effet local et direct sur les écoulements au point de confluence. La mise en place d'un ou plusieurs épis dans le secteur de la Pointe à Langevin pourrait permettre de modifier l'angle de rencontre des eaux, de réduire les contraintes hydrodynamiques et de favoriser un déplacement vers le large ainsi qu'une réduction de la profondeur de la fosse d'affouillement. Les options d'épis fluviaux à privilégier seraient situées autour de la Pointe à Langevin ou dans la rivière Péribonka vis-à-vis de la pointe. Le comblement partiel ou total de la fosse est à considérer dans la solution. D'autres pistes de solutions sont abordées comme compléments ou simplement pour information, lorsque celles-ci s'avèrent moins réalistes.

La prochaine étape du projet consistera à la sélection d'une ou plusieurs de ces solutions et d'en étudier la faisabilité technico-économique ainsi que les impacts environnementaux et sociaux.

TABLE DES MATIÈRES

1	CONTEXTE - OBJECTIFS	1
1.1	INTRODUCTION	1
1.2	SYNTHÈSE DU DIAGNOSTIC PRÉLIMINAIRE	2
1.3	OBJECTIFS DU MANDAT ET APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE	3
2	INTRODUCTION AUX PROCESSUS D'ÉROSION FLUVIATILE AUX POINTS DE CONFLUENCE	5
3	ANALYSE MORPHOLOGIQUE.....	9
3.1	CAMPAGNE DE RELEVÉS.....	9
3.2	DESCRIPTION DES STRUCTURES MORPHOLOGIQUES OBSERVÉES	11
3.3	ÉVOLUTION MORPHOLOGIQUE DEPUIS 2014.....	12
3.4	CONCLUSIONS	16
4	ANALYSES HYDROMÉTÉOROLOGIQUES ...	19
4.1	INTRODUCTION	19
4.2	NIVEAUX D'EAU DU LAC SAINT-JEAN.....	19
4.3	DÉBITS DE LA RIVIÈRE PÉRIBONKA ET DE LA PETITE RIVIÈRE PÉRIBONKA	21
4.3.1	DÉBITS DE LA RIVIÈRE PÉRIBONKA	22
4.3.2	DÉBITS DE LA PETITE RIVIÈRE PÉRIBONKA.....	23
4.3.3	ANALYSE CONJOINTE DES DÉBITS DES DEUX PÉRIBONKA.....	28
4.4	ANALYSE DES GLACES	31
4.5	ANALYSE DES VENTS.....	36
4.6	CONCLUSION DES ANALYSES HYDROMÉTÉOROLOGIQUE	37
5	ANALYSES GÉOTECHNIQUES	39
5.1	INTRODUCTION	39
5.2	ÉTUDES GÉOTECHNIQUES DISPONIBLES	39
5.3	CARACTÉRISTIQUES DES SOLS ET SENSIBILITÉ À L'ÉROSION	40

5.4	ANALYSE DE STABILITÉ DES BERGES DE LA POINTE À LANGEVIN.....	44
5.5	CONCLUSION	46
6	CARACTÉRISATION HYDRODYNAMIQUE....	49
6.1	INTRODUCTION	49
6.2	MÉTHODOLOGIE	49
6.2.1	CAS ANALYSÉS	49
6.2.2	OUTILS DE MODÉLISATION	51
6.3	CARACTÉRISATION DE LA PÉRIODE DE DYNAMIQUE FLUVIALE ACTIVE	56
6.3.1	EN PRÉSENCE D'UN COUVERT DE GLACE	56
6.3.2	EN L'ABSENCE D'UN COUVERT DE GLACE	60
6.3.3	ÉVOLUTION POSSIBLE DE LA FOSSE DANS LE FUTUR	64
6.3.4	CONCLUSIONS	65
6.4	CARACTÉRISATION DE LA PÉRIODE DE DYNAMIQUE FLUVIALE ATTÉNUÉE	65
6.4.1	CONDITIONS NORMALES.....	66
6.4.2	CONDITIONS DE TEMPÊTE	67
6.5	CONCLUSIONS	69
7	CONCLUSIONS.....	71
7.1	SYNTHÈSE DU DIAGNOSTIC COMPLET	71
7.2	ÉVALUATION PRÉLIMINAIRE DES SOLUTIONS ENVISAGEABLES.....	75
7.2.1	SOLUTIONS PRINCIPALES.....	75
7.2.2	SOLUTIONS COMPLÉMENTAIRES	79
7.2.3	SOLUTIONS PEU RÉALISTES	80

TABLEAUX

TABLEAU 4.1	NIVEAUX D'EAU MOYENS MENSUELS DU LAC SAINT-JEAN SUR LA PÉRIODE 1986-2017 (MINIMUM, MAXIMUM, MOYENNE), RELEVÉS À LA STATION ROBERVAL (062914).....	21
TABLEAU 4.2	DÉBITS MOYENS MENSUELS DE LA RIVIÈRE PÉRIBONKA À CHUTE-À-LA- SAVANE SUR LA PÉRIODE 1975-2017 (MINIMUM, MAXIMUM, MOYENNE) ET DÉBITS MOYENS MENSUELS OBSERVÉS EN 2016 ET 2017.....	23
TABLEAU 4.3	DÉBITS MOYENS MENSUELS DE LA PETITE RIVIÈRE PÉRIBONKA À LA STATION DU MDELCC (061801) SUR LA PÉRIODE 1975-2017 (MINIMUM, MAXIMUM, MOYENNE) ET DÉBITS MOYENS MENSUELS OBSERVÉS EN 2016 ET 2017	26
TABLEAU 4.4	DÉBITS MOYENS DES ANNÉES 1975 À 2017 DE LA PETITE RIVIÈRE PÉRIBONKA (STATION 061801) ET DE LA RIVIÈRE PÉRIBONKA (CHUTE-À- LA-SAVANE) ET RATIO DES DÉBITS SUR LA PÉRIODE DU 15 FÉVRIER AU 15 MAI	29
TABLEAU 4.5	DÉBITS MOYENS DE LA PETITE RIVIÈRE PÉRIBONKA (STATION 061801) ET DE LA RIVIÈRE PÉRIBONKA (CHUTE-À-LA-SAVANE) ET RATIO DES DÉBITS SUR LA PÉRIODE DU 15 FÉVRIER AU 15 MAI POUR LES DIX ANNÉES PRÉSENTANT LES PLUS FORTS DÉBITS.....	30
TABLEAU 4.6	VALEURS STATISTIQUES D'ÉPAISSEUR MAXIMUM ANNUELLE DU COUVERT DE GLACE CALCULÉES À PARTIR DES DONNÉES DE LA STATION 7065960 (33 HIVERS ENTRE 1952 ET 2006).....	35

TABLEAU 5.1	REVUE DE LA STRATIGRAPHIE DES SOLS OBSERVÉS AU DROIT DES FORAGES 17F01 ET 17F02	41
TABLEAU 5.2	RÉSULTATS DES ANALYSES DE STABILITÉ EN CONDITIONS STATIQUES	45
TABLEAU 6.1	SYNTHÈSE DES SCÉNARIOS DE SIMULATION UTILISÉS DANS LE CADRE DE LA CARACTÉRISATION HYDRODYNAMIQUE	53

FIGURES

FIGURE 2.1	REPRÉSENTATION SCHÉMATIQUE DES COURANTS HÉLICOÏDAUX ET DE LA ZONE DE CISAILLEMENT GÉNÉRALEMENT PRÉSENTS À LA CONFLUENCE DE DEUX RIVIÈRES. A. CAS À DEUX COURANTS HÉLICOÏDAUX OPPOSÉS CONVERGEANT À LA SURFACE. B. CAS D'UN SEUL COURANT HÉLICOÏDAL EN SENS HORAIRE.....	6
FIGURE 3.1	EXTRAITS DE LA BATHYMÉTRIE DES FONDS DANS LE SECTEUR D'ÉTUDE (A), ET EN PARTICULIER AUTOUR DE LA POINTE À LANGEVIN (B) ISSUS DES RELEVÉS RÉALISÉS EN SEPTEMBRE 2017	10
FIGURE 3.2	AXE DE LA FOSSE D'AFFOUILLEMENT AU POINT DE CONFLUENCE DE LA PETITE RIVIÈRE PÉRIBONKA AVEC LA RIVIÈRE PÉRIBONKA	12
FIGURE 3.3	ÉVOLUTION DE LA MORPHOLOGIE DE LA FOSSE ENTRE 2014 ET 2017.....	13
FIGURE 3.4	ÉVOLUTION DE LA MORPHOLOGIE DE LA PETITE RIVIÈRE PÉRIBONKA EN AMONT DE LA FOSSE ENTRE 2014 ET 2017.....	14

FIGURE 3.5	ÉVOLUTION DE LA MORPHOLOGIE DE LA RIVIÈRE PÉRIBONKA EN AVAL IMMÉDIAT DE LA FOSSE ENTRE 2014 ET 2017.....	15
FIGURE 3.6	ÉVOLUTION DE LA MORPHOLOGIE DE LA RIVIÈRE PÉRIBONKA AU DROIT DE LA FOSSE SECONDAIRE ENTRE 2014 ET 2017	15
FIGURE 3.7	ÉVOLUTION DE LA MORPHOLOGIE DE LA RIVIÈRE PÉRIBONKA EN AVAL DE LA FOSSE SECONDAIRE ENTRE 2014 ET 2017	16
FIGURE 4.1	NIVEAUX MINIMUM, MAXIMUM ET MOYEN DU LAC SAINT-JEAN (ROBERVAL, STATION 062914) SUR LA PÉRIODE 1986-2017 ET COMPARAISON AVEC 2016 ET 2017	20
FIGURE 4.2	DÉBITS JOURNALIERS MINIMUM, MAXIMUM ET MOYEN DE LA RIVIÈRE PÉRIBONKA (CHUTE-À-LA-SAVANE) SUR LA PÉRIODE 1975-2017 ET COMPARAISON AVEC LES ANNÉES 2016 ET 2017	22
FIGURE 4.3	DÉLIMITATION DU BASSIN VERSANT DE LA PETITE RIVIÈRE PÉRIBONKA AU DROIT DE LA STATION HYDROMÉTRIQUE DU MDELCC (061801) ET AU DROIT DE LA POINTE À LANGEVIN.....	24
FIGURE 4.4	DÉBITS JOURNALIERS MINIMUM, MAXIMUM ET MOYEN DE LA PETITE RIVIÈRE PÉRIBONKA (STATION 061801) SUR LA PÉRIODE 1975-2017 ET COMPARAISON AVEC LES ANNÉES 2016 ET 2017	25
FIGURE 4.5	CONTOURS DES TERRITOIRES JAUGÉ ET NON JAUGÉ DU BASSIN VERSANT DE LA PETITE RIVIÈRE PÉRIBONKA ET LOCALISATION DES STATIONS MÉTÉOROLOGIQUES	27

FIGURE 4.6	ÉCARTS DES DÉBITS OBSERVÉS EN 2017 PAR RAPPORT AUX MOYENNES CALCULÉES SUR LA PÉRIODE 1975-2017. RIVIÈRE PETITE-PÉRIBONKA (PP, STATION 061801), RIVIÈRE PÉRIBONKA (CHUTE-À-LA-SAVANE) ET SOMME DES DEUX RIVIÈRES (PPP).....	30
FIGURE 4.7	POURCENTAGE DE COUVERTURE DE GLACE (ENTRE 0 ET 1) AU DROIT DE LA POINTE À LANGEVIN - ANALYSE DES IMAGES SATELLITAIRES LANDSAT DU 1 ^{ER} NOVEMBRE AU 15 MAI SUR LA PÉRIODE 1972-2017	32
FIGURE 4.8	DATE DU DÉPART DES GLACES DU LAC SAINT-JEAN (DONNÉES DU SITE WWW.DEPARTDESGLACES.ORG)	33
FIGURE 4.9	ENGLACEMENT AU DROIT DE LA POINTE À LANGEVIN (IMAGE LANDSAT DU 19 AVRIL 2009).....	34
FIGURE 4.10	CONDITIONS DE GLACE EN AVRIL 2017 : A) PHOTO D'UN DRONE LE 16 AVRIL 2017 (<i>LE NOUVELLES HEBDO</i>); B) IMAGE SATELLITE DU 13 AVRIL 2017	35
FIGURE 4.11	LISTE DES TEMPÊTES RELEVÉES EN 2016 SELON LES CRITÈRES DU GROUPE LASALLE NHC	37
FIGURE 5.1	LOCALISATION DES FORAGES 17F01 ET 17F02 RÉALISÉS EN DÉCEMBRE 2017	40
FIGURE 5.2	POSITIONNEMENT DES SOLS EN PRÉSENCE SUR LE DIAGRAMME D'HJULSTRÖM ET SENSIBILITÉ À L'ÉROSION	43
FIGURE 5.3	LOCALISATION DES COUPES PL4, PL5 ET PL7 AYANT FAIT L'OBJET DE CALCULS DE STABILITÉ	44
FIGURE 6.1	DÉLIMITATION DU SECTEUR MODÉLISÉ.....	52

FIGURE 6.2	MODÈLE NUMÉRIQUE DE TERRAIN – MORPHOLOGIE DE 2017 (LE RATIO DISTANCE Z ET XY EST EXAGÉRÉ POUR AMÉLIORER LE RENDU VISUEL)	55
FIGURE 6.3	REPRÉSENTATION DE LA MORPHOLOGIE DE 2016 (A) ET DE 2017 (B) DANS LES MODÈLES DANS LE SECTEUR DE LA POINTE À LANGEVIN	56
FIGURE 6.4	REPRÉSENTATION DES RECIRCULATIONS (COMPOSANTE VERTICALE DE LA VITESSE) AU DROIT DE LA FOSSE POUR LE 10 MARS 2017 (DYN-GLA-10/03-17-GEO16) VS UN 10 MARS « MOYEN » (DYN-GLA-10/03-MOY-GEO16) - EFFETS DU COUVERT DE GLACE NON CONSIDÉRÉS	57
FIGURE 6.5	COMPARAISON DE L'AMPLITUDE DES VITESSES D'ÉCOULEMENT DANS LE SECTEUR DE LA POINTE À LANGEVIN EN PRÉSENCE ET EN L'ABSENCE D'UN COUVERT DE GLACE – CONDITIONS DE NIVEAUX ET DÉBITS DU 10 MARS 2017 (DYN-GLA-10/03-17-GEO16)	59
FIGURE 6.6	REPRÉSENTATION DES RECIRCULATIONS (COMPOSANTE VERTICALE DE LA VITESSE) AU DROIT DE LA FOSSE POUR LE 29 AVRIL 2017 (DYN-29/04-17-GEO16) VS UN 29 AVRIL « MOYEN » (DYN-29/04-MOY-GEO16)	60
FIGURE 6.7	REPRÉSENTATION DES VITESSES D'ÉCOULEMENT AU DROIT DE LA FOSSE POUR LE 29 AVRIL 2017 (DYN-29/04-17-GEO16) VS UN 29 AVRIL « MOYEN » (DYN-29/04-MOY-GEO16)	61
FIGURE 6.8	REPRÉSENTATION DES VITESSES D'ÉCOULEMENT AU DROIT DE LA FOSSE POUR LE 29 AVRIL (DYN-	

	29/04-17-GEO17 ET DYN-29/04-MOY-GEO17), LE 3 MAI (DYN-03/05-17-GEO17 ET DYN-03/05-MOY-GEO17) ET LE 9 MAI (DYN-09/05-17-GEO17 ET DYN-09/05-MOY-GEO17)63
FIGURE 6.9	REPRÉSENTATION DES VITESSES D'ÉCOULEMENT AU DROIT DE LA FOSSE POUR LES CONDITIONS RENCONTRÉES LE 29 AVRIL 2017, AVANT (DYN-29/04-17-GEO16) ET APRÈS (DYN-29/04-17-GEO17) SON APPROFONDISSEMENT64
FIGURE 6.10	REPRÉSENTATION DES VITESSES D'ÉCOULEMENT AU DROIT DE LA FOSSE POUR LES CONDITIONS RENCONTRÉES LE 25 SEPTEMBRE 2017 (ATT-25/09-17-GEO17)66
FIGURE 6.11	AMPLITUDE DES VAGUES (M), CORRESPONDANT À LA TEMPÊTE DU 12 NOVEMBRE 2016, GÉNÉRÉE PAR LE MODÈLE TOMAWAC SUR LE DOMAINE D'ÉTUDE67
FIGURE 6.12	VITESSE À LA SURFACE DE L'EAU DANS LE SECTEUR DE LA POINTE À LANGEVIN, LORS DE LA TEMPÊTE DU 12 NOVEMBRE 2016, SIMULÉE PAR TELEMAC-3D.....68
FIGURE 7.1	PISTES DE SOLUTIONS PRINCIPALES77
FIGURE 7.2	PISTES DE SOLUTIONS COMPLÉMENTAIRES.....81
FIGURE 7.3	PISTES DE SOLUTIONS PEU RÉALISTES.....83

ANNEXES

- A** RELEVÉS BATHYMÉTRIQUES SEPTEMBRE 2017
- B** ÉVOLUTION DE LA BATHYMÉTRIE ENTRE 2014 ET 2017 AUTOUR DE LA POINTE À LANGEVIN
- C** ÉLABORATION DES MODÈLES NUMÉRIQUES ET ÉTALONNAGE
- D** RAPPORT DES SONDAGES GÉOTECHNIQUES
- E** ANALYSES DE STABILITÉ GÉOTECHNIQUE

1 CONTEXTE - OBJECTIFS

1.1 INTRODUCTION

Le secteur de la Pointe à Langevin fait face à une problématique d'érosion, à la confluence de la rivière Péribonka et de la Petite rivière Péribonka, à Dolbeau-Mistassini. Bien que le phénomène d'érosion puisse se produire depuis de nombreuses années, c'est en 2016 que la problématique a été réellement mise en évidence à la suite d'un premier décrochement de talus localisé.

À la suite du premier glissement de terrain signalé en mars 2016, un empierrement a été mis en place en vue de stabiliser le talus au mois d'août de la même année. En dépit de cette intervention, de nouveaux décrochements, de plus grandes envergures, étaient signalés à partir de mars 2017 à l'endroit même du premier.

Le phénomène d'érosion apparaissant rapidement comme étant particulièrement complexe et différent des phénomènes d'érosion normalement traités dans le cadre du Programme de stabilisation des berges du lac Saint-Jean, aucune intervention efficace ne semblait possible à court terme (Norda Stelo, 2017). Pour s'en convaincre, Rio Tinto Alcan (RTA) a alors mandaté WSP Canada Inc. (WSP) afin de réaliser un diagnostic préliminaire de la situation à l'automne 2017, sur la base des informations alors disponibles. Dans le cadre de ses premières analyses, WSP a pu confirmer la nature complexe du processus d'érosion et mettre en évidence l'origine fluviale des désordres observés. En effet, il apparaissait que l'érosion en berge observée était due à un approfondissement majeur de la fosse formée au point de confluence par le mélange turbulent des eaux de la rivière Péribonka et de la Petite rivière Péribonka. Par ailleurs, l'hydraulicité particulièrement importante de la Petite rivière Péribonka en hiver et au printemps 2017, seul paramètre ayant été modifié dans les processus régissant l'hydrodynamique de la confluence, indiquait que cette dernière avait joué un rôle déclencheur dans l'approfondissement de la fosse et l'érosion des berges. Ces constats confirmaient alors que le traitement de la problématique observée à Pointe à Langevin, liée à de l'érosion fluviale, sortait du cadre du Programme de stabilisation des berges du lac Saint-Jean, dédié à contrer les problématiques d'érosion liées au rehaussement du niveau du lac par RTA.

Malgré tout, RTA a souhaité poursuivre son engagement en mandatant WSP pour élaborer un plan de travail permettant d'aboutir à l'obtention d'un document d'aide à la décision destiné aux différents partenaires du projet afin de déterminer les suites à donner. Le plan de travail proposé par WSP s'articule en deux étapes distinctes, soit d'abord la réalisation d'un diagnostic complet de la situation puis la réalisation d'une étude de faisabilité technico-économique permettant de documenter et comparer deux concepts d'aménagement avec le choix possible du statu quo.

La première étape, le diagnostic complet qui fait l'objet du présent rapport, intègre des acquisitions de données, notamment bathymétriques, hydrométriques et géotechniques, et la mise en œuvre d'outils de modélisation numérique en trois dimensions afin de bien comprendre et caractériser les processus d'érosion en cours.

1.2 SYNTHÈSE DU DIAGNOSTIC PRÉLIMINAIRE

Ce sont les conclusions du diagnostic préliminaire qui ont conduit à établir les objectifs et la méthodologie du diagnostic complet. Il est donc important de rappeler ici, dans les grandes lignes, quelles étaient ces premières conclusions.

Tout d'abord, la Pointe à Langevin constitue un secteur naturellement vulnérable à l'érosion. En effet, cette étroite pointe de terre, qui sépare la Petite rivière Péribonka et la rivière Péribonka, est théoriquement soumise à l'érosion fluviale sur ses deux côtés ainsi qu'à son extrémité. En particulier, elle constitue l'extérieur d'une courbe de la Petite rivière Péribonka (forte exposition à l'érosion) et force la rencontre de celle-ci avec la rivière Péribonka selon un angle très élevé, de l'ordre de 160°. Pour expliquer la relative stabilité de la pointe au fil des ans malgré sa grande exposition naturelle, le rehaussement des niveaux du lac Saint-Jean, à la suite de la construction du barrage de L'Isle-Maligne au milieu des années 20', a été mis de l'avant lors du diagnostic préliminaire. En effet, l'augmentation importante des niveaux d'eau dans le lac a créé du refoulement dans les embouchures de cours d'eau, imposant ainsi un niveau d'eau très élevé autour de la pointe une grande partie de l'année. Cet effet de refoulement conduit à une réduction importante des vitesses d'écoulement dans les rivières et donc une réduction des contraintes d'érosion fluviale. À la fin de l'hiver, lors de l'abaissement des niveaux du lac Saint-Jean en vue de l'arrivée de la crue printanière, les rivières retrouvent en partie leur dynamique naturelle. Toutefois, à cette période de l'année, les débits sont encore généralement faibles et l'érosion fluviale peu active. Bien que le refoulement créé par le barrage semble protéger la pointe de l'érosion fluviale la plupart du temps, la nature finit toujours par reprendre le dessus, notamment à l'occasion d'événements climatiques particuliers.

Bien que la Pointe à Langevin puisse subir diverses sollicitations fluviales, concernant les désordres constatés dernièrement à son extrémité, ce sont les turbulences créées par le mélange des eaux de la Petite rivière Péribonka et la rivière Péribonka, qui participent à la formation d'une fosse, qui sont jugées responsables.

Deux facteurs principaux contrôlent la profondeur et la forme de la fosse au point de confluence de deux cours d'eau, soit l'angle formé par les deux cours d'eau et leurs débits. Considérant que l'angle formé par les deux rivières n'a pas subi de modification au cours des dernières années, l'évolution rapide, principalement en 2017, devait trouver une explication du côté des débits. Tandis que les débits de la rivière Péribonka apparaissaient proches des moyennes, les débits de la Petite rivière Péribonka étaient quant à eux exceptionnellement élevés à l'hiver et au printemps 2017. Il a donc été établi que les débits exceptionnels de la Petite rivière Péribonka, notamment en période de bas niveau du lac à la fin de l'hiver, étaient les principaux responsables de l'approfondissement et de l'élargissement de la fosse ayant conduit aux désordres constatés.

Concernant l'évolution possible de l'érosion des berges, de multiples sources d'incertitude ont été identifiées, notamment l'imprévisibilité de la météo et donc des débits, la nature sensible des sols mise en évidence par une étude géotechnique réalisée par SNC-Lavalin, la complexité des phénomènes et la multiplicité des facteurs pouvant les influencer.

Le diagnostic préliminaire confirmait par ailleurs que pour qu'une intervention soit efficace, il faudrait qu'elle soit à l'échelle du phénomène et ferait donc nécessairement appel à de grands travaux, pouvant conduire à des impacts directs ou indirects majeurs, et qui devraient faire l'objet de demandes d'autorisation spécifiques.

1.3 OBJECTIFS DU MANDAT ET APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE

Le diagnostic complet avait pour objectif de confirmer et détailler les résultats obtenus à l'issue du diagnostic préliminaire de l'automne 2017. Ayant mis en évidence la complexité du phénomène et envisageant des études ultérieures de l'impact de diverses solutions, le diagnostic complet devait permettre de mettre à disposition tous les outils nécessaires à la compréhension des phénomènes passés, en cours ou à venir.

Le diagnostic complet s'articule autour des étapes suivantes :

- l'acquisition de données complémentaires. Deux campagnes d'investigation ont été réalisées lors de l'initiation du diagnostic, soit une campagne de relevés bathymétriques et hydrométriques à la fin septembre 2017 et une campagne de sondages géotechniques en décembre de la même année. Les données bathymétriques sont présentées au **chapitre 3** qui traite de la morphologie des cours d'eau tandis que les analyses géotechniques font l'objet du **chapitre 5**. De nombreuses données ont par ailleurs été collectées dans le cadre du diagnostic. Elles sont présentées à l'intérieur des différents chapitres qui en ont recours;
- la réalisation d'une revue de littérature permettant d'identifier l'ensemble des paramètres influençant les processus d'érosion aux points de confluence et ainsi de valider l'approche méthodologique (voir **chapitre 2**);
- la poursuite et la précision des analyses relatives aux débits, aux niveaux d'eau, aux vents et aux conditions de glace rencontrés en 2017 en comparaison avec les données historiques afin de caractériser les conditions « normales » et d'identifier les facteurs de changement (voir **chapitre 4**);
- la réalisation d'analyses géotechniques afin d'évaluer les risques de glissement à court terme et d'émettre un jugement quant à la sensibilité des sols à l'érosion et aux évolutions possibles de la fosse et des glissements (voir **chapitre 5**);
- l'élaboration de modèles numériques en trois dimensions afin de reproduire l'hydrodynamique complexe dans le secteur de la Pointe à Langevin. Ces modèles permettent de simuler et comparer des conditions hydrauliques variées, identifiées à l'issue des deux étapes précédentes, afin de caractériser les processus d'érosion (voir **chapitre 6**).

Les conclusions du diagnostic complet sont résumées au **chapitre 7**, lequel introduit par ailleurs les discussions relatives aux possibilités d'intervention en prévision de la phase suivante du projet.

2 INTRODUCTION AUX PROCESSUS D'ÉROSION FLUVIATILE AUX POINTS DE CONFLUENCE

Le but de ce chapitre est de présenter les principes théoriques entourant les processus hydrosédimentaires présents à la confluence des cours d'eau. Ces informations sont primordiales pour l'interprétation des résultats d'analyses présentés dans la suite du rapport.

Les conclusions présentées dans ce chapitre sont tirées de l'ouvrage spécialisé intitulé *River Confluences, Tributaries and the Fluvial Network*¹.

Les confluences de rivières sont des sites qui présentent des changements marqués multiples, notamment sur le plan de l'hydrologie, de l'hydraulique et de la dynamique sédimentaire. Ces changements brusques affectent les écoulements et le fond des rivières au droit du point de confluence et en aval.

Il a été mis en évidence que deux paramètres principaux régissent la forme des écoulements et la fosse d'affouillement caractéristique de la plupart des confluences, soit l'angle formé par la confluence et le ratio des débits des affluents. Toutefois, d'autres paramètres influencent également les processus hydrosédimentaires aux points de confluence, notamment la géométrie des lits de rivière à l'amont de la confluence (largeurs, profondeurs, tracé en plan). Puisque l'ensemble de ces paramètres est amené à évoluer au fil du temps (variations horaires, quotidiennes ou saisonnières des débits, ajustement de la morphologie des cours d'eau, etc.), les processus hydrosédimentaires sont en constante évolution. Par ailleurs, puisque ces multiples paramètres ne varient pas à la même vitesse et donc pas en même temps, les ajustements hydrosédimentaires ponctuels sont extrêmement difficiles à prédire avec certitude. Enfin, l'ajustement de la morphologie des lits de rivière aux points de confluence dépend également beaucoup de la nature des sédiments (granulométrie, cohésion, sensibilité à l'érosion), qui varie généralement selon la profondeur.

L'hydrodynamique qui dicte en grande partie les processus hydrosédimentaires est également très particulière aux points de confluence, et très complexe. Elle implique des accélérations, des zones de recirculation, la séparation des écoulements, mais surtout des zones de transition qui présentent de très hauts niveaux de turbulence. Le mélange des eaux aux points de confluence implique donc des écoulements hautement turbulents et tridimensionnels.

La limite entre les eaux des deux cours d'eau qui convergent constitue une zone de cisaillement où se créent des phénomènes non stationnaires comme les vortex. Ces turbulences augmentent localement le niveau d'énergie et pourraient être en bonne partie responsables de la formation de la fosse d'affouillement qui caractérise de nombreuses confluences. La zone de rencontre entre les écoulements en provenance de chacune des deux rivières doit donc retenir toute l'attention pour l'analyse de la fosse.

1 RICE, Stephen, ROY, Andre et RHOADS, Bruce (ed.). *River Confluences, Tributaries and the Fluvial Network*. John Wiley & Sons, 2008.

Par ailleurs, une caractéristique fondamentale des écoulements aux confluences est la formation d'écoulements hélicoïdaux en sens inverse, qui convergent près de la surface et se séparent à proximité du fond. La rencontre des deux écoulements hélicoïdaux en sens inverse correspond à la zone de cisaillement précédemment décrite et contribue à la formation de turbulences importantes. Il est également possible, selon la configuration du site, que seul l'un des deux cours d'eau présente ces courants hélicoïdaux marqués. Ce phénomène est illustré à la Figure 2.1.

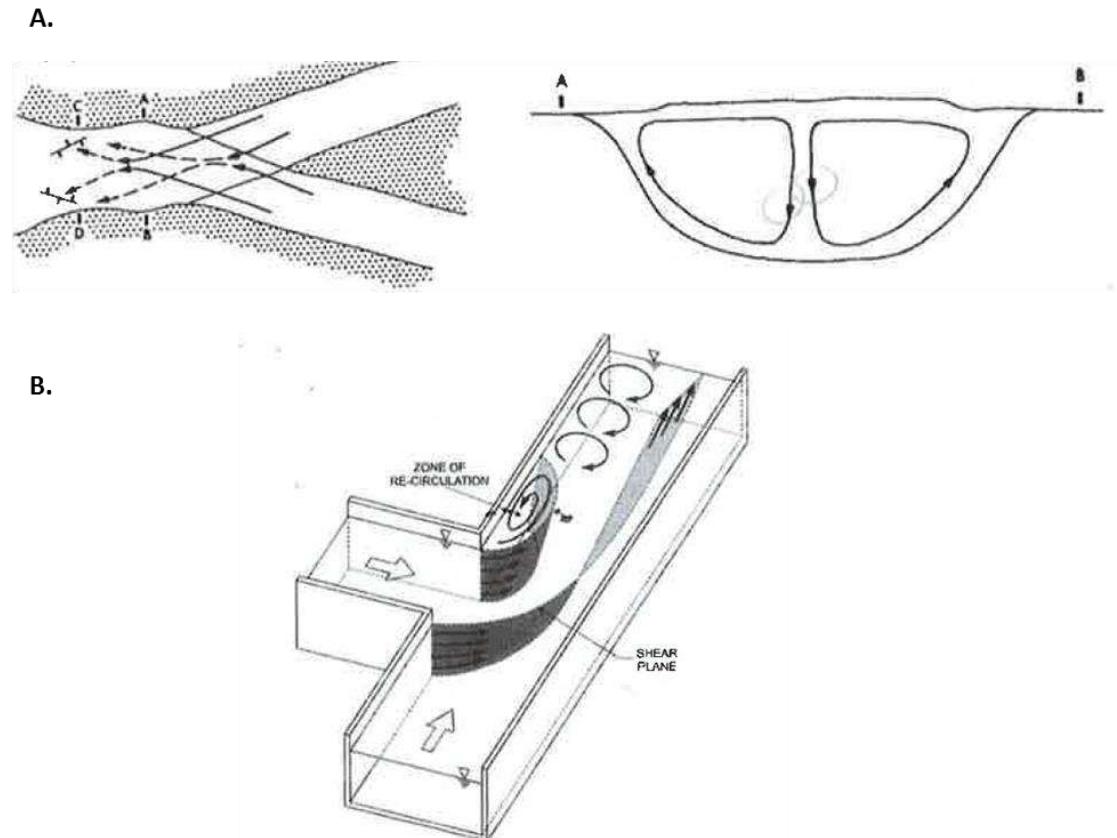


Figure 2.1 Représentation schématique des courants hélicoïdaux et de la zone de cisaillement généralement présents à la confluence de deux rivières.
A. Cas à deux courants hélicoïdaux opposés convergeant à la surface.
B. Cas d'un seul courant hélicoïdal en sens horaire²

Il faut noter que la quantité de sédiments transportés par les rivières qui confluent peut influencer la profondeur de la fosse. Plus les quantités de sédiments alimentant la fosse sont importantes et moins celle-ci aura tendance à s'approfondir.

La modélisation numérique peut aider à la compréhension des processus hydrodynamiques, mais fait face à plusieurs enjeux de taille comme la complexité des formes géométriques que revêt le fond des cours d'eau et la représentation des écoulements en trois dimensions. Pour ces raisons, la modélisation en deux dimensions ne constitue pas un outil pertinent. Cependant,

2 BIRON, Pascale M. et LANE, Stuart N. Modelling Hydraulics and Sediment Transport at River Confluences. *River Confluences, Tributaries and the Fluvial Network*, 2008, p. 17-43.

une modélisation en trois dimensions, basée sur des données précises quant à la géométrie du fond des cours d'eau, constitue un outil d'aide à la décision de premier ordre pour analyser de multiples conditions et scénarios et améliorer la compréhension des processus hydrodynamiques. Toutefois, les processus d'érosion liés aux phénomènes non stationnaires (fluctuations très momentanées des contraintes érosives dues aux vortex par exemple) demeurent très difficiles à représenter. Par ailleurs, les modèles numériques permettent de représenter l'hydrodynamique à un moment précis dans le temps, mais ne peuvent permettre d'obtenir une réponse directe sur l'évolution des phénomènes dans le temps. Pour ces raisons, l'analyse des résultats de modélisation est une étape cruciale du diagnostic afin d'en faire une juste interprétation. Encore aujourd'hui, la quantification des processus hydrosédimentaires aux points de confluence demeure très incertaine et doit encore faire l'objet de travaux de recherche scientifique.

En conclusion, en préambule aux prochains chapitres, il faut retenir que :

- la confluence de deux cours d'eau provoque des changements brusques et marqués sur le plan hydrosédimentaire;
- les processus hydrosédimentaires aux points de confluence sont en constante évolution, suivant les variations hydrométéorologiques et les ajustements morphologiques naturels;
- la nature des ajustements morphologiques des cours d'eau dépend en partie de la nature des sédiments rencontrés et de leur sensibilité à l'érosion;
- la zone de rencontre entre les eaux en provenance de chacun des affluents constitue la zone critique en regard à la formation de la fosse d'affouillement. Elle correspond à une zone où les turbulences sont importantes et où l'énergie augmente considérablement. Les turbulences non stationnaires ne peuvent être reproduites efficacement par les modèles numériques. L'identification de l'emplacement de la zone de rencontre des eaux aide à localiser l'axe et la position de la fosse;
- les écoulements qui confluent présentent généralement des formes hélicoïdales qui convergent en surface. L'identification de ces écoulements rotatifs grâce à la modélisation permet de caractériser la zone de rencontre des eaux où la fosse se crée;
- l'intensité de ces processus hydrodynamiques dépend de multiples facteurs, dont les principaux sont l'angle formé par les deux affluents, leurs débits et la forme des approches;
- les apports sédimentaires en provenance de l'amont du point de confluence et la nature des sédiments peuvent influencer l'amplitude des ajustements morphologiques et donc la profondeur de la fosse.

3 ANALYSE MORPHOLOGIQUE

3.1 CAMPAGNE DE RELEVÉS

Une campagne de relevés bathymétriques a été réalisée en début de mandat. Elle avait pour but de fournir un portrait réaliste et complet de la structure du fond de la Petite rivière Péribonka et de la rivière Péribonka à la fin de l'année 2017 (relevés réalisés du 25 au 29 septembre). Ces données sont d'une grande importance pour la compréhension des phénomènes, l'analyse de l'évolution de la fosse en comparaison avec les relevés antérieurs ainsi que comme intrant aux modélisations numériques prévues par ailleurs.

Les relevés bathymétriques ont couvert un large secteur (bien plus vaste que les relevés localisés réalisés dans le secteur de la Pointe à Langevin entre 2014 et juin 2017), englobant la Petite rivière Péribonka et la rivière Péribonka sur un linéaire significatif avant leur confluence, puis la rivière Péribonka jusqu'à son entrée à proprement parler dans le lac Saint-Jean. Des relevés multifaisceaux (couverture complète et continue sur toute la surface du fond) ont été réalisés dans l'environnement immédiat de la pointe et ont permis de préciser la forme et les dimensions des structures sédimentaires en place. Des relevés monofaisceau standard (mesure de la profondeur ponctuellement selon des axes précis) ont été réalisés pour compléter l'information dans les secteurs plus éloignés en amont et en aval dans les deux Péribonka. Les relevés bathymétriques réalisés sont présentés sur le plan 171-12050-00-H-001 de l'**annexe A**. Le second plan présenté en grand format dans cette même annexe, soit le 171-12050-00-H-002, présente quant à lui une interpolation des données bathymétriques monofaisceau, qui complète les données multifaisceaux, afin de fournir une image complète de la morphologie des fonds de la Petite rivière Péribonka et de la rivière Péribonka sur un vaste secteur. La Figure 3.1 présente des extraits de ces relevés bathymétriques au pourtour de la pointe et plus largement dans les deux rivières.

Note : Des relevés hydrométriques, c'est-à-dire la mesure de débits, de niveaux d'eau et de profils de vitesses dans la Petite rivière Péribonka et la rivière Péribonka, ont été réalisés en parallèle aux relevés bathymétriques les 25 et 26 septembre 2017. Ils sont quant à eux indispensables pour valider que les modèles numériques représentent adéquatement la réalité observée. Ces relevés ainsi que les analyses qui s'y rattachent sont présentés au chapitre 5.

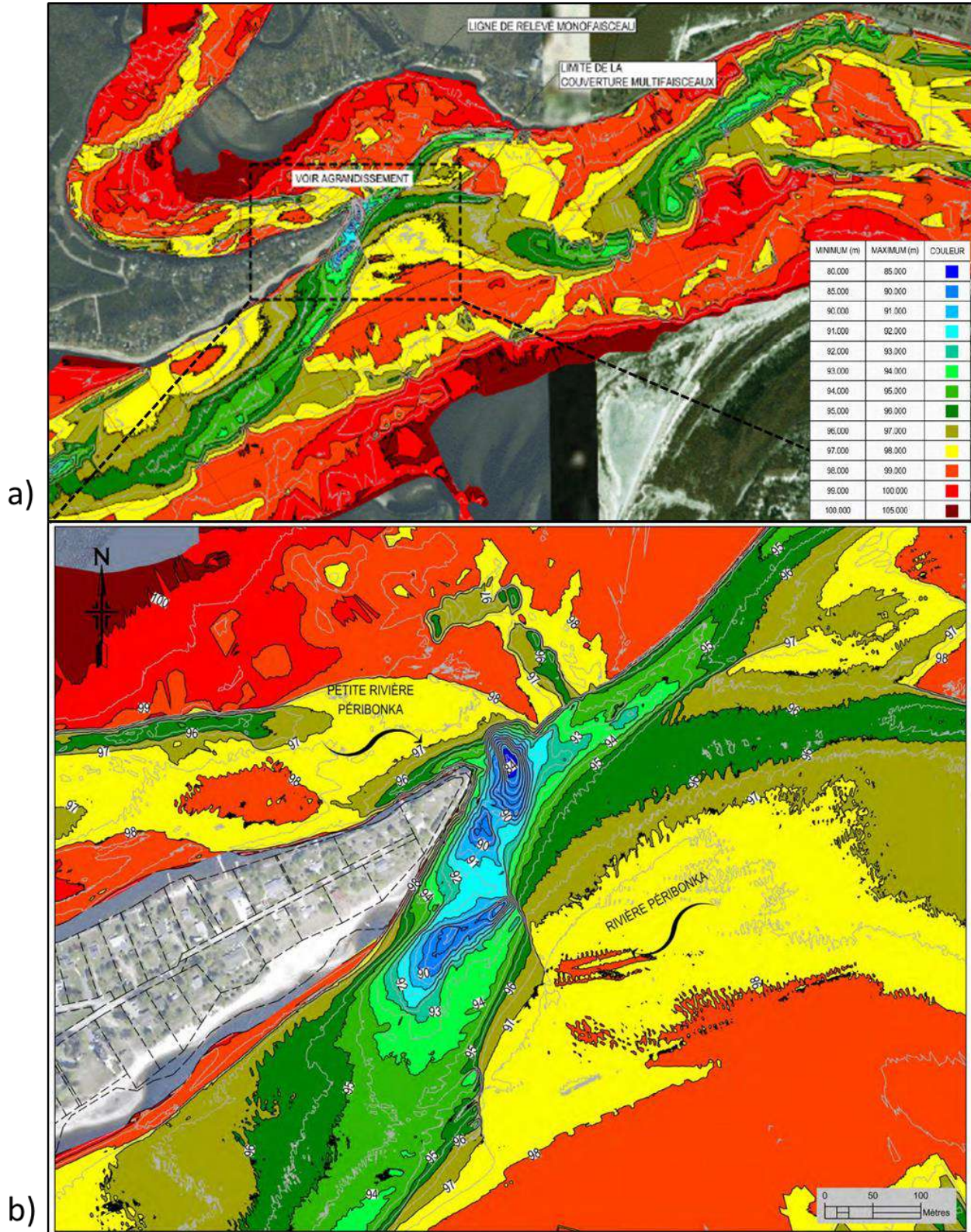


Figure 3.1 Extraits de la bathymétrie des fonds dans le secteur d'étude (a), et en particulier autour de la Pointe à Langevin (b) issus des relevés réalisés en septembre 2017

3.2 DESCRIPTION DES STRUCTURES MORPHOLOGIQUES OBSERVÉES

Les extraits présentés à la Figure 3.1, et mieux encore les plans de l'**annexe A**, permettent d'identifier plusieurs structures morphologiques qu'il est important de décrire avant de poursuivre les analyses.

À l'échelle de l'ensemble du secteur, on note tout d'abord que la rivière Péribonka comme la Petite rivière Péribonka présentent toutes deux un chenal principal plus marqué qui sinue à l'intérieur de leur lit alluvionnaire. Dans le cas de la rivière Péribonka, on remarque que ce chenal principal s'accompagne de chenaux secondaires plus ou moins bien définis. Au fil des ans, en fonction des débits, des conditions de glace et des apports sédimentaires, ces chenaux sont naturellement portés à se déplacer, mais aussi possiblement à s'élargir et/ou à s'approfondir.

Dans le cas de la Petite rivière Péribonka, en amont du secteur de la Pointe à Langevin, le chenal principal s'est a priori déplacé au fil des ans vers l'extérieur de la courbe, en rive droite. Ce déplacement latéral naturel s'est traduit par des accumulations de sédiments en rive gauche alors que la proximité du chenal avec la berge en rive droite cause désormais des problématiques d'érosion en rive droite (mise en place de perrés depuis plusieurs années).

Dans le cas de la Péribonka, aucune information disponible ne permet de déterminer les évolutions morphologiques au cours des dernières années ou décennies. Il n'est donc pas possible de déterminer si les chenaux secondaires observés aujourd'hui étaient auparavant des chenaux principaux, ni d'estimer la localisation et les dimensions du chenal principal et des chenaux secondaires il y a quelques années ou décennies. Toutefois, considérant la situation vécue actuellement à la Pointe à Langevin, il est possible d'émettre, en restant prudent, l'hypothèse que le chenal principal ait pu se déplacer, naturellement et progressivement, vers la rive droite dans le secteur de la pointe (extérieur de la courbe actuelle du chenal principal). Si cette hypothèse était juste, cela aurait pour effet de modifier progressivement la morphologie du lit du cours d'eau à l'approche de la pointe et de contribuer à un rapprochement de la fosse (point de rencontre des deux chenaux principaux) par rapport à la pointe au fil des ans.

En regardant désormais de plus près la morphologie du fond des rivières directement autour de la Pointe à Langevin, on remarque, grâce aux relevés de haute définition de septembre 2017, plusieurs structures, proches les unes des autres, mais clairement séparées. En premier lieu, de l'amont vers l'aval, on observe clairement la fosse d'érosion au point de rencontre du chenal principal de la Petite rivière Péribonka avec la Péribonka. Cette fosse, très profonde (environ 14 m entre les élévations 83 m et 97 m), présente un axe qui indique rapidement l'existence d'un lien direct avec l'entrée des écoulements de la Petite rivière Péribonka dans la Péribonka. En effet, cet axe, mis en évidence à la Figure 3.2 (en jaune), trouve son origine à l'intérieur de la Petite rivière Péribonka pour ensuite suivre la rive de la Pointe à Langevin, comme sous la contrainte de la rivière Péribonka qui le fait fléchir. L'érosion constatée en 2016 puis en 2017, qui fait l'objet du présent rapport, se situe sur un tronçon de rive positionné directement en surplomb de cette fosse principale. Ce constat quant à la morphologie des fonds permet de nous conforter dans l'hypothèse émise lors du diagnostic préliminaire, à savoir que la fosse aurait causé des glissements latéraux et provoqué le recul de berge.

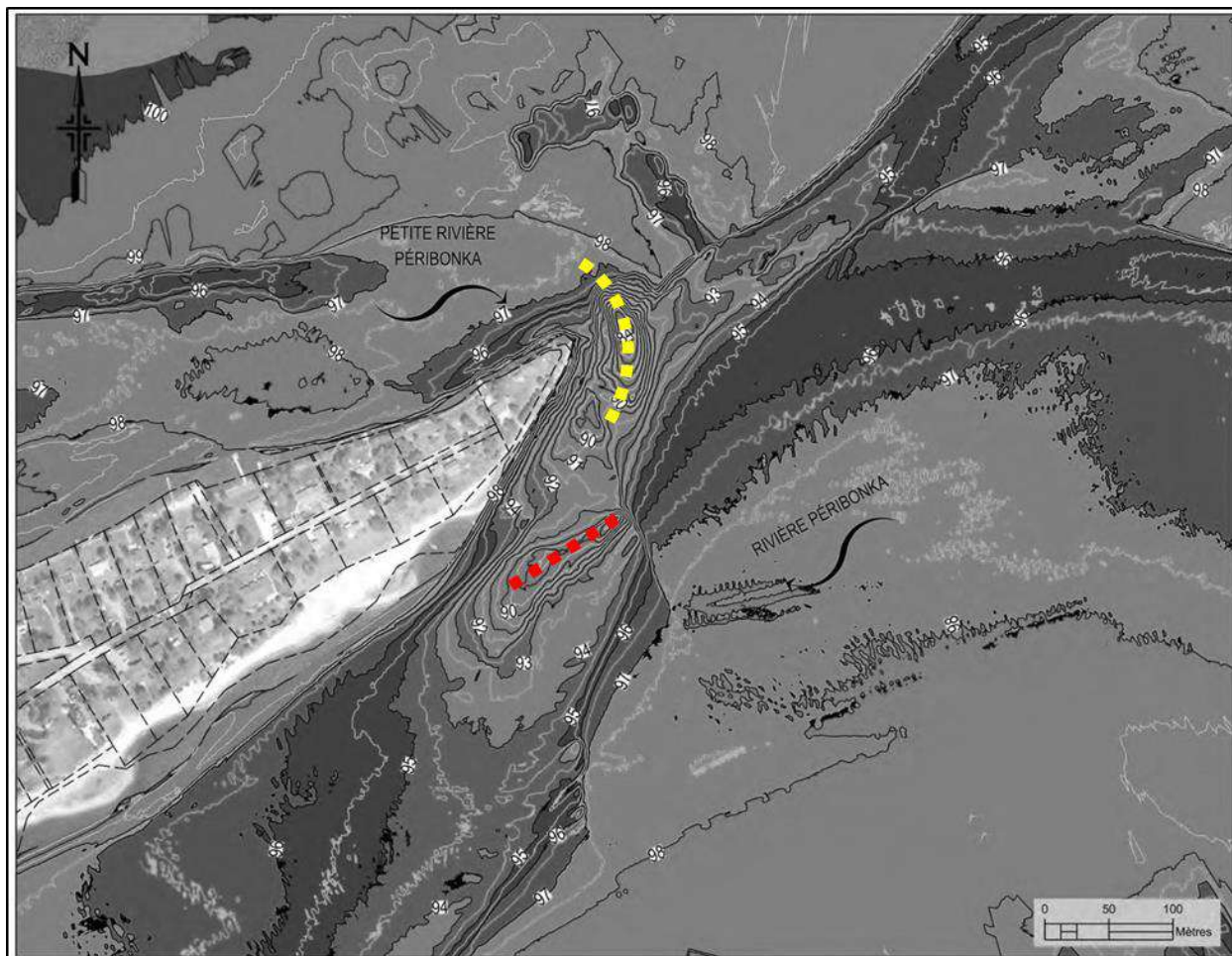


Figure 3.2 Axe de la fosse d'affouillement au point de confluence de la Petite rivière Péribonka avec la rivière Péribonka

Une seconde structure morphologique particulière apparaît en aval de la fosse principale. Cette seconde fosse (environ 9 m, entre les élévations 89 m et 97 m), présente un axe parallèle à la rive de la Pointe à Langevin, comme présenté sur la Figure 3.2, en rouge. On remarque par ailleurs, à l'extrémité amont de cette seconde fosse, une coupure nette dans la morphologie du fond de la Péribonka, perpendiculaire à la fosse et à l'écoulement. Cette seconde fosse et la structure morphologique particulière qui l'accompagne (coupure perpendiculaire à l'écoulement) sont difficilement explicables. Il pourrait s'agir du résultat de la combinaison des effets de confluence, de couches sédimentaires particulières (présence locale de couches plus facilement ou plus difficilement érodables) et des écoulements de la Péribonka. Actuellement, cette seconde fosse se situe plus au large et ne remet pas en question, dans son état actuel, la stabilité des terrains de la Pointe à Langevin situés vis-à-vis (voir chapitre 6).

3.3 ÉVOLUTION MORPHOLOGIQUE DEPUIS 2014

RTA fait réaliser des relevés bathymétriques dans le secteur de la Pointe à Langevin depuis 2014. Bien que la couverture de ces relevés soit de moindre envergure que celle de 2017, des sections bathymétriques peuvent être superposées, permettant une comparaison multi-dates.

Le plan de l'**annexe B** présente ces comparaisons multi-dates pour chacun des neuf profils bathymétriques suivis depuis 2014. Des extraits sont présentés dans cette section à l'appui des conclusions faites sur les évolutions morphologiques récentes.

Tout d'abord, la Figure 3.3 présente un extrait du profil 7 qui passe par l'extrémité de la pointe et travers la fosse principale dans sa partie centrale. Sur cet extrait, on remarque que :

- entre 2014 et 2016, la fosse s'est sensiblement approfondie, de l'ordre de 1 m environ (sous réserve des imprécisions pouvant être associées aux relevés et à leur superposition inexacte). Au cours de cette même période, son axe (point le plus profond) semble s'être déplacé vers le large de quelques mètres;
- au cours de l'année 2016, la fosse est demeurée stable;
- entre 2016 et 2017, la fosse s'est considérablement approfondie, soit de 6 m environ entre novembre 2016 et juin 2017. Là encore, son axe semble s'être sensiblement déplacé vers le large;
- les pentes latérales ne présentent pas de variation significative, l'approfondissement s'est donc accompagné d'un élargissement de la fosse.

Ces observations indiquent la particularité de l'hiver et du printemps 2017 qui ont provoqué un approfondissement brutal de la fosse.

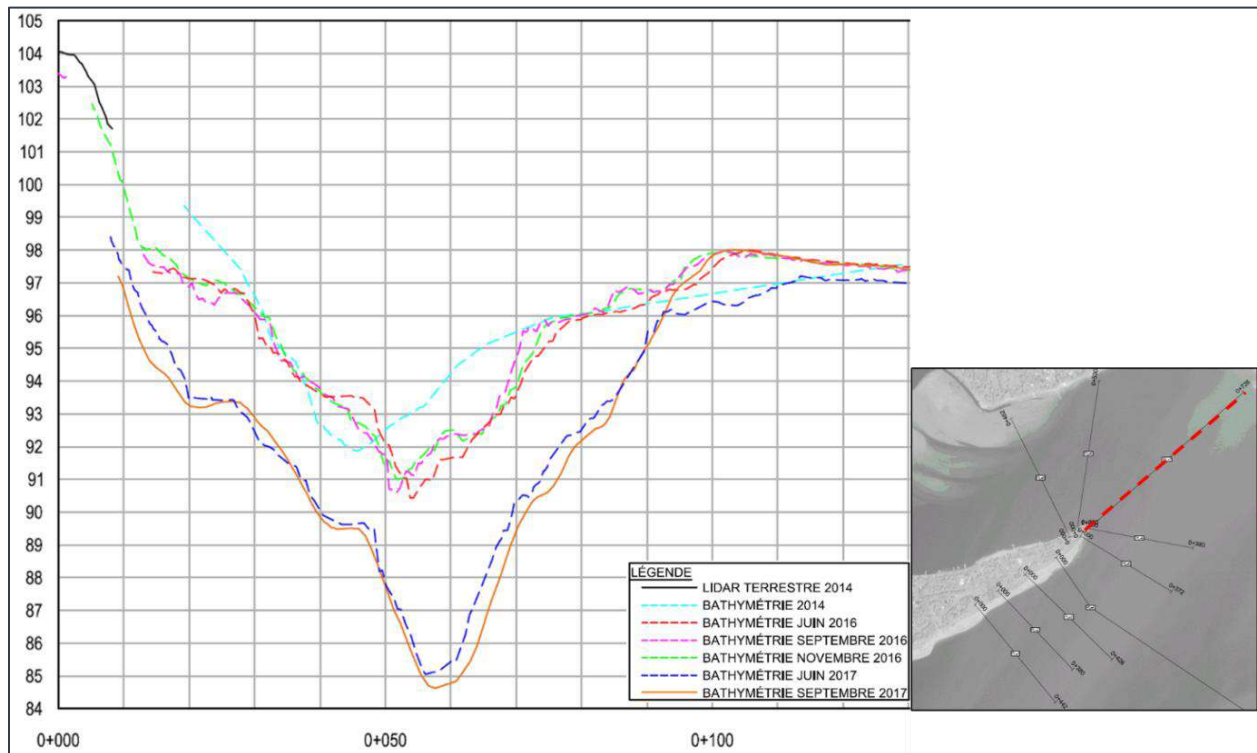


Figure 3.3 Évolution de la morphologie de la fosse entre 2014 et 2017

Si l'on regarde ensuite les sections situées directement en amont (Figure 3.4) et directement en aval (Figure 3.5), on remarque que :

- le chenal principal de la Petite rivière Péribonka s'est approfondi légèrement à l'approche de son entrée dans la fosse;
- aucune évolution morphologique significative ne s'est produite directement en aval de la fosse entre 2014 et 2016.

Ainsi, la fosse est très localisée et son approfondissement ne s'accompagne pas d'un étirement vers l'aval. Un phénomène d'érosion régressive (recul vers l'amont) semble se produire, sans toutefois conduire à un approfondissement très marqué. Les risques d'érosion semblent donc, pour l'instant, limités à l'extrémité de la Pointe à Langevin.

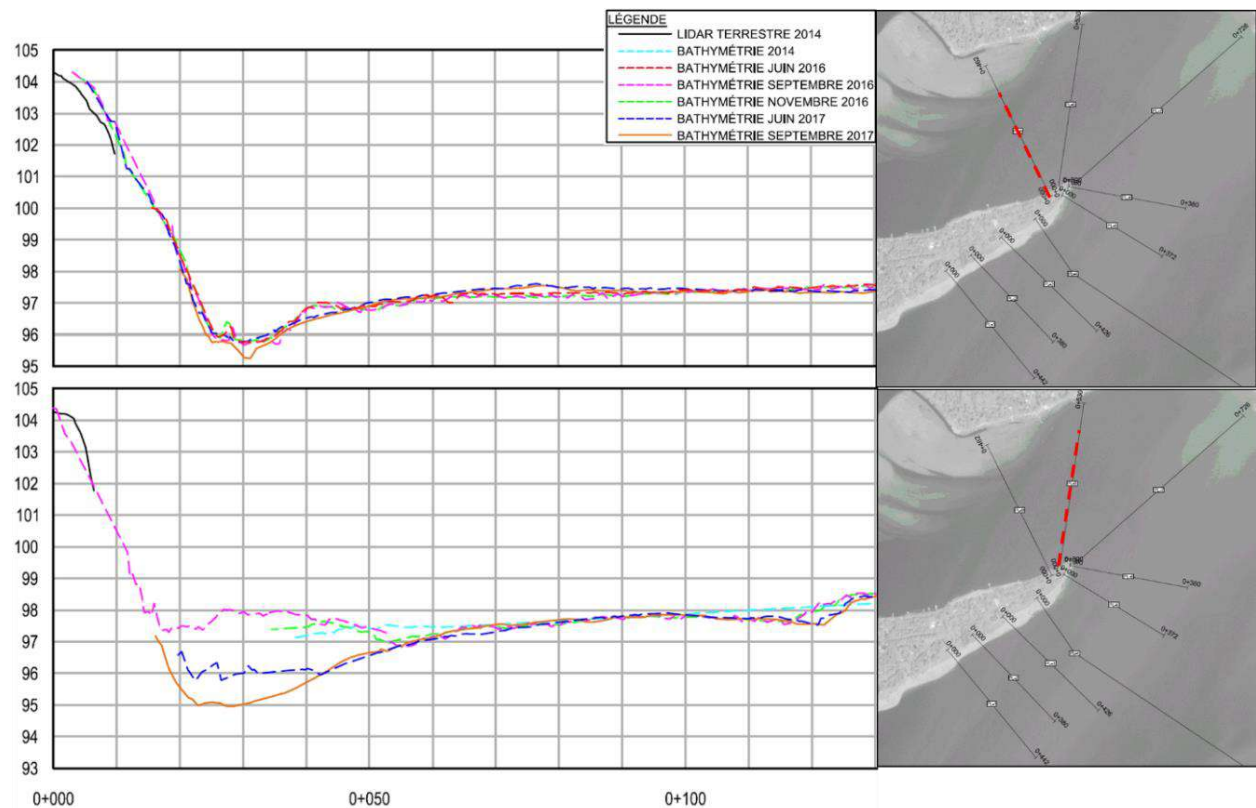


Figure 3.4 Évolution de la morphologie de la Petite rivière Péribonka en amont de la fosse entre 2014 et 2017

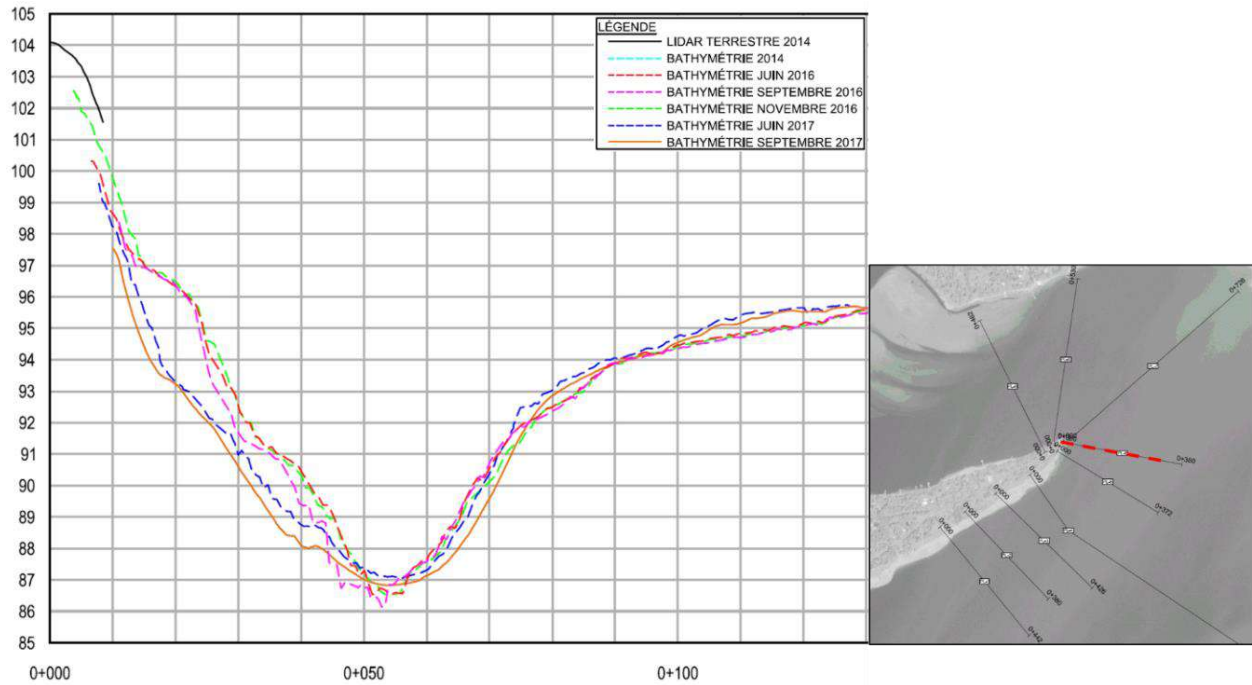


Figure 3.5 Évolution de la morphologie de la rivière Péribonka en aval immédiat de la fosse entre 2014 et 2017

À présent, plus en aval, la Figure 3.6 indique un approfondissement ou la formation de la seconde fosse entre novembre 2016 et juin 2017

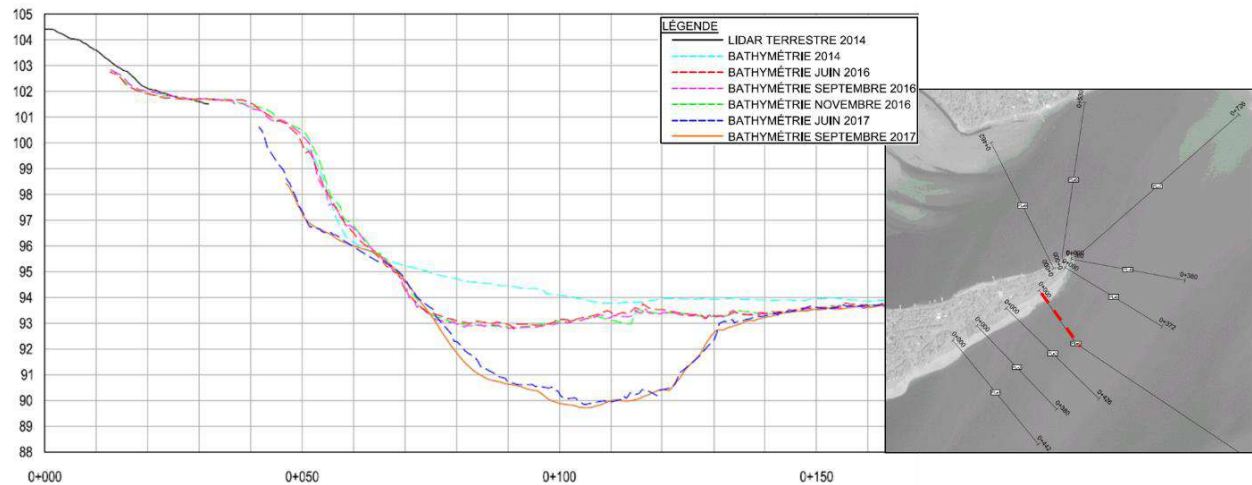


Figure 3.6 Évolution de la morphologie de la rivière Péribonka au droit de la fosse secondaire entre 2014 et 2017

Enfin, plus en aval dans la Péribonka, aucune évolution marquée des fonds n'est survenue dans la période de suivi comme en témoignent les extraits de la Figure 3.7. Cette stabilité apparente du chenal principal de la Péribonka en aval de la fosse, alors que les effets de confluence s'estompent, laisse à penser que l'évolution morphologique observée est liée à un changement survenu sur la Petite rivière Péribonka plutôt que sur la Péribonka.

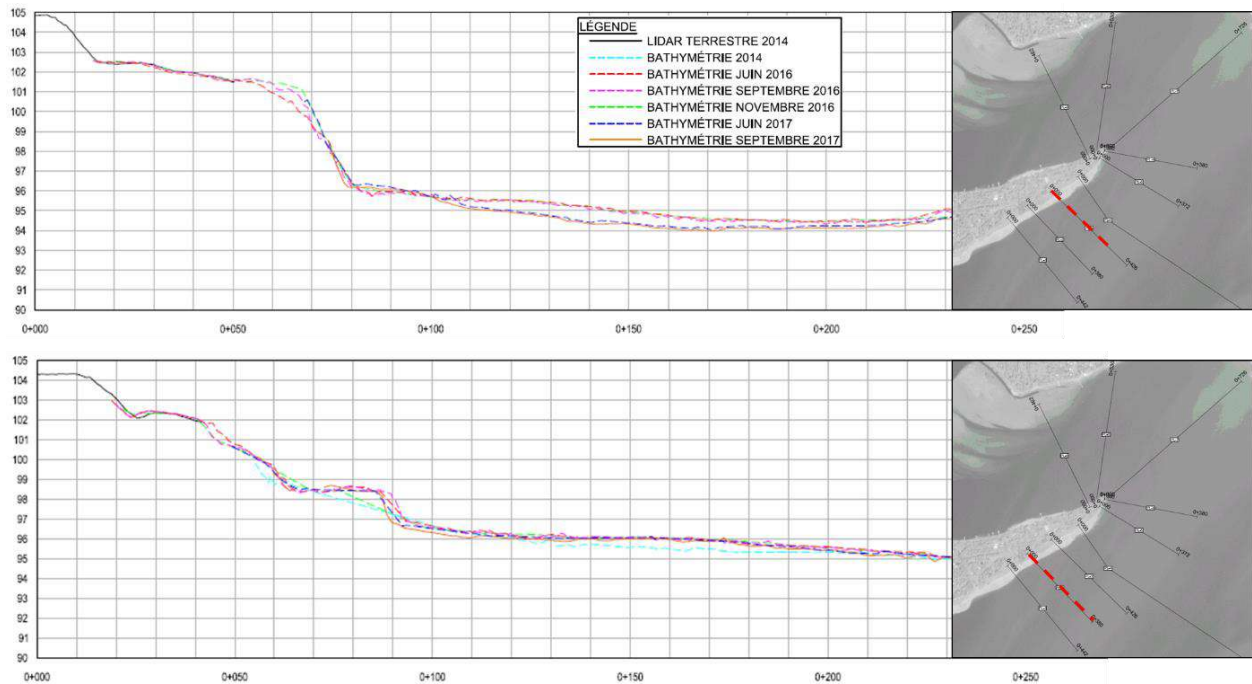


Figure 3.7 Évolution de la morphologie de la rivière Péribonka en aval de la fosse secondaire entre 2014 et 2017

3.4 CONCLUSIONS

Les relevés bathymétriques réalisés à l'automne 2017 mettent en évidence des structures complexes dans le fond des rivières, autour de la Pointe à Langevin. Les analyses réalisées dans ce chapitre ont permis de mettre en évidence les conclusions suivantes :

- les chenaux principaux qui se créent à l'intérieur du lit sédimentaire des deux rivières évoluent naturellement, notamment de manière à se déplacer latéralement. Un possible (hypothétique) déplacement latéral progressif du chenal principal de la rivière Péribonka vers la Pointe à Langevin pourrait avoir pour effet de contribuer à un rapprochement de la fosse (point de rencontre des deux chenaux principaux) par rapport à la pointe au fil des ans;
- la fosse principale située à l'extrémité de la pointe, très profonde (environ 14 m), présente un axe qui indique clairement l'existence d'un lien direct entre la formation de celle-ci et l'entrée des écoulements de la Petite rivière Péribonka dans la Péribonka;

- l'apparente stabilité du chenal principal de la Péribonka en aval de la fosse, alors que les effets de confluence s'estompent, laisse à penser que l'évolution morphologique observée plus en amont est liée à un changement survenu sur la Petite rivière Péribonka plutôt que sur la Péribonka;
- l'évolution importante et rapide de la fosse entre novembre 2016 et juin 2017 indique que des conditions particulières sont survenues au cours de l'hiver et du printemps 2017. Faisant le lien avec le rôle apparent de la Petite rivière Péribonka dans le processus de formation de la fosse, ce constat fournit un indice que des conditions hydrologiques particulières se sont produites sur cette rivière pendant cette période;
- la fosse est très localisée et son approfondissement ne s'accompagne pas d'un étirement vers l'aval. Un phénomène d'érosion régressive (recul vers l'amont) semble se produire, sans toutefois conduire à un approfondissement très marqué pour l'instant. Les risques d'érosion semblent donc, à ce stade, limités à l'extrémité de la Pointe à Langevin.

4 ANALYSES HYDROMÉTÉOROLOGIQUES

4.1 INTRODUCTION

Le présent chapitre constitue une synthèse des analyses réalisées relatives aux débits, aux niveaux d'eau, aux conditions de glace et aux vents. L'objectif principal de cette section consiste à comparer les données historiques avec les observations récentes afin d'identifier les facteurs de changement associés à l'évolution marquée de la fosse, principalement à la fin de l'hiver et au printemps 2017. Ainsi, il sera possible de confirmer et préciser les premières conclusions issues du diagnostic préliminaire lors duquel le débit de la Petite rivière Péribonka avait déjà été ciblé comme facteur de changement principal.

Par ailleurs, les analyses hydrométéorologiques présentées dans ce chapitre constituent un intrant indispensable pour les simulations numériques qui font l'objet du chapitre suivant.

4.2 NIVEAUX D'EAU DU LAC SAINT-JEAN

Les niveaux d'eau du lac Saint-Jean sont contrôlés par RTA, principalement par le barrage de L'Isle-Maligne. Le lac est ainsi maintenu à un niveau relativement stable de la mi-mai à la mi-janvier, autour de l'élévation 101,0 m. À partir de janvier, un abaissement préventif des niveaux du lac est effectué en préparation de l'arrivée de la crue printanière. Le niveau minimum du lac est généralement atteint au début du mois d'avril, avec une élévation du plan d'eau voisine de 97,6 m. L'augmentation des débits sur les différents tributaires du lac fait alors remonter progressivement le niveau de celui-ci qui atteint son maximum le plus souvent à la fin mai. La vitesse de remontée du lac et le niveau maximal atteint dépendent alors de l'importance des crues printanières sur les différents tributaires.

La station 062914 du ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MDDELCC) enregistre les niveaux du lac Saint-Jean à Roberval près du centre aquatique. Cette station est située à 27 km au sud-ouest de la Pointe à Langevin. Les données sont disponibles depuis septembre 1986. Cette station sert de référence dans le cadre de l'étude. Bien que l'effet des vents puisse conduire à observer des niveaux d'eau sensiblement différents autour du lac pour une même date (déplacement de la masse d'eau sous l'effet du vent dominant), on retient ici l'hypothèse que le niveau du lac à l'embouchure de la rivière Péribonka équivaut à celui mesuré à la station de Roberval.

La Figure 4.1 présente l'historique des niveaux d'eau du lac Saint-Jean (minimum, maximum et moyenne), relevés à la station Roberval (062914), sur la période 1986 à 2017³. À ces valeurs, s'ajoutent les observations des années 2016 et 2017.

3 À noter que la station n'a pas relevé de hauteur d'eau en 2012 entre le 28 mars et le 16 avril inclusivement.

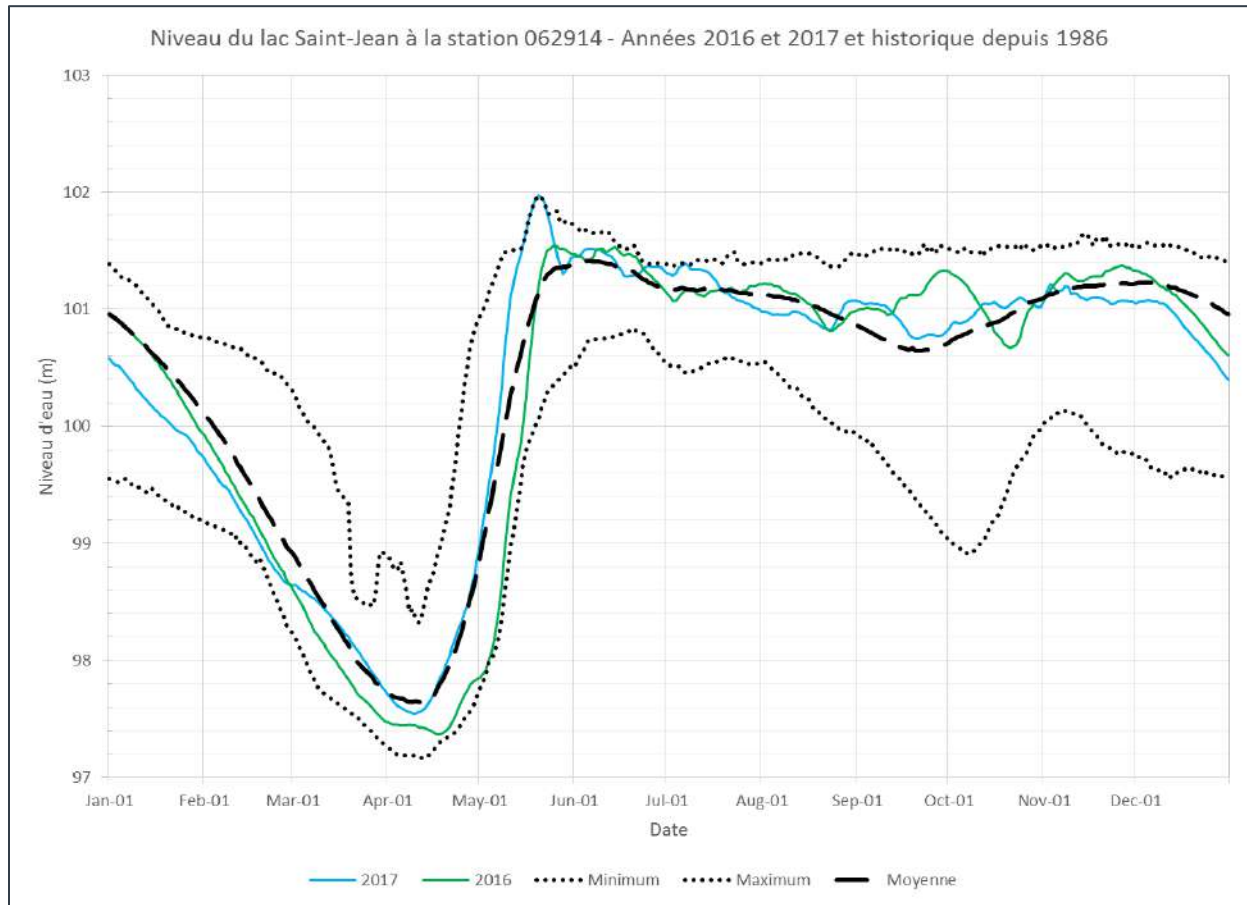


Figure 4.1 Niveaux minimum, maximum et moyen du lac Saint-Jean (Roberval, station 062914) sur la période 1986-2017 et comparaison avec 2016 et 2017

Le Tableau 4.1 présente les niveaux d'eau moyens mensuels historiques du lac Saint-Jean sur la période 1986-2017 (minimum, maximum, moyenne) relevés à la station Roberval (062914), puis les compare aux niveaux moyens mensuels observés en 2016 et en 2017.

Tableau 4.1 Niveaux d'eau moyens mensuels du lac Saint-Jean sur la période 1986-2017 (minimum, maximum, moyenne), relevés à la station Roberval (062914)

MOIS	NIVEAUX MOYENS MENSUELS (m)						
	Période 1986-2017			Année 2016	Comparaison 2016/Moy.	Année 2017	Comparaison 2017/Moy.
	Minimum	Moyenne	Maximum				
Janvier	99,4	100,6	101,0	100,5	-0,1 %	100,2	-0,4 %
Février	98,9	99,6	100,6	99,3	-0,3 %	99,2	-0,4 %
Mars	97,7	98,3	99,1	98,0	-0,3 %	98,3	0,0 %
Avril	97,3	97,9	99,4	97,5	-0,5 %	97,9	0,0 %
Mai	99,7	100,5	101,4	100,1	-0,5 %	101,0	0,5 %
Juin	100,7	101,3	101,5	101,4	0,1 %	101,4	0,1 %
Juillet	100,5	101,2	101,4	101,2	0,0 %	101,2	0,1 %
Août	100,2	101,0	101,3	101,0	0,0 %	100,9	-0,1 %
Septembre	99,5	100,7	101,5	101,1	0,4 %	100,9	0,2 %
Octobre	99,3	100,9	101,5	101,0	0,1 %	101,0	0,1 %
Novembre	100,0	101,2	101,5	101,3	0,1 %	101,1	-0,1 %
Décembre	99,6	101,1	101,5	101,0	-0,1 %	100,8	-0,3 %

Au cours de la période comprise entre février et mai, les niveaux deviennent tels que l'effet de refoulement du lac autour de la Pointe à Langevin s'estompe puis s'annule. Ainsi, la Petite rivière Péribonka et la rivière Péribonka retrouvent une dynamique hydrosédimentaire fluviale peu ou pas influencée par le lac Saint-Jean. C'est au cours de cette période, à la fin de l'hiver et au début du printemps, que les signes d'érosion ont été relevés à l'extrémité de la Pointe à Langevin, en 2016 comme en 2017. C'est donc la période qui retiendra le plus notre intérêt dans la suite des analyses.

Lorsque le niveau du lac est suffisamment élevé, la dynamique hydrosédimentaire côtière, c'est-à-dire influencée principalement par les vents et les courants littoraux, s'ajoute à la dynamique fluviale résiduelle.

À la suite de l'analyse des niveaux du lac en 2016 et 2017, on retiendra que les niveaux sont demeurés, pour ces années, dans un intervalle courant, sans présenter d'extrême pouvant justifier, à lui seul, une évolution rapide de la morphologie au point de confluence, notamment en 2017.

4.3 DÉBITS DE LA RIVIÈRE PÉRIBONKA ET DE LA PETITE RIVIÈRE PÉRIBONKA

Déjà lors du diagnostic préliminaire, l'importance des débits dans les processus hydrosédimentaires qui s'opèrent aux confluences avait été largement mise de l'avant. En effet, les autres paramètres influençant la formation des fosses d'affouillement au point de confluence, notamment l'angle de celle-ci, n'ayant pas subi de changement marqué au cours des dernières années, l'explication de l'évolution rapide observée ne semblait pouvoir provenir que des débits. Ce sont alors les débits exceptionnels de la Petite rivière Péribonka qui avaient été identifiés et décrits. À cette étape de consolidation du diagnostic préliminaire, à l'aide de nouvelles données, de nouvelles analyses des débits de la rivière Péribonka et de la Petite rivière Péribonka sont produites afin de confirmer et préciser les premières conclusions.

4.3.1 DÉBITS DE LA RIVIÈRE PÉRIBONKA

Les débits journaliers de la rivière Péribonka analysés dans le cadre de l'étude ont été fournis par RTA entre 1953 et 2017 au barrage de la Chute-à-la-Savane (X0000840), situé à 20 km en amont de la Pointe à Langevin. La superficie du bassin versant de la rivière Péribonka au droit du barrage de la Chute-à-la-Savane est d'environ 27 000 km². Aucun affluent significatif ne modifie les débits de la rivière Péribonka entre le barrage de la Chute-à-la-Savane et la confluence avec la Petite rivière Péribonka. À noter que les stations hydrométriques fédérales 02RC002 et 02RC009 fournissent ces mêmes informations au public.

La Figure 4.2 présente les débits journaliers minimum, maximum et moyen de la rivière Péribonka au barrage de la Chute-à-la-Savane pour la période 1975-2017. Cette période est retenue comme référence dans le cadre de la présente étude puisqu'elle correspond à la période pour laquelle des données de débits sont disponibles pour la Petite rivière Péribonka (voir section 4.3.2). Le choix d'une période de référence commune pour les deux rivières facilite l'analyse conjointe des données des deux cours d'eau (section 4.3.3). Afin d'évaluer sommairement si les années 2016 et 2017 présentent des anomalies qui pourraient expliquer l'évolution marquée de la fosse, les débits journaliers de ces deux années sont comparés aux normales sur cette même figure.

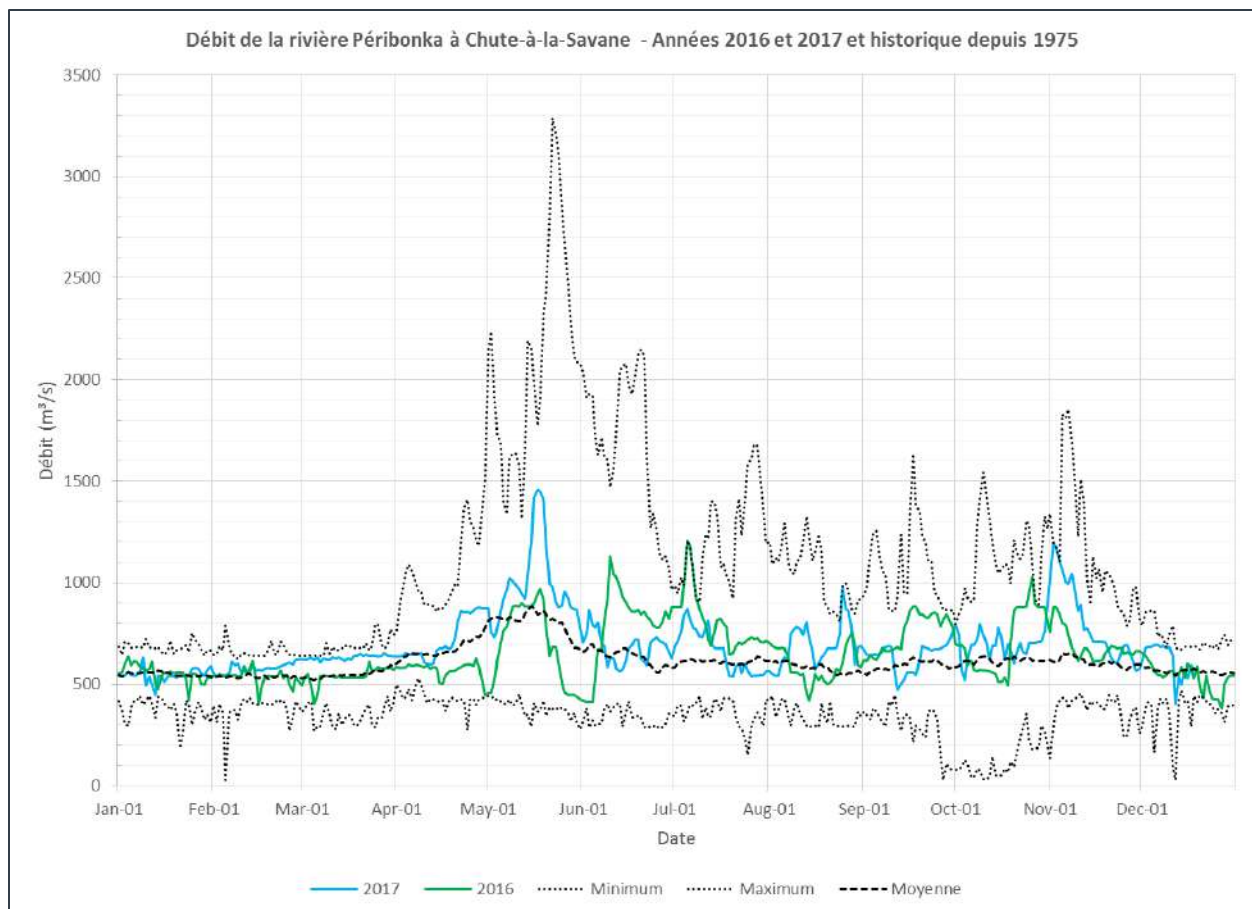


Figure 4.2 Débits journaliers minimum, maximum et moyen de la rivière Péribonka (Chute-à-la-Savane) sur la période 1975-2017 et comparaison avec les années 2016 et 2017

Le Tableau 4.2 présente les débits moyens mensuels historiques de la rivière Péribonka sur la période 1975-2017 (minimum, maximum, moyen) estimés à Chute-à-la-Savane, puis les compare aux débits moyens mensuels observés en 2016 et en 2017.

Tableau 4.2 Débits moyens mensuels de la rivière Péribonka à Chute-à-la-Savane sur la période 1975-2017 (minimum, maximum, moyenne) et débits moyens mensuels observés en 2016 et 2017

MOIS	DÉBITS MOYENS MENSUELS (m ³ /s)						
	Période 1975-2017			Année 2016	Comparaison 2016/Moy.	Année 2017	Comparaison 2017/Moy.
	Minimum	Moyenne	Maximum				
Janvier	423	549	643	553	1 %	544	-1 %
Février	425	536	630	536	0 %	576	7 %
Mars	379	548	641	539	-2 %	632	15 %
Avril	507	671	864	572	-15 %	719	7 %
Mai	478	807	1 873	697	-14 %	993	23 %
Juin	385	635	1 237	793	25 %	681	7 %
Juillet	394	611	962	806	32 %	663	9 %
Août	349	582	897	590	1 %	691	19 %
Septembre	389	592	932	754	27 %	635	7 %
Octobre	131	616	928	707	15 %	694	13 %
Novembre	446	609	970	691	13 %	802	32 %
Décembre	416	564	698	535	-5 %	618	10 %

Bien que les débits de la rivière Péribonka aient été sensiblement supérieurs à la moyenne à la fin de l'hiver et au début du printemps 2017 (+7 à +23 %), ils sont compris dans un intervalle de valeurs habituelles. Notons par ailleurs que l'écart entre les valeurs moyennes et les maxima / minima est relativement faible dans cette période du fait de la gestion des eaux retenues sur la partie amont du bassin versant. Les débits de la rivière Péribonka sont analysés conjointement à ceux de la Petite rivière Péribonka dans la section 4.3.3.

4.3.2 DÉBITS DE LA PETITE RIVIÈRE PÉRIBONKA

Les débits de la Petite rivière Péribonka sont estimés par le MDDELCC à la station 061801 qui est située à 14 km en amont de la Pointe à Langevin (200 m en amont de la route 169). La superficie du bassin versant drainé au droit de la station est de 1 002 km² et le régime d'écoulement est naturel, c'est-à-dire que le mouvement de l'eau dans la rivière ne subit pas de modification en raison de la présence de structures de retenue ou de régularisation de l'écoulement comme des digues ou des barrages (MDDELCC, 2017). Les données à cette station sont disponibles depuis octobre 1974.

Note : L'estimation des débits à la station hydrométrique du MDDELCC peut être perturbée par la présence de glace en hiver. La glace influence en effet le niveau d'eau mesuré par la station et l'utilisation de la courbe de tarage (relation niveau mesuré / débit de la rivière), établie en période libre de glace, s'accompagne alors d'erreurs qui peuvent être significatives. Le MDDELCC procède régulièrement à des corrections sur les valeurs de débits diffusées

pour tenir compte de ces effets de glace. Les corrections sont réalisées à partir de deux mesures de débits réalisées chaque hiver par leurs équipes. Toutes les données hivernales sont alors corrigées à partir des deux valeurs ponctuelles de débit obtenues au site. Il est donc important de retenir que les débits hivernaux sont entachés d'incertitudes significatives et doivent être utilisés avec prudence.

La superficie du bassin versant intermédiaire entre la station 061801 et la Pointe à Langevin est de 199 km², ce qui correspond à 20 % de la superficie drainée à la station. Le principal affluent de ce bassin intermédiaire est la rivière Moreau, qui rejoint la Petite rivière Péribonka en rive gauche (à l'est) peu en amont de la confluence avec la rivière Péribonka. La Figure 4.3 présente la délimitation de ces bassins versants.

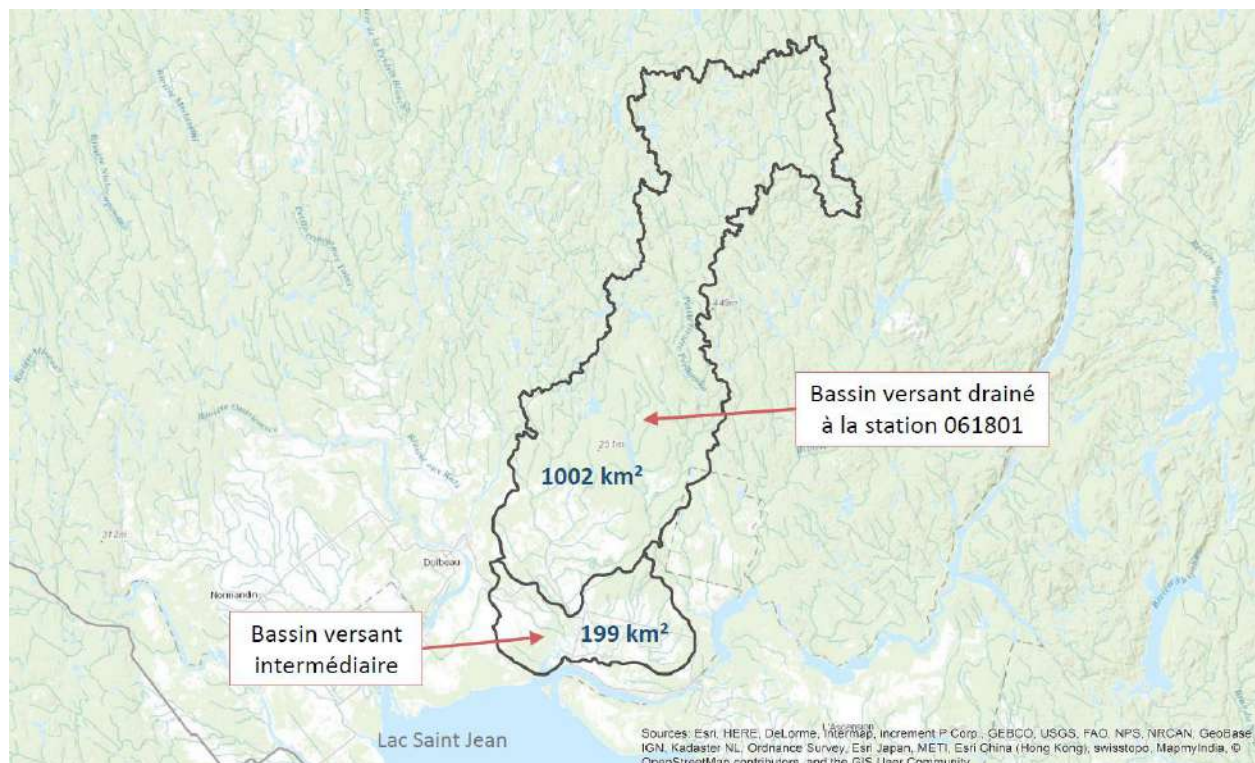


Figure 4.3 Délimitation du bassin versant de la Petite rivière Péribonka au droit de la station hydrométrique du MDDELCC (061801) et au droit de la Pointe à Langevin

Puisque la station hydrométrique ne couvre pas l'entièreté du bassin versant au droit du secteur à l'étude, les débits de la Petite rivière Péribonka fournis à la station doivent être corrigés afin d'estimer les débits au point de confluence avec la rivière Péribonka (voir encadré). Ces débits corrigés seront nécessaires pour les analyses réalisées au chapitre 5 (modélisation hydrodynamique). Toutefois, les analyses comparatives réalisées dans la présente section, soit entre les années 2016, 2017 et l'historique des enregistrements depuis 1975, ont été réalisées directement à partir des données à la station. En effet, les résultats d'une telle comparaison ne sont pas influencés par une correction systématique des débits (majoration constante des débits à la station pour obtenir les débits à la confluence) et l'utilisation directe des débits observés à la station fournit donc des résultats comparatifs fiables.

La Figure 4.4 présente les débits journaliers minimum, maximum et moyen de la Petite rivière Péribonka à la station du MDDELCC (061801) pour la période 1975-2017. Afin d'évaluer sommairement si les années 2016 et 2017 présentent des anomalies qui pourraient expliquer l'évolution marquée de la fosse, les débits journaliers de ces deux années sont comparés aux normales sur cette même figure.

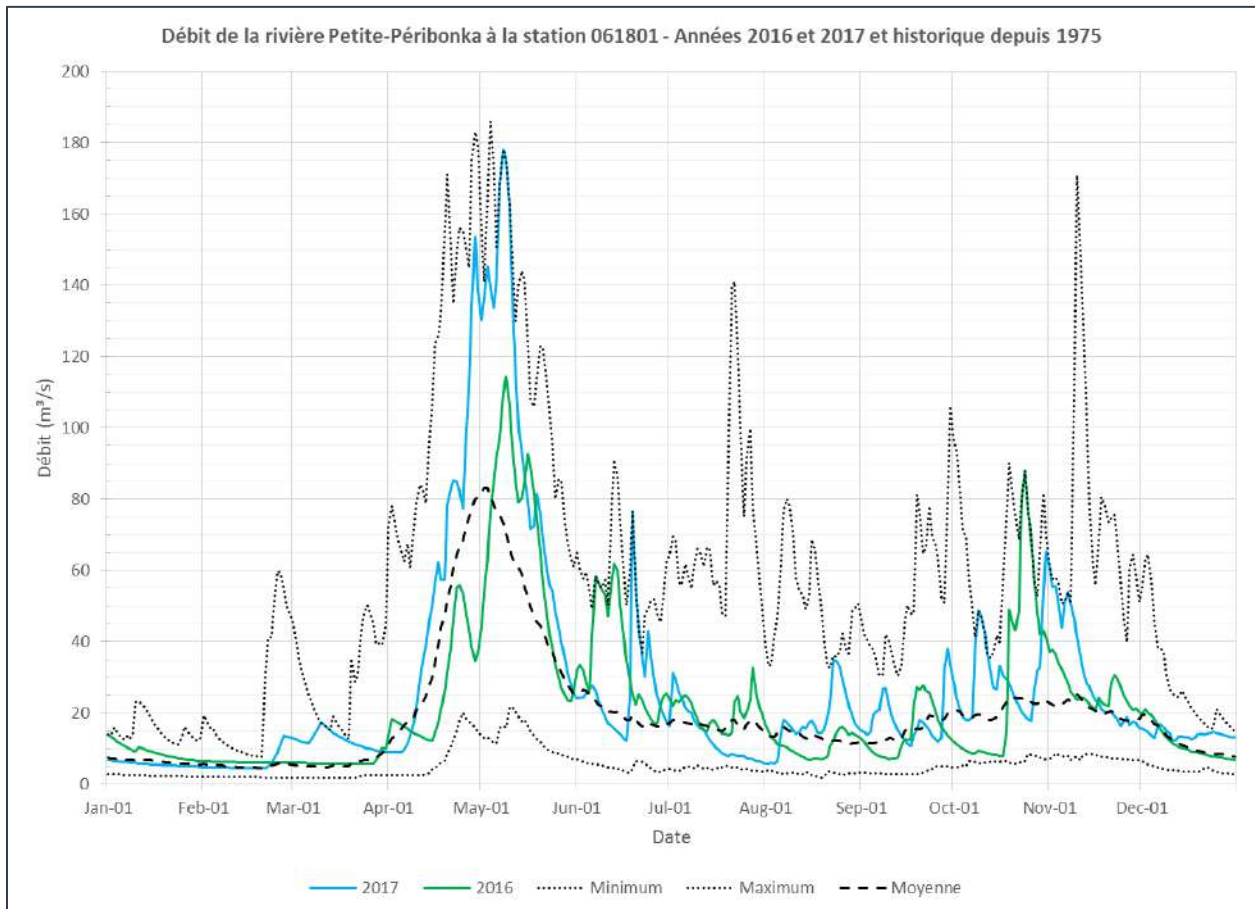


Figure 4.4 Débits journaliers minimum, maximum et moyen de la Petite rivière Péribonka (station 061801) sur la période 1975-2017 et comparaison avec les années 2016 et 2017

Le Tableau 4.3 présente les débits moyens mensuels historiques de la Petite rivière Péribonka sur la période 1975-2017 (minimum, maximum, moyen) observés à la station du MDDELCC, puis les compare aux débits moyens mensuels observés en 2016 et en 2017.

Tableau 4.3 Débits moyens mensuels de la Petite rivière Péribonka à la station du MDDELCC (061801) sur la période 1975-2017 (minimum, maximum, moyenne) et débits moyens mensuels observés en 2016 et 2017

MOIS	DÉBITS MOYENS MENSUELS (m ³ /s)						
	Période 1975-2017			Année 2016	Comparaison 2016/Moy.	Année 2017	Comparaison 2017/Moy.
	Minimum	Moyenne	Maximum				
Janvier	2,4	6,4	13,3	9,1	42 %	5,6	-12 %
Février	2,0	5,2	17,0	6,1	18 %	5,8	12 %
Mars	2,6	5,9	17,9	6,2	5 %	12,3	108 %
Avril	9,1	40,1	69,0	26,1	-35 %	55,8	39 %
Mai	15,8	54,0	100,5	65,9	22 %	94,1	74 %
Juin	5,3	20,1	38,7	35,3	76 %	26,8	33 %
Juillet	5,9	16,8	48,5	20,3	21 %	13,5	-20 %
Août	3,9	13,2	31,6	11,0	-16 %	17,4	32 %
Septembre	4,3	15,0	38,0	14,6	-3 %	18,2	22 %
Octobre	8,9	21,3	48,3	29,2	37 %	29,8	40 %
Novembre	9,0	21,1	46,4	26,3	25 %	31,5	49 %
Décembre	4,1	11,8	23,8	11,3	-3 %	14,0	19 %

On remarque que les débits de la Petite rivière Péribonka ont été significativement supérieurs aux moyennes au cours des mois de février à mai 2017 (+12 à +108 %). Toutefois, les débits moyens mensuels de la Petite rivière Péribonka en 2017 sont inférieurs aux débits moyens mensuels maximums historiques. Une analyse plus détaillée des années correspondant à ces maximums révèle que ceux-ci sont associés à des événements de crue exceptionnels apparus sur de courtes périodes. Ainsi, les maximums présentés au Tableau 4.3 pour les mois de février à mai n'appartiennent pas tous à une même année, mais bien à quatre années distinctes.

ESTIMATION DES DÉBITS DE LA PETITE RIVIÈRE PÉRIBONKA AU SITE DE PROJET À PARTIR DES DONNÉES DE LA STATION HYDROMÉTRIQUE DU MDDELCC

Le bassin versant de la Petite rivière Péribonka au droit de la Pointe à Langevin couvre une superficie de 1 201 km², soit environ 200 km² (20 %) de plus que le bassin versant à la hauteur de la station hydrométrique 061801 du MDDELCC. La rivière Moreau, qui rejoint la Petite rivière Péribonka en rive gauche peu en amont de la Pointe à Langevin, constitue le principal apport intermédiaire du bassin versant non jaugé.

Afin d'utiliser des valeurs de débits réalistes dans le cadre des analyses hydrodynamiques réalisées dans le prochain chapitre, une extrapolation des débits estimés à la station 061801 a été appliquée. Afin de réaliser une extrapolation réaliste, considérant la forme du bassin versant qui s'étire sur un axe nord-sud, une analyse des données météorologiques (précipitations, température et épaisseur du couvert de neige) de la région a été réalisée afin de vérifier si les conditions climatiques au nord et au sud du bassin versant sont similaires. L'analyse des précipitations et des températures est basée sur les données enregistrées aux stations Mistassibi (S-MISBI2), Chute du Diable (S-CD) et Normandin (S-NORM) de RTA. L'analyse de l'épaisseur du couvert de neige est basée sur les données enregistrées à la station S-KM66 de RTA, située au même endroit que la station S-MISBI2, et à la station 7065639 d'Environnement Canada (Normandin), située au même endroit que la station

S-NORM. Au vu de leur latitude, les stations au nord (S-MISBI2 et S-KM66) ont été utilisées pour caractériser la météorologie de la partie nord du bassin versant (partie jaugée), tandis que les stations au sud (S-NORM, Normandin et S-CD) ont été utilisées pour représenter la météorologie de la partie sud du bassin versant (partie non jaugée). La Figure 4.5 présente les contours des territoires jaugé et non jaugé du bassin versant de la Petite rivière Péribonka ainsi que la localisation des stations météorologiques utilisées.

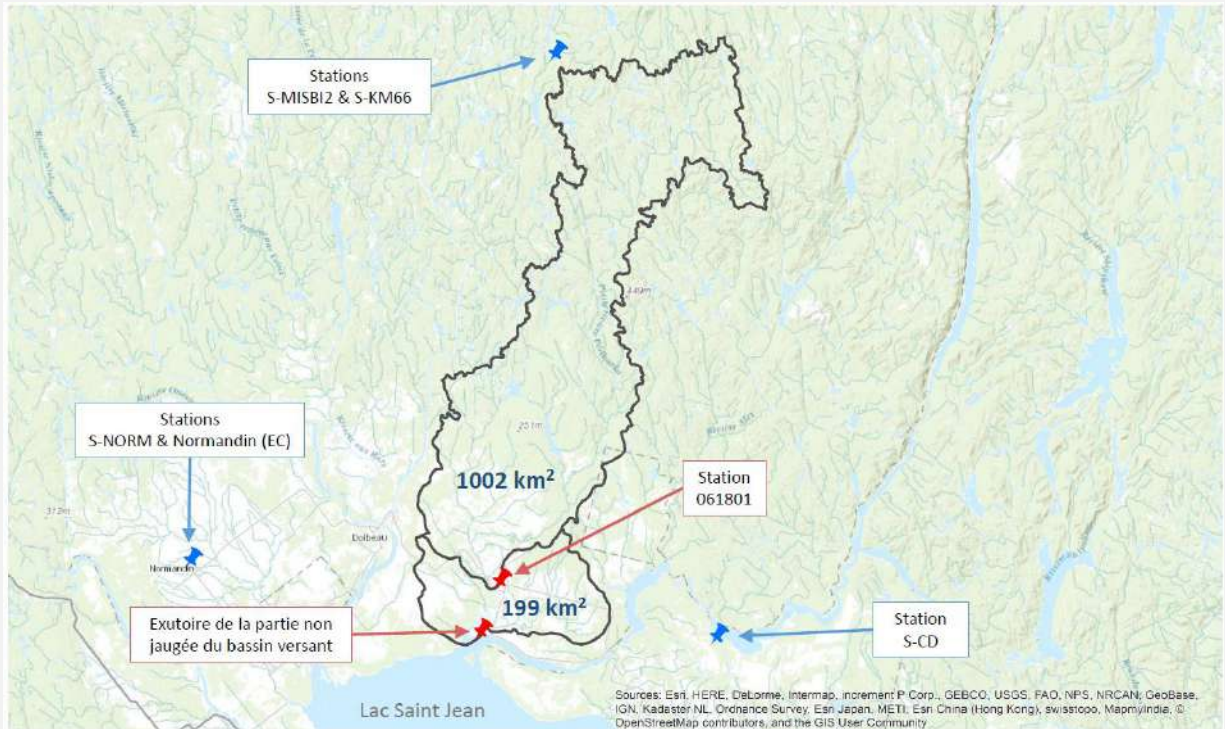


Figure 4.5 Contours des territoires jaugé et non jaugé du bassin versant de la Petite rivière Péribonka et localisation des stations météorologiques

L'analyse des données météorologiques n'a pas révélé de tendance claire quant aux différences observées sur les précipitations entre le nord et le sud du bassin versant sur la période 1992-2017. Concernant l'épaisseur du couvert de neige, des valeurs sensiblement plus élevées au nord qu'au sud sont observées : 30 cm de différence en moyenne au mois de mars pour la période 2008-2017. Enfin, les historiques de température entre le nord et le sud présentent une forte corrélation sur la période 1992-2017 et aucun décalage significatif de température ne peut être relevé (pas de décalage des périodes de fonte entre le nord et le sud du bassin versant).

D'après les résultats de cette analyse météorologique, un coefficient de pondération des superficies de bassins versants moyens a été retenu et la formule suivante a été établie pour l'extrapolation des débits de crue à la Pointe à Langevin à partir des débits à la station 061801 :

$$Q_{pp} = \left(\frac{A_{totale}}{A_{station}} \right)^{0.75} \times Q_{station}$$

Où :

Q_{pp} : débit de la Petite rivière Péribonka au droit de la Pointe à Langevin (m³/s)

$Q_{station}$: débit relevé à la station 061801 (m³/s)

A_{totale} : superficie totale du bassin versant (km²)

$A_{station}$: superficie de la partie jaugée du bassin versant (km²)

Suivant cette équation, les débits journaliers de la station 061801 ont été majorés d'un peu moins de 15 % pour obtenir les débits de la Petite rivière Péribonka au droit de la Pointe à Langevin.

4.3.3 ANALYSE CONJOINTE DES DÉBITS DES DEUX PÉRIBONKA

Les analyses précédentes, réalisées pour chacune des deux rivières, ont indiqué que les débits de la rivière Péribonka et de la Petite rivière Péribonka avaient été, en 2017, respectivement sensiblement supérieurs et très supérieurs à la moyenne historique, pour chaque mois de la période d'intérêt allant de février à mai. Ces informations sont toutefois insuffisantes pour illustrer le caractère exceptionnel de l'érosion survenue en 2017. Afin de mieux caractériser l'importance relative des débits d'une rivière par rapport à l'autre, et suivant ainsi les recommandations retrouvées dans la littérature, l'analyse du ratio des débits a été introduite. Cet indice permet en effet d'analyser l'importance relative des débits de la Petite rivière Péribonka par rapport aux débits de la rivière Péribonka. Par ailleurs, l'échelle de temps utilisée pour les analyses a été modifiée. Alors que les analyses présentées aux sous-sections 4.3.1 et 4.3.2 font état de débits journaliers ou mensuels moyens, on s'attarde ici aux débits moyens obtenus pour l'ensemble de la période d'intérêt, soit environ du 15 février au 15 mai, alors que la dynamique des écoulements est la plus importante (combinaison de bas niveaux du lac et débits élevés de la Petite rivière Péribonka).

Le Tableau 4.4 présente les débits moyens des années 1975 à 2017 de la Petite rivière Péribonka et de la rivière Péribonka ainsi que le ratio des débits pour la période du 15 février au 15 mai.

Tableau 4.4 Débits moyens des années 1975 à 2017 de la Petite rivière Péribonka (station 061801) et de la rivière Péribonka (Chute-à-la-Savane) et ratio des débits sur la période du 15 février au 15 mai

ANNÉE	DÉBIT MOYEN (m ³ /s) SUR LA PÉRIODE DU 15 FÉVRIER AU 15 MAI		RATIO DES DÉBITS	ANNÉE	DÉBIT MOYEN (m ³ /s) SUR LA PÉRIODE DU 15 FÉVRIER AU 15 MAI		RATIO DES DÉBITS
	Petite rivière Péribonka	Rivière Péribonka			Petite rivière Péribonka	Rivière Péribonka	
1975	20,6	598	0,03	1997	27,6	677	0,04
1976	43,4	724	0,06	1998	21,9	608	0,04
1977	35,1	601	0,06	1999	21,3	705	0,03
1978	14,1	649	0,02	2000	28,7	676	0,04
1979	29,4	685	0,04	2001	25,8	627	0,04
1980	21,7	669	0,03	2002	33,5	712	0,05
1981	37,1	684	0,05	2003	17,2	615	0,03
1982	31,6	588	0,05	2004	31,1	667	0,05
1983	39,3	775	0,05	2005	28,4	633	0,05
1984	32,6	687	0,05	2006	33,8	719	0,05
1985	21,8	601	0,04	2007	20,9	587	0,04
1986	31,9	626	0,05	2008	34,7	627	0,06
1987	18,5	588	0,03	2009	30,0	550	0,06
1988	27,0	550	0,05	2010	18,5	459	0,04
1989	28,0	627	0,05	2011	26,8	548	0,05
1990	25,1	624	0,04	2012	28,1	600	0,05
1991	27,6	628	0,04	2013	34,0	635	0,05
1992	32,5	618	0,05	2014	24,2	563	0,04
1993	22,9	639	0,04	2015	22,8	601	0,04
1994	25,6	641	0,04	2016	25,6	582	0,04
1995	29,4	693	0,04	2017	46,6	704	0,07
1996	28,2	652	0,04				

Enfin, pour la période prise en référence allant du 15 février au 15 mai, le débit moyen maximum qui ressort nettement de l'historique 1975-2017 est celui de la Petite rivière Péribonka pour l'année 2017, soit 46,6 m³/s contre 28 m³/s en moyenne sur les autres années (+66 %). En comparaison, le débit de la rivière Péribonka sur la même période apparaît plus élevé que la moyenne (+11 %), mais reste toutefois compris dans un intervalle de variations normales. Le ratio des débits de l'année 2017 a ainsi été le plus élevé également depuis 1975, traduisant le fait que l'augmentation des débits de la Petite rivière Péribonka a été plus importante (non proportionnelle) que l'augmentation des débits de la rivière Péribonka.

Le Tableau 4.5 reprend, dans l'ordre décroissant, les valeurs du Tableau 4.4 pour les dix années ayant présenté les plus forts débits sur la Petite rivière Péribonka au cours de la période de référence.

Tableau 4.5 Débits moyens de la Petite rivière Péribonka (station 061801) et de la rivière Péribonka (Chute-à-la-Savane) et ratio des débits sur la période du 15 février au 15 mai pour les dix années présentant les plus forts débits

ANNÉE	DÉBIT MOYEN (m ³ /s) SUR LA PÉRIODE DU 15 FÉVRIER AU 15 MAI		RATIO
	Petite rivière Péribonka (station)	Rivière Péribonka	
2017	46,6	704	0,07
1976	43,4	724	0,06
1983	39,3	775	0,05
1981	37,1	684	0,05
1977	35,1	601	0,06
2008	34,7	627	0,06
2013	34,0	635	0,05
2006	33,8	719	0,05
2002	33,5	712	0,05
1984	32,6	687	0,05

La Figure 4.6 représente quant à elle les écarts de débits observés en 2017 par rapport à la moyenne interannuelle 1975-2017 pour la Petite rivière Péribonka (station 061801), la rivière Péribonka en amont de la confluence (Chute-à-la-Savane) et la rivière Péribonka en aval de la confluence (somme des deux débits). Les niveaux du lac Saint-Jean sur la même période y sont également présentés afin de corrélérer les bas niveaux et les augmentations de débit par rapport à la normale.

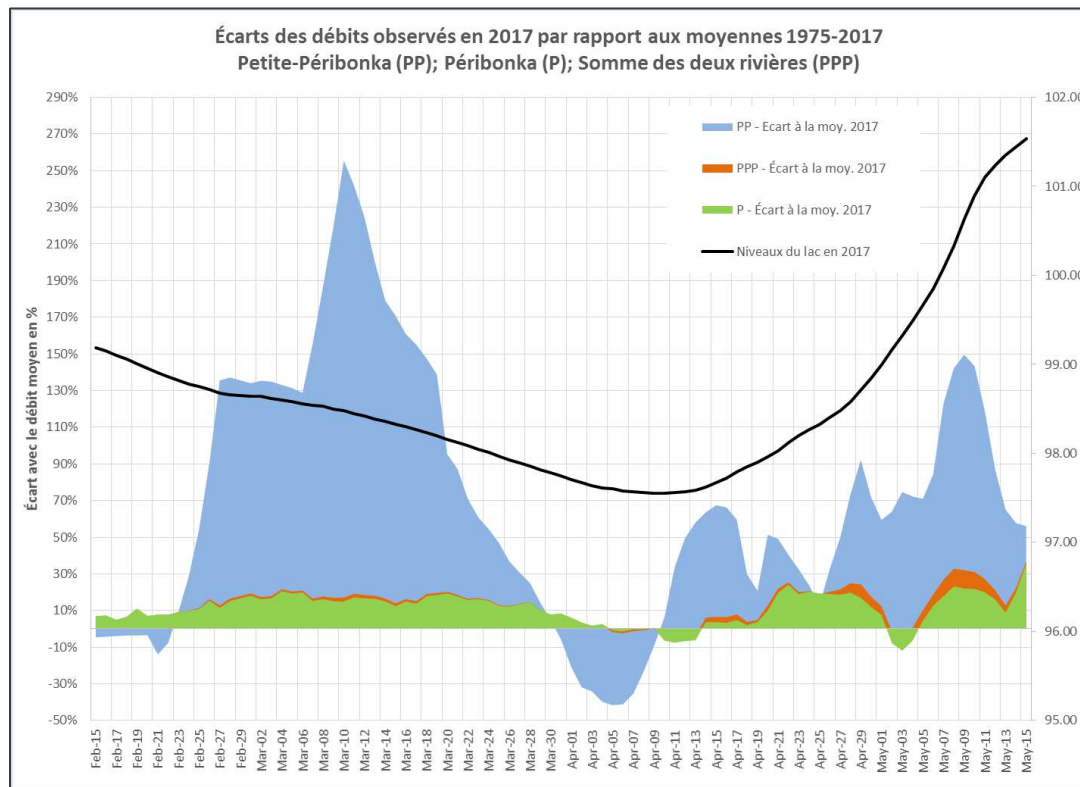


Figure 4.6 Écarts des débits observés en 2017 par rapport aux moyennes calculées sur la période 1975-2017. Rivière Petite-Péribonka (PP, station 061801), rivière Péribonka (Chute-à-la-Savane) et somme des deux rivières (PPP)

Finalement, on retiendra que l'année 2017 s'est démarquée pour l'apparition de débits soutenus de façon prolongée sur la Petite rivière Péribonka. Le débit moyen de la Petite rivière Péribonka en 2017, pour la période de référence du 15 février au 15 mai, représente en effet le maximum jamais enregistré depuis le début des observations disponibles, soit depuis 1975. Le ratio des débits entre la Petite rivière Péribonka et la rivière Péribonka, lui aussi maximal en 2017, pour la même période de référence, confirme la prédominance de la Petite rivière Péribonka sur la rivière Péribonka.

Par ailleurs, puisque plusieurs années présentent des maximums mensuels sur la Petite rivière Péribonka supérieurs à ceux de 2017, qui correspondent à des événements de crue ponctuels, on peut conclure que la durabilité de l'exposition à des débits soutenus lors de la période d'intérêt joue un rôle important dans l'envergure des ajustements hydrosédimentaires au point de confluence.

EFFETS ATTENDUS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES À L'HORIZON 2050

Dans le cadre du projet, il est intéressant de préciser l'évolution possible des débits selon les prévisions actuelles de changement du climat. Ces tendances doivent être prises en compte dans les analyses de l'évolution possible du phénomène d'érosion à long terme. Elles devront par ailleurs être utilisées lors de la prochaine phase du projet, soit l'étude de solutions, pour s'assurer que celles-ci soient pérennes.

Les informations présentées ici proviennent d'un rapport produit par RTA, en partenariat avec Ouranos, publié en 2016 et intitulé *Impact des changements climatiques sur les régimes hydriques du Saguenay–Lac-Saint-Jean*.

Considérant les enjeux du projet, les informations à retenir sont les suivantes :

- **au printemps (mars à mai) :**
 - augmentation probable des débits moyens de l'ordre de 10 %;
 - augmentation probable du volume de la crue, mais diminution sensible du débit maximal;
 - arrivée plus hâtive de la crue d'une dizaine de jours (très probable);
 - augmentation très probable de la durée de la crue.
- **en hiver (décembre à février) :**
 - augmentation très probable des débits moyens de 15 à 30 %.

4.4 ANALYSE DES GLACES

Puisque la présence d'un couvert de glace est susceptible d'influencer les conditions hydrodynamiques et donc hydrosédimentaires dans le secteur de la pointe, notamment au cours de la période d'intérêt qui débute en février, WSP a entrepris d'analyser les caractéristiques du couvert de glace. D'une part, WSP a déterminé la période de l'année durant laquelle un couvert de glace stable est normalement présent et l'a comparée aux données de 2016 et 2017 pour distinguer une possible anomalie. D'autre part, l'épaisseur moyenne du

couvert de glace a été estimée à partir des données de température afin de fournir un intrant aux analyses hydrodynamiques présentées dans le prochain chapitre.

Les images satellitaires Landsat ont d’abord été analysées par WSP afin de décrire l’évolution du couvert de glace dans le secteur de la Pointe à Langevin. Les images historiques sont disponibles depuis 1972, mais leur disponibilité varie grandement, notamment en fonction de la fréquence de passage du satellite et de la présence des nuages. La Figure 4.7 présente les résultats de l’analyse des images Landsat du 1^{er} novembre au 15 mai sur la période 1972-2017.

Les résultats obtenus indiquent que la date de formation d’un couvert de glace complet (couleur bleue sur la Figure 4.7) est, de manière générale, plus tardive aujourd’hui qu’il y a 40 ans. La date du départ des glaces dans le secteur ne semble toutefois pas avoir changé significativement sur la période de 40 ans.

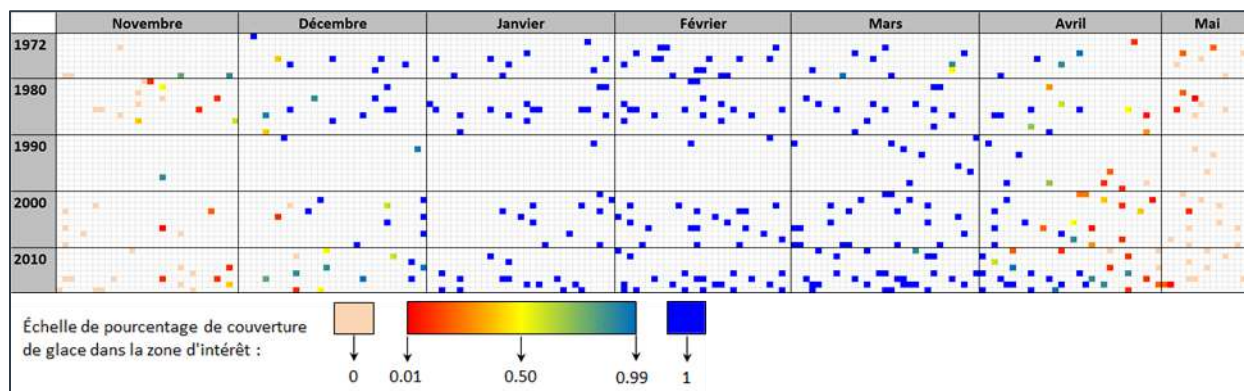


Figure 4.7 Pourcentage de couverture de glace (entre 0 et 1) au droit de la Pointe à Langevin - Analyse des images satellitaires Landsat du 1^{er} novembre au 15 mai sur la période 1972-2017

Le site web www.departdesglaces.org recense la date du départ des glaces du lac Saint-Jean à chaque année depuis 1916. La date recensée correspond au premier jour du printemps pour lequel un pourcentage de glace de 70 % ou moins est observé à la grandeur du lac. Sur la période historique, la date varie entre le 14 avril et le 24 mai, et la moyenne statistique est le 8 mai. La Figure 4.8 présente la date du départ entre 1916 et 2017. Une faible tendance à un départ plus précoce est observée : environ 2 jours plus tôt sur 100 ans.

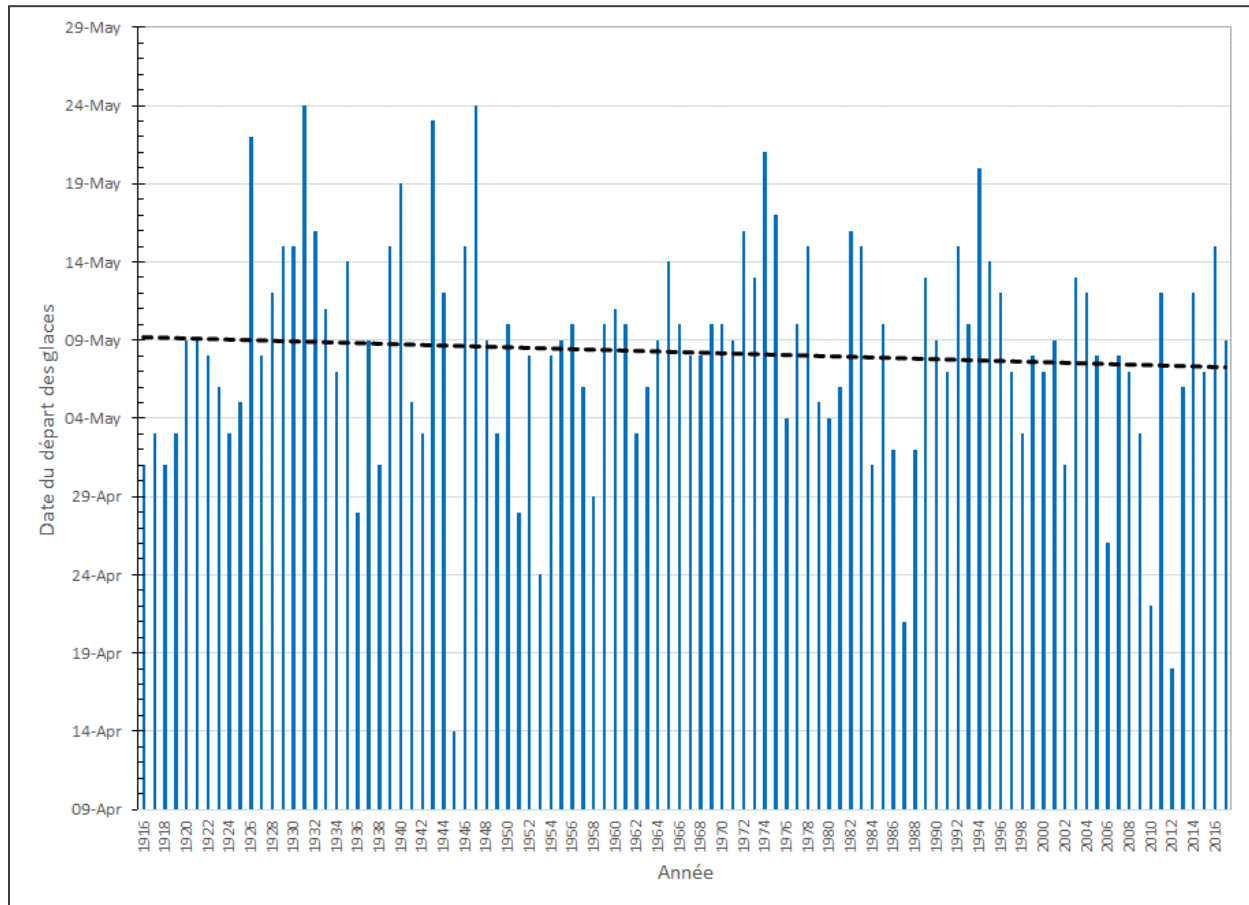


Figure 4.8 Date du départ des glaces du lac Saint-Jean (données du site www.departdesglaces.org)

De façon typique, la rivière Péribonka se libère en premier de ses glaces au droit de la Pointe à Langevin suivi quelques jours plus tard par la Petite rivière Péribonka. Lors du dégel, la rivière Péribonka ouvre un chenal dans la glace du lac encore gelé (Figure 4.9).



Figure 4.9 **Englacement au droit de la Pointe à Langevin (image Landsat du 19 avril 2009)**

L'analyse des données disponibles n'a permis de mettre en évidence aucune anomalie relative au couvert de glace en 2016 ou en 2017.

Concernant les particularités du couvert de glace autour de la Pointe à Langevin, on remarque qu'un couloir sans glace peut se former le long de la berge sud tel qu'observé en avril 2017 (Figure 4.10 a) ou en mars 2012 (image historique Google Earth). À l'hiver 2016, un couvert de glace complet est resté en place au droit de la pointe jusqu'au 21 avril environ. À cette date, un couloir libre de glace dans la rivière Péribonka au droit de la pointe est toutefois visible sur les images satellites. Le 30 avril 2016, la glace ne bordait plus la pointe du côté de la rivière Péribonka et seulement partiellement du côté de la Petite rivière Péribonka. En 2017, la glace a complètement recouvert le secteur de la pointe durant l'hiver jusqu'au 13 avril environ. Un couloir sans glace longeant la pointe est visible sur les images satellites pour cette date (Figure 4.10 b). Le 25 avril 2017, la glace ne bordait plus la pointe sur les deux rivières.

La zone libre de glace située le long de la Pointe à Langevin à la fin de l'hiver témoigne de conditions hydrodynamiques plus marquées qui rendent le couvert moins épais et plus fragile. Pour cette raison, l'accès à la périphérie de la Pointe à Langevin est jugé à risque en hiver.

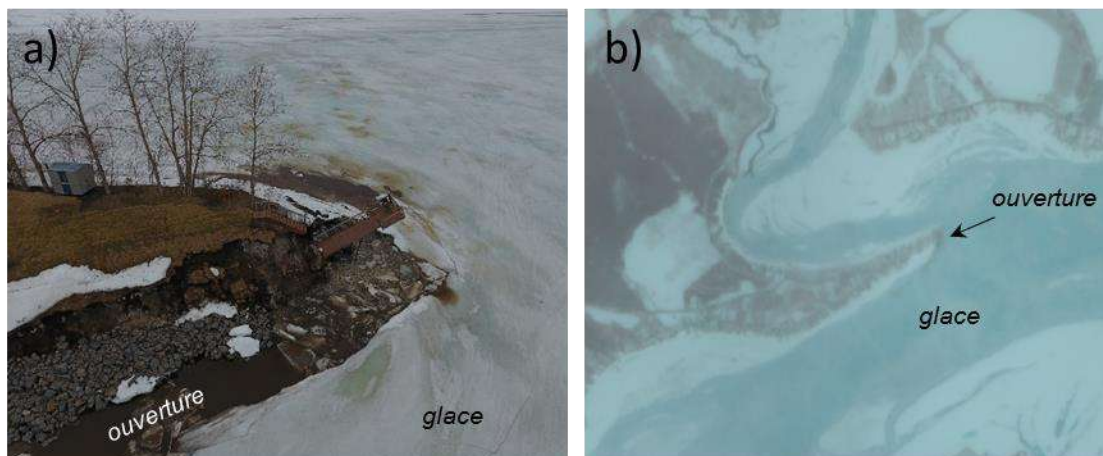


Figure 4.10 Conditions de glace en avril 2017 : a) Photo d'un drone le 16 avril 2017 (*Le Nouvelles Hebdo*); b) Image satellite du 13 avril 2017

ÉVALUATION DE L'ÉPAISSEUR MAXIMUM ANNUELLE DE LA GLACE

L'évaluation de l'épaisseur du couvert de glace a été réalisée dans le cadre des analyses hydrodynamiques en période hivernale.

Les données historiques de température moyenne journalière enregistrées à la station "Peribonca" (7065960) d'Environnement Canada ont été utilisées pour calculer l'indice maximum annuel de degrés-jours de gel cumulés (DJGC). Les données à la station 7065960 sont disponibles entre 1952 et 2016 (66 années). Toutefois, plusieurs données sont manquantes dans la série historique, ce qui ne permet pas de calculer l'indice DJGC pour plusieurs hivers. Dans ce contexte, seules les années présentant au moins 95 % des données journalières ont été retenues dans l'analyse, soit 33 années entre 1952 et 2006. Les données manquantes sur les années retenues ont été remplacées par interpolation linéaire.

Le Tableau 4.6 présente les valeurs de DJGC minimum, maximum, moyen et médian sur la période historique. À partir de ces données, l'épaisseur maximum annuelle de glace (h) a été estimée en utilisant l'équation de Stefan. Le coefficient de croissance de la glace a été fixé à 0,014 pour le minimum, à 0,024 pour le maximum, et à 0,017 pour la moyenne et la médiane. Ces valeurs sont typiques pour un couvert de glace thermique sur une rivière ou un lac, en présence d'un couvert de neige.

Tableau 4.6 Valeurs statistiques d'épaisseur maximum annuelle du couvert de glace calculées à partir des données de la station 7065960 (33 hivers entre 1952 et 2006)

VALEUR	DJGC (°c-d)	ÉPAISSEUR MAXIMUM ANNUELLE DE GLACE (m)
Minimum	1 370	0,52
Maximum	2 111	1,10
Moyen	1 803	0,72
Médiane	1 840	0,73

DJGC : indice maximum annuel de degrés-jours de gel cumulés.

En conclusion, les conditions de glace au droit de la Pointe à Langevin lors des hivers 2016 et 2017 ne semblent pas être différentes des conditions typiques sur la période historique analysée. À ce titre, un couloir sans glace le long de la pointe a également été observé sur les images satellitaires d'avril 2013. Selon toute vraisemblance, les turbulences et les courants ascendants dans ce couloir fragilisent et déplacent la glace de surface. Les décrochements importants du talus peuvent également avoir contribué à briser la glace dans ce couloir.

4.5 ANALYSE DES VENTS

D'après les analyses du rapport R.0024 Volume 3 du groupe Lasalle | NHC (Lasalle | NHC, 2016), le site de la Pointe à Langevin est principalement exposé aux vagues générées par des vents de direction ouest-sud-ouest (OSO) et est-sud-est (ESE), soit respectivement en provenance du lac Saint-Jean et de la rivière Péribonka. D'après les simulations numériques réalisées par la firme, les courants littoraux générés par les vagues lors des tempêtes de direction OSO se dirigent d'ouest en est le long de la Pointe à Langevin et contribuent donc potentiellement au rechargement sédimentaire du secteur de la Pointe à Langevin. À l'inverse, compte tenu de leur direction, les tempêtes de direction ESE favorisent les courants littoraux d'est en ouest et ont alors plutôt tendance à favoriser le déplacement de sédiments de la pointe vers le lac.

Dans le rapport R.0100, le groupe Lasalle | NHC a analysé les tempêtes ayant été observées en 2016 sur une base comparative avec la période de référence de 1992 à 2014 (Lasalle | NHC, 2017). La Figure 4.11, tirée de ce rapport, présente la liste des tempêtes répertoriées en 2016 selon les critères du groupe Lasalle | NHC. Il en ressort que l'année 2016 compte un nombre total de tempêtes de 13, inférieur à la moyenne annuelle de 23 tempêtes par an. Cet écart à la moyenne est significatif considérant l'écart-type de 4 évalué pour la période de référence de 1992 à 2014. Sur les 13 tempêtes répertoriées en 2016, 6 présentent des vents dominants de direction ESE, et seulement 1 tempête présente des vents dominants de direction OSO. Qui plus est, la plus grosse tempête observée en 2016 est survenue à la toute fin de l'automne et présentait des vents dominants ESE.

Ainsi, compte tenu du faible nombre de tempêtes enregistrées en 2016, combiné à la direction majoritairement ESE de ces dernières, les événements de vents extrêmes observés en 2016 auront eu tendance à favoriser le départ de sédiments côtiers du secteur de la pointe plutôt que son rechargement. Cette baisse potentielle des apports en sédiments, qui ne peut être quantifiée, peut avoir agi comme facteur défavorable (mais non comme facteur déclencheur) dans le cadre des processus d'approfondissement de la fosse survenus à la fin de l'hiver et au printemps suivant. L'effet des vents sur les courants littoraux fait l'objet d'analyses dans le cadre du chapitre 5.

	Date de la tempête	Date de début	Date de fin	Vitesse maximale (km/h)	Direction moyenne (degrés)	Niveau moyen (m) [pi.]	Durée (heure)	Facteur ²	Intensité ³	Sévérité ⁴
1	15/05/2016 ⁵	14/05/2016 23:00	15/05/2016 11:00	38,7	112 (ESE)	99,89 [11,1]	13	1,24	318 771	394 577
2	06/06/2016	05/06/2016 16:00	06/06/2016 08:00	36,9	112 (ESE)	101,38 [16,0]	17	1,92	379 339	728 253
3	03/07/2016	02/07/2016 14:00	03/07/2016 10:00	38,3	282 (ONO)	101,12 [15,1]	21	1,80	252 680	454 131
4	11/09/2016	11/09/2016 11:00	11/09/2016 20:00	47,2	272 (O)	101,01 [14,8]	10	1,75	725 762	1 270 492
5	27/09/2016	27/09/2016 15:00	27/09/2016 18:00	31,5	110 (ESE)	101,29 [15,7]	4	1,88	87 741	164 678
6	18/10/2016	18/10/2016 06:00	18/10/2016 14:00	48,2	115 (ESE)	100,70 [13,8]	9	1,61	577 415	928 836
7	24/10/2016	23/10/2016 10:00	24/10/2016 21:00	45,7	284 (ONO)	100,76 [14,0]	36	1,63	1 716 076	2 805 369
8	11/11/2016	11/11/2016 02:00	11/11/2016 18:00	38,9	306 (NO)	101,29 [15,7]	17	1,88	603 942	1 132 884
9	12/11/2016	12/11/2016 16:00	12/11/2016 23:00	39,3	240 (OSO)	101,26 [15,6]	8	1,86	283 216	528 073
10	19/11/2016	19/11/2016 17:00	19/11/2016 23:00	35,2	115 (ESE)	101,26 [15,6]	7	1,86	165 352	308 327
11	22/11/2016	22/11/2016 05:00	23/11/2016 00:00	41,0	304 (NO)	101,36 [15,9]	20	1,91	814 260	1 552 610
12	01/12/2016 ⁶	29/11/2016 15:00	02/12/2016 12:00	54,3	110 (ESE)	101,30 [15,8]	70 ⁵	1,88	1 987 368	3 738 918
13	09/12/2016	09/12/2016 04:00	09/12/2016 21:00	35,0	303 (ONO)	101,21 [15,5]	18	1,84	246 084	453 310
				2016	Somme annuelle		250		8 158 005	14 460 457
				1992-2014	Moyenne		273		10 123 933	18 336 603
					Somme annuelle		440		18 438 070	35 193 958
					maximale		(2010)		(1995)	(1992)
					Somme annuelle		154		5 181 245	8 804 074
					minimale		(2000)		(2000)	(2000)

Note 1 : le critère de tempête selon le rapport technique de la firme RCI (Février 2016)

Note 2 : le facteur F est calculé selon le niveau du lac en suivant $F = 1 + (\text{Niveau} - \text{Médiane}) / (\text{Maximum} - \text{Médiane})$

Note 3 : l'intensité de la tempête est la somme des vitesses au cube multipliées par la durée, en respectant le critère de 30 km/h

Note 4 : la sévérité est une pondération de l'intensité de la tempête par le facteur F

Note 5 : La durée totale de la tempête est modifiée en tenant compte de la persistance des vents

Figure 4.11 Liste des tempêtes relevées en 2016 selon les critères du groupe Lasalle | NHC

4.6 CONCLUSION DES ANALYSES HYDROMÉTÉOROLOGIQUE

Les niveaux d'eau du lac Saint-Jean, les débits de la Petite rivière Péribonka et de la rivière Péribonka, les vents et les glaces ont été analysés afin de mettre en évidence les facteurs de changement pouvant expliquer l'évolution marquée de la fosse à l'extrémité de la Pointe à Langevin en particulier au début de l'année 2017.

À l'issue de ces analyses, il ressort que :

- le débit de la Petite rivière Péribonka est sans doute la variable principale pour expliquer les évolutions morphologiques au point de confluence. Les débits de la Petite rivière Péribonka ont en effet été particulièrement élevés en 2017 par rapport aux moyennes historiques, notamment pour la période du 15 février au 15 mai (+66 %). Le débit moyen de la Petite rivière Péribonka observé en 2017 sur la période 15 février-15 mai constitue le maximum historique enregistré depuis 1975;
- les débits de la rivière Péribonka ont aussi été relativement élevés par rapport aux moyennes historiques, sans toutefois présenter de caractère extrême (+11 %). L'analyse du ratio de débit entre les deux rivières, également maximal en 2017, indique par ailleurs que l'augmentation ne s'est pas opérée de façon proportionnelle sur les deux cours d'eau et que les débits de la Petite rivière Péribonka sont le principal facteur de changement;

- puisque plusieurs années présentent des maximums mensuels sur la Petite rivière Péribonka supérieurs à ceux de 2017, qui correspondent à des événements de crues ponctuels, on peut conclure que la durabilité de l'exposition à des débits soutenus lors de la période d'intérêt joue un rôle important dans l'envergure des ajustements hydrosédimentaires au point de confluence observés en 2017;
- les niveaux d'eau du lac Saint-Jean n'indiquent aucun changement significatif en 2016 ou en 2017;
- les conditions de glace semblent elles aussi avoir été représentatives des conditions normales au cours des dernières années. Le couvert de glace doit être considéré dans les analyses hydrodynamiques (chapitre 5) puisqu'il est susceptible d'accentuer les vitesses et la recirculation à la fin de l'hiver. En contrepartie, les turbulences présentes sous le couvert de glace contribuent à le fragiliser ce qui se traduit par le départ hâtif de la glace à l'extrémité de la pointe et le long de celle-ci. Ce risque doit être pris en compte dans la planification des usages récréatifs hivernaux;
- les conditions de vents semblent avoir été défavorables en 2016 en ce qui a trait au phénomène d'érosion de la pointe. En effet, les tempêtes ont été moins nombreuses qu'à l'habitude cette année-là et ont été accompagnées de vents majoritairement de provenance ESE. Ainsi, les courants littoraux créés par les vagues ont favorisé le transport de sédiments côtier de la pointe vers le lac plutôt que l'inverse qui s'observe lors des tempêtes OSO (une seule de faible importance en 2016). Les tempêtes et les courants littoraux associés peuvent constituer un facteur aggravant, mais pas un facteur déclenchant dans le contexte de l'approfondissement de la fosse observé en 2017.

Par ailleurs, plusieurs informations seront réemployées dans la suite du rapport, notamment :

- une majoration des débits de l'ordre de 15 % est retenue pour estimer les débits de la Petite rivière Péribonka au droit de la Pointe à Langevin à partir des données de la station du MDDELCC située en amont de la route 169 (061801);
- l'épaisseur maximale moyenne du couvert de glace en hiver est de l'ordre de 0,7 m;
- à l'horizon 2050, les études réalisées par RTA, en partenariat avec Ouranos, indiquent que :
 - les crues printanières auront tendance à être plus longues, avec des débits moyens plus importants (10 %) pour des débits de pointe plus faibles;
 - les débits hivernaux auront tendance à augmenter (15 à 30 %).

5 ANALYSES GÉOTECHNIQUES

5.1 INTRODUCTION

Le présent chapitre traite des aspects géotechniques intervenants dans les problématiques d'érosion à la Pointe à Langevin. Il s'agit, d'une part, de caractériser les sols en présence afin d'évaluer leur vulnérabilité à l'érosion et, d'autre part, de fournir des informations sur les risques de progression des glissements de talus à court terme.

Dans le cadre du diagnostic complet, les analyses géotechniques ont donc été réalisées avec les objectifs suivants :

- acquérir de nouvelles données géotechniques par sondage afin de compléter les informations disponibles quant à la nature des sols et leur sensibilité à l'érosion, notamment pour les couches les plus profondes atteintes par la fosse;
- mettre à jour les analyses de glissement réalisées en 2017 (SNC-Lavalin) à partir des nouveaux relevés bathymétriques et sondages géotechniques afin d'évaluer les risques de glissement à court terme;
- à partir de ces nouvelles informations, émettre un jugement quant à la sensibilité des sols à l'érosion et aux évolutions possibles de la fosse et des glissements.

5.2 ÉTUDES GÉOTECHNIQUES DISPONIBLES

À l'issue du diagnostic préliminaire, les informations d'un unique sondage géotechnique réalisé en 2017 (SNC-Lavalin), jusqu'à une profondeur de 18 m par rapport à la surface (El. 86,12 m), étaient disponibles. Ce sondage révélait la présence d'une couche de silt argileux pouvant présenter un fort potentiel d'érosion à partir de l'élévation 87,30 m. Or, la fosse localisée à proximité de la Pointe à Langevin possédait, selon les relevés bathymétriques de juin 2017 alors disponibles, une élévation voisine de 84,00 m. Ainsi, la nature et le comportement des matériaux de la couche profonde ne pouvaient pas faire l'objet d'analyses approfondies et les incertitudes quant à l'évolution de la fosse étaient grandes. Dans ce contexte, WSP a procédé à la réalisation de deux nouveaux sondages, plus profonds (25 m), permettant une caractérisation des sols en profondeur.

Les analyses réalisées pour répondre aux objectifs de ce chapitre s'appuient sur l'étude géotechnique factuelle réalisée par WSP pour laquelle deux forages géotechniques de 25 m de profondeur ont été réalisés à Pointe à Langevin entre le 6 et le 8 décembre 2017. Le rapport d'étude géotechnique factuelle est présenté à l'**annexe D**. Bien que ce soient principalement les résultats des forages réalisés par WSP qui ont été considérés pour les travaux présentés aux sections suivantes, l'étude géotechnique réalisée par SNC-Lavalin GEM Québec inc. et datée du 24 août 2017 a également été consultée et prise en compte dans le cadre de cette étude. Cette étude est également jointe à l'**annexe D**.

Les forages réalisés lors des travaux d'investigation de décembre 2017, numérotés 17F01 et 17F02, sont localisés sur la Figure 5.1.



Figure 5.1 Localisation des forages 17F01 et 17F02 réalisés en décembre 2017

5.3 CARACTÉRISTIQUES DES SOLS ET SENSIBILITÉ À L'ÉROSION

La description et les caractéristiques des sols sont établies à partir des observations faites lors des sondages ainsi que d'analyses réalisées en laboratoire sur des échantillons de sols représentatifs de la stratigraphie rencontrée lors des forages.

Le Tableau 5.1 présente une synthèse de la stratigraphie des sols observés puis considérés dans les calculs de stabilité. Les données granulométriques y sont également indiquées. Celles-ci constituent une caractéristique importante dans le cadre de l'interprétation des calculs hydrodynamiques en termes d'érosion potentielle.

Tableau 5.1 Revue de la stratigraphie des sols observés au droit des forages 17F01 et 17F02

FORAGE N°	REMBLAI GRANULAIRE, LÂCHE	SABLE AVEC DES TRACES À UN PEU DE SILT, LÂCHE	SILT AVEC DES TRACES DE SABLE À SABLEUX, LÂCHE À COMPACT	SABLE SILTEUX À SILT SABLEUX, COMPACT	SILT AVEC UN PEU D'ARGILE, COMPACT
	Prof. (m) [Élev. (m)] D ₃₀ -D ₆₀ (mm)	Prof. (m) [Élev. (m)] D ₃₀ -D ₆₀ (mm)	Prof. (m) [Élev. (m)] D ₃₀ -D ₆₀ (mm)	Prof. (m) [Élev. (m)] D ₃₀ -D ₆₀ (mm)	Prof. (m) [Élev. (m)] D ₃₀ -D ₆₀ (mm)
17F01	0,00 – 1,22 [104,41 – 103,19] N/D	1,22 – 17,68 [103,19 – 86,73] 0,143 – 0,228	17,68 – 20,84 [86,73 – 83,57] 0,023 – 0,054	20,84 – 25,00 [83,57 – 79,41] 0,09 – 0,135 0,03 – 0,058	N/A
17F02	0,00 – 3,05 [104,33 – 101,28] 0,176 – 0,254	3,05 – 20,12 [101,28 – 84,21] 0,277 – 0,457 0,112 – 0,177	20,12 – 23,16 [84,21 – 81,17] 0,012 – 0,029	N/A	23,16 – 25,00 [81,17 – 79,33] 0,006 – 0,014

La compacité des sols a été déterminée en s'appuyant sur les indices N de l'essai de pénétration standard (SPT) réalisé lors des forages. Pour le forage 17F01, les sols rencontrés lors des forages sont considérés lâches entre la surface et 19 m de profondeur (env. El. 85,4 m). Ensuite, les sols deviennent compacts de 19 m à 25 m de profondeur (jusqu'à env. El. 79,4 m). Le forage 17F02 a quant à lui révélé que les sols en place sont lâches entre la surface et 15 m de profondeur (env. El. 89,3 m) et deviennent compacts de 15 m à 25 m de profondeur (jusqu'à env. El. 79,3 m).

Les analyses en laboratoire effectuées sur des échantillons de sols prélevés en profondeur aux emplacements des deux forages ont révélé que les fractions fines de ces matériaux (<80 µm) sont formées en moyenne de 95 % de silt et de 5 % d'argile. De plus, les limites de consistance (limite d'Atterberg) ont révélé que ces sols fins sont de type ML selon la classification unifiée USCS, correspondant à des silts inorganiques et sables très fins; sables fins silteux ou argileux, silts argileux peu plastiques. Ces résultats nous indiquent donc que leur comportement est plutôt de nature pulvérulente, se rapprochant ainsi davantage des sols granulaires que des sols cohérents.

Les dépôts sédimentaires observés jusqu'à des élévations comprises approximativement entre 85 m et 89 m consistent donc en des sols granulaires lâches. Ces sols, fins, non cohésifs et lâches, apparaissent très vulnérables à l'érosion. Au droit du forage 17F01, situé à l'extrémité de la Pointe à Langevin, les dépôts semblent se densifier à partir de l'élévation 83,5 m, ce qui correspond à l'élévation approximative du fond de la fosse selon les derniers relevés bathymétriques réalisés. Cette augmentation de la compacité des sols pourrait laisser présager une possible diminution du taux d'érosion des sols à partir de ce niveau et donc un ralentissement de l'approfondissement de la fosse dans des conditions hydrodynamiques telles que celles vécues en 2017. Cependant, la stratigraphie des sols présente des disparités entre les forages et il est difficile de confirmer la présence de couches plus compactes sur l'ensemble du secteur. Par ailleurs, les données du premier forage (17F01) indiquent que les sols semblent redevenir lâches sous la couche compacte, soit autour de l'élévation 79,5 m.

SENSIBILITÉ À L'ÉROSION DES SOLS EN FONCTION DES VITESSES

La nature des sols peut être utilisée pour interpréter les conditions hydrodynamiques en termes d'érosion. Le diagramme d'Hjulström, développé dès 1935, fournit un guide pour définir la sensibilité des sols à l'érosion en fonction de leur granulométrie. À partir des données granulométriques obtenues dans le cadre du projet (voir Tableau 5.1), on est en mesure de positionner les sols non exposés du secteur de la Pointe à Langevin sur le diagramme et d'évaluer l'ordre de grandeur des vitesses susceptibles de produire de l'érosion.

Cette analyse pourra servir de guide lors de l'analyse des résultats de modélisation numérique sans toutefois constituer une grille de lecture exacte et systématique, en raison des variations possibles dues à la compacité des sols, à la cohésion et au type d'exposition.

La Figure 5.2 place les sols de la Pointe à Langevin, sableux et silteux, sur le diagramme d'Hjulström. Les bandes de couleur pâle représentent la gamme de granulométrie susceptible d'être rencontrée tandis que les bandes de couleur plus vive représentent la gamme de granulométrie qui inclue la plus grande partie des sols d'après les analyses en laboratoire effectuées à différentes profondeurs. On constate rapidement que les sables fins qui caractérisent les sols présentent la granulométrie la plus sensible à l'érosion qui puisse être, soit entre 0,1 et 0,3 mm en moyenne. Pour ces matériaux, la vitesse de début d'érosion peut être aussi basse que 0,18 m/s. Pour la partie des matériaux les moins sensibles, la vitesse de début d'érosion demeure par ailleurs très faible, de l'ordre de 0,4 m/s. Une fois l'érosion amorcée, le transport des particules est assuré pour des vitesses très faibles et la déposition des matériaux les plus grossiers (sable le plus grossier autour de 2,5 mm) ne s'amorce qu'à partir de 0,2 m/s, tandis que pour la plus grande partie des matériaux elle devra descendre sous 0,02 m/s.

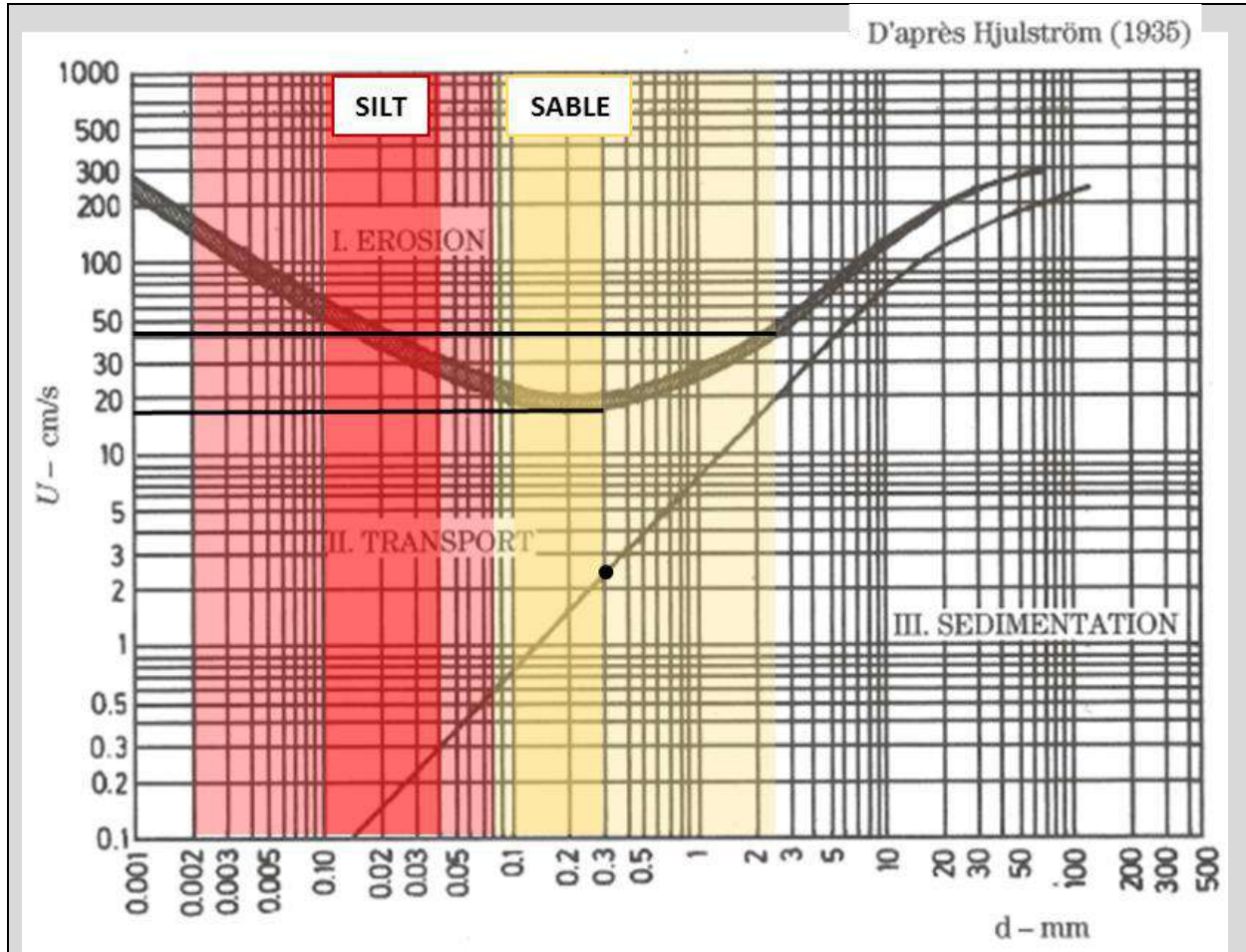


Figure 5.2 Positionnement des sols en présence sur le diagramme d'Hjulström⁴ et sensibilité à l'érosion

En complément, en vue de l'interprétation ultérieure des résultats de modélisation numérique, il est important de remarquer que la présente analyse est réalisée sur des sols protégés et non sur les sédiments réellement présents dans le fond de la rivière. Dans la rivière, les processus d'érosion / transport de sédiments produisent un tri granulométrique naturel en fonction des vitesses. Ainsi, les zones les plus exposées seront progressivement « lavées » des sédiments les plus fins et les plus vulnérables, conduisant à la formation d'une « carapace » constituée des plus grosses particules qui possède la taille suffisante pour résister aux contraintes hydrauliques courantes. Il faut donc utiliser ces informations avec discernement dans le cadre des analyses hydrosédimentaires dans les rivières.

4 LENCASTRE, Armando. *Hydraulique générale*. Eyrolles, 1996.

5.4 ANALYSE DE STABILITÉ DES BERGES DE LA POINTE À LANGEVIN

Des calculs de stabilité ont été réalisés afin de vérifier si les talus de la zone à l'étude présentent des risques d'instabilité à court terme. Il s'agit en réalité de vérifier si les facteurs de sécurité minimums sont respectés en conditions actuelles, suivant la morphologie décrite par les derniers relevés bathymétriques réalisés.

Les analyses de stabilité ont été réalisées aux emplacements de trois coupes du secteur de la Pointe à Langevin, d'amont en aval respectivement au droit de la fosse principale, à la sortie de la fosse principale et au droit de la fosse secondaire. Les caractéristiques des sols rencontrés aux droits des forages ont été utilisées pour paramétrer les modélisations. La Figure 5.3 présente les emplacements des coupes types analysées.

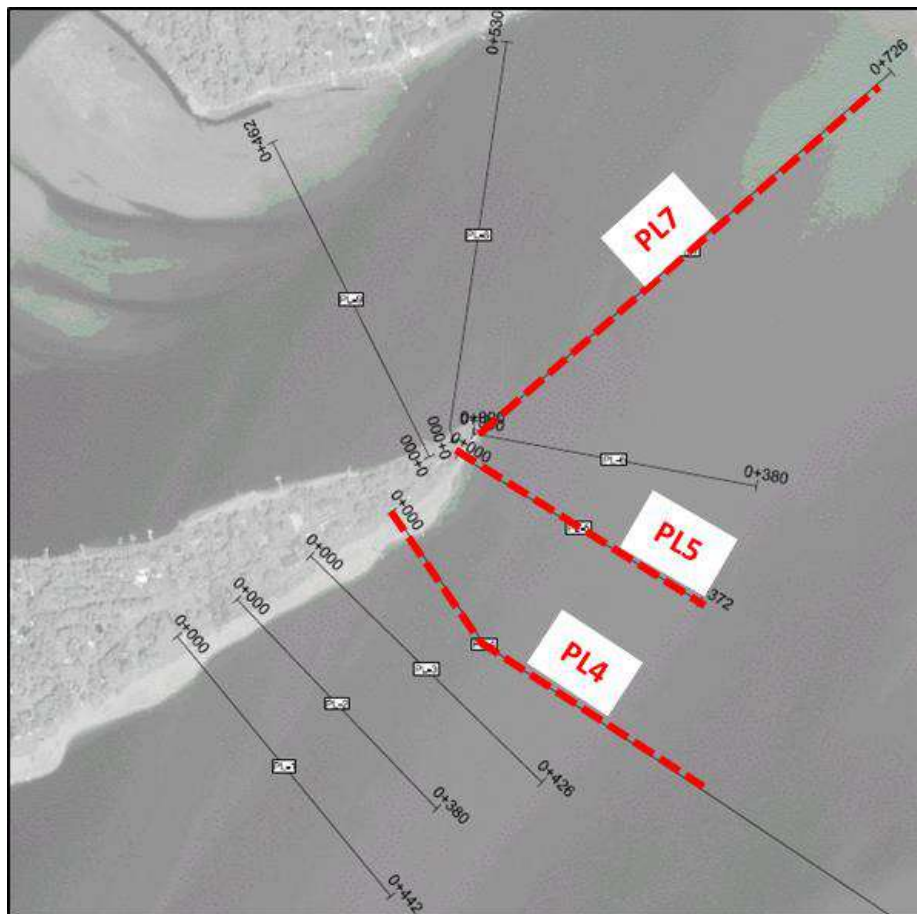


Figure 5.3 Localisation des coupes PL4, PL5 et PL7 ayant fait l'objet de calculs de stabilité

Les détails méthodologiques sont présentés à l'**annexe E**. Seules les principales conclusions sont présentées dans cette section.

Les analyses de stabilité ont été effectuées en conditions statiques et pseudo-statiques (cas de séisme). Toutefois, nous présentons ici les résultats uniquement pour les conditions statiques (conditions normales) en vue de déterminer le niveau de risque de glissement à court terme, considérant qu'aucun accès au haut du talus n'est prévu. Les analyses ont été réalisées pour deux conditions de niveaux d'eau, soit un équilibre à 101,5 m, correspondant au niveau maximal approximatif du plan d'eau, ou à 98,5 m, le niveau minimal moyen.

Pour compléter l'étude de stabilité et évaluer l'évolution possible de la stabilité en cas d'approfondissement de la fosse, des analyses en conditions statiques ont été ajoutées en prenant l'hypothèse d'un approfondissement local de la fosse principale de 2 m au droit du PL7.

Les analyses de stabilité ont été effectuées selon la méthode de Morgenstern-Price à l'aide du logiciel SLOPE/W (version 8.12.3.7901), conçu par Geo-Slope International Ltd. Cette méthode satisfait à la fois l'équilibre des forces et des moments.

En conditions statiques, le coefficient de sécurité de 1 correspond à la limite de stabilité du talus considéré. En dessous de 1, le talus est instable et plus il est supérieur à 1, plus il est stable. Lorsque des interventions sont prévues à proximité d'un talus, le coefficient de sécurité minimal recherché est de 1,5.

Le Tableau 5.2 présente les résultats des analyses de stabilité réalisées sur les trois sections étudiées, en conditions statiques. Les autres résultats sont présentés à l'**annexe E**.

Tableau 5.2 Résultats des analyses de stabilité en conditions statiques

NIVEAU D'EAU (m)	PROFIL BATHYMÉTRIQUE DE RÉFÉRENCE	CAS ÉTUDIÉ	FACTEUR DE SÉCURITÉ OBTENU
101,5	PL4	Conditions statiques	2,21
98,5			2,17
101,5	PL5		1,01
98,5			1,05
101,5	PL7		0,88
98,5			0,87
101,5	PL7 avec approfondissement de 2 m au fond de la fosse		0,84
98,5			0,83

Les résultats présentés au Tableau 5.2 indiquent que :

- le niveau de stabilité augmente de l'extrémité de la pointe en allant vers l'aval;
- au droit de la fosse principale (PL7), l'équilibre statique n'est pas atteint puisque le coefficient de sécurité obtenu est significativement inférieur à 1. L'extrémité de la pointe est donc considérée instable et des glissements de terrain peuvent survenir à tout moment ou se sont peut-être même déjà produits. Un recul de talus de l'ordre de 4 à 6 m doit être considéré à court terme, correspondant à l'atteinte d'un coefficient de sécurité compris entre 1 et 1,2. Un coefficient de sécurité de 1,5 représente une distance d'environ 10 m en haut de talus. L'accès n'est donc pas sécuritaire à l'intérieur de cette marque de recul;
- juste en aval de la fosse principale (PL5), le coefficient de sécurité calculé est tout juste de 1 en conditions statiques. Cela correspond à un niveau de stabilité minimum;

- au droit de la fosse secondaire (PL4), le coefficient de sécurité est actuellement supérieur à 2 et le talus est considéré stable en conditions statiques;
- un approfondissement local de la fosse conduirait à réduire encore sensiblement la stabilité des talus à l'extrémité de la pointe, déjà critique en conditions statiques actuellement. Toutefois, l'approfondissement de la fosse conduirait en réalité à réduire significativement la stabilité de ses parois et pourrait conduire à des glissements subaquatiques qui, par la suite, conduiraient à réduire significativement la stabilité des talus en surface. Pour cette raison, il faut s'attendre à ce qu'un nouvel approfondissement de la fosse conduise à de nouveaux reculs de talus en surface.

5.5 CONCLUSION

Les études géotechniques réalisées dans le cadre du diagnostic complet ont permis, d'une part, de consolider l'information disponible quant à la nature des sols en place et, d'autre part, de mettre à jour les calculs de stabilité afin de déterminer les risques de glissement à court terme.

Considérant la nature des sols, on retient que :

- les dépôts sédimentaires observés jusqu'à des élévations comprises approximativement entre 85 m et 89 m consistent en des sols granulaires lâches. Ces sols sont fins, non cohésifs et lâches, et apparaissent donc très vulnérables à l'érosion;
- à l'extrémité de la Pointe à Langevin, les dépôts semblent se densifier à partir de l'élévation 83,5 m, ce qui correspond à l'élévation approximative du fond de la fosse selon les derniers relevés bathymétriques réalisés. Cette augmentation de la compacité des sols pourrait laisser présager une possible diminution du taux d'érosion des sols à partir de ce niveau et donc un ralentissement de l'approfondissement de la fosse dans des conditions hydrodynamiques telles que celles vécues en 2017. Cependant, la stratigraphie des sols présente des disparités entre les forages et il est difficile de confirmer la présence de couches plus compactes sur l'ensemble du secteur. Par ailleurs, les données du premier forage (17F01) indiquent que les sols semblent redevenir lâches sous la couche compacte, soit autour de l'élévation 79,5 m;
- à partir de l'utilisation du diagramme d'Hjulström, on constate que les sables fins qui caractérisent les sols en place présentent la granulométrie la plus sensible à l'érosion qui puisse être, soit entre 0,1 et 0,3 mm en moyenne. Pour ces matériaux, la vitesse de début d'érosion peut être aussi basse que 0,18 m/s. Pour la partie des matériaux les moins sensibles, la vitesse de début d'érosion demeure par ailleurs très faible, de l'ordre de 0,4 m/s;
- il est important de retenir que les analyses sont réalisées pour les sols protégés qui ont été caractérisés par les sondages et non sur les sédiments réellement présents dans le fond de la rivière. Dans la rivière, les processus d'érosion / transport de sédiments conduisent à la formation d'une « carapace » constituée des plus grosses particules à la suite d'un tri granulométrique qui s'opère sous l'effet des contraintes hydrauliques courantes. Il faut donc utiliser les informations sur les vitesses limites d'érosion avec discernement dans le cadre des analyses hydrosédimentaires qui suivront.

Considérant les analyses de stabilité, on retient que :

- au droit de la fosse principale, l'équilibre statique n'est pas atteint puisque le coefficient de sécurité obtenu est significativement inférieur à 1. L'extrémité de la pointe est donc considérée instable et des glissements de terrain peuvent survenir à tout moment. Un recul de talus de l'ordre de 4 à 6 m doit être considéré à court terme;
- en aval de la fosse principale, le coefficient de sécurité calculé augmente progressivement et passe rapidement au-dessus de la limite de 1 en conditions statiques. Les problèmes d'instabilité sont donc concentrés à l'extrémité de la pointe, au droit de la fosse principale;
- un nouvel approfondissement de la fosse conduirait vraisemblablement à de nouveaux reculs de talus en surface.

Il est recommandé de procéder à de nouveaux suivis bathymétriques au cours des prochains mois afin de valider l'évolution de la fosse et mettre à jour, au besoin, les analyses de sécurité par mesure de protection du public.

6 CARACTÉRISATION HYDRODYNAMIQUE

6.1 INTRODUCTION

Dans le cadre de l'analyse des phénomènes d'érosion ayant lieu à la confluence de la rivière Péribonka avec la Petite rivière Péribonka, la modélisation numérique en trois dimensions constitue l'outil pertinent afin de représenter adéquatement l'hydrodynamique complexe de la zone d'intérêt. Puisque la modélisation ne peut reproduire fidèlement l'ensemble des processus hydrodynamiques et hydrosédimentaires complexes en présence, les résultats des simulations numériques ne doivent pas être utilisés de manière directe, mais plutôt être interprétés par les spécialistes afin de tenir compte des phénomènes non représentés comme les phénomènes oscillatoires (turbulences, vortex) ou les interactions dynamiques avec les sédiments fins de nature et de consistance variable.

Le présent chapitre propose une brève description de la méthode de travail adoptée pour caractériser l'hydrodynamique du secteur de la Pointe à Langevin au moyen de l'outil de modélisation numérique. Pour consulter les détails méthodologiques, le lecteur est invité à consulter l'**annexe C**.

Dans ce chapitre, les analyses à partir des modèles numériques s'articulent autour des objectifs suivants :

- mettre en évidence la présence des processus hydrodynamiques caractéristiques des points de confluence, tels que décrits brièvement au **chapitre 2**, au cas particulier de la Pointe à Langevin;
- préciser en quoi les débits exceptionnels observés en 2017 dans la Petite rivière Péribonka, sur la période février,-mai, ont pu être à l'origine de l'approfondissement marqué de la fosse;
- confirmer l'effet des niveaux du lac Saint-Jean sur l'hydrodynamique fluviale autour de la pointe;
- évaluer les risques de progression de la fosse et de l'érosion de la Pointe à Langevin dans le futur selon différentes hypothèses.

6.2 MÉTHODOLOGIE

6.2.1 CAS ANALYSÉS

Afin de pouvoir caractériser les contraintes hydrodynamiques tout au long de l'année malgré leur grande variabilité due aux variations des niveaux du lac Saint-Jean, des débits des rivières, mais aussi des conditions de glace ou de vent, plusieurs scénarios de simulations hydrodynamiques ont été établis. Au-delà de permettre de répondre aux objectifs du diagnostic complet listés dans la section précédente, ces simulations caractérisent un état de référence et pourront être utiles dans la suite éventuelle du projet pour évaluer l'impact de différentes

solutions envisageables sur les processus hydrosédimentaires et analyser leur durabilité et leur efficacité.

Les différents scénarios de simulation sont regroupés dans deux catégories qui représentent les deux principales périodes de l'année en regard à l'hydrodynamique fluviale, soit :

- **une période à dynamique fluviale active** : cette période, qui s'étire de la mi-février à la mi-mai environ, se caractérise par la combinaison de bas niveaux du lac Saint-Jean et/ou de débits soutenus. C'est au cours de cette période que les problématiques d'érosion de la Pointe à Langevin sont apparues. Elle correspond au moment de l'année où les écoulements dynamiques des rivières constituent les principales sources d'érosion du fond et des berges. Les scénarios simulés pour cette période ont pour but de caractériser les conditions hydrodynamiques fluviales ayant contribué aux phénomènes d'érosion observés à la Pointe Langevin. À l'intérieur de cette période, on devra distinguer deux sous-périodes et donc deux sous-catégories pour classer les scénarios de simulation réalisés, soit :
 - **la période en présence d'un couvert de glace** : cette sous-période, qui s'étire jusqu'aux environs du 15 avril (voir chapitre 4), correspond à une hydrodynamique possiblement modifiée par la glace. L'approche permettant de comprendre les processus hydrodynamiques au cours de cette période doit donc en tenir compte;
 - **la période en eau libre** : de la fin de la période avec glace, autour du 15 avril, jusqu'à ce que la remontée du niveau du lac et la fin de la crue printanière conduisent à des conditions hydrodynamiques fluviales ralenties, autour du 15 mai.

Dans la suite du chapitre, quatre cas sont présentés afin de caractériser la période de dynamique fluviale active. Ces cas ont été établis à partir des analyses hydrométéorologiques présentées au chapitre 4. On se référera notamment à la Figure 4.6 pour comprendre le choix des dates ciblées pour les analyses, soient les :

- **10 mars** : en 2017, cette date correspond au plus gros écart avec les normales de débit de la Petite rivière Péribonka, soit +250 % environ d'après les données estimées du MDDELCC (station 061801). Bien que le débit de la Petite rivière Péribonka demeure tout de même bien inférieur aux débits de crue printanière des semaines qui suivent, la présence d'un couvert de glace complet à cette date en fait une journée importante pour la caractérisation des phénomènes hydrodynamiques au cours de la période avec couvert de glace. Par ailleurs, on sait que les premiers signes d'érosion sont apparus dès le mois de mars;
- **29 avril** : en 2017, cette journée s'est particulièrement démarquée puisqu'elle présente une combinaison de débits printaniers très importants sur la Petite rivière Péribonka (alors que le débit de la Péribonka était un débit moyen représentatif pour la période) et d'un niveau du lac Saint-Jean bas. Le ratio du débit de la Petite rivière Péribonka par rapport au débit de la rivière Péribonka était exceptionnellement élevé (0,20) pour la période. Cette journée doit donc représenter les conditions les plus critiques en termes de dynamique fluviale active pour la période libre de glace;
- **3 mai et 9 mai** : à ces dates, les débits de crue printanière de la Petite rivière Péribonka sont demeurés très élevés, largement supérieurs aux normales, alors que le niveau du lac Saint-Jean montait progressivement. Le but est donc d'évaluer en quoi les forts débits de la Petite rivière Péribonka ont produit des conditions hydrodynamiques plus sévères en 2017 qu'à l'ordinaire et comment la montée du niveau du lac contribue à la réduction de la dynamique fluviale.

Pour tous les cas étudiés dans la période de dynamique fluviale active, on compare systématiquement les simulations de la date donnée en 2017 avec la simulation équivalente en conditions moyennes normales à pareille date selon l'historique des données disponibles.

- **une période à dynamique fluviale atténuée** : cette période, qui s'étire de mai à janvier, se caractérise par de hauts niveaux du lac Saint-Jean qui bloquent en bonne partie la dynamique fluviale. Elle représente la plus grande partie de l'année. Au cours de cette période, il est anticipé que les vagues et les courants littoraux soient les principaux vecteurs d'érosion des berges dans le secteur de la Pointe à Langevin. Deux cas sont étudiés dans le cadre de ce chapitre, soit :
 - **25 septembre 2017** : il s'agit d'un cas représentatif des conditions hydrométéorologiques moyennes d'été-automne. Ce cas est utilisé par ailleurs pour l'étalonnage du modèle numérique 3D. En effet, les relevés hydrométriques fournissant les informations de base nécessaires à l'étalonnage ont été réalisés à cette date;
 - **12 novembre 2016** : cette date correspond à la seule tempête présentant des vents de provenance OSO (voir section 4.5) survenue en 2016. Ce sont en effet les vents qui soufflent dans cette direction qui produisent les conditions d'érosion littorale les plus sévères le long de la Pointe à Langevin (Lasalle | NHC, 2016). La tempête du 12 novembre 2016 a été choisie pour élaborer un modèle intégrant le régime des vagues et la production de courants littoraux. Ce cas est développé afin d'évaluer le lien possible entre la problématique vécue à la pointe et les processus côtiers (par différence aux processus fluviaux).

Finalement, deux modèles différents ont été élaborés dans le cadre des analyses, l'un pour représenter la morphologie des rivières en 2016 et l'autre pour celle de 2017. En effet, l'approfondissement de la fosse peut conduire à modifier l'hydrodynamique des rivières pour des conditions hydrométéorologiques identiques. Ainsi, on utilise un modèle représentant le fond des rivières tel qu'il était en 2016 pour reproduire l'hydrodynamique qui a provoqué a priori l'approfondissement de la fosse en mars-avril 2017. Par contre, on utilise plutôt un modèle représentant le fond actuel des rivières tel qu'en 2017 pour représenter les écoulements en avril-mai 2017, soit à la fin de la période d'approfondissement de la fosse. La comparaison du comportement hydrodynamique entre les deux modèles pour des niveaux et débits identiques permettra par ailleurs d'évaluer de quelle manière l'approfondissement de la fosse peut modifier les contraintes hydrodynamiques dans le futur.

Le Tableau 6.1 présente une synthèse des scénarios de simulation utilisés pour caractériser l'hydrodynamique à différentes périodes de l'année.

6.2.2 OUTILS DE MODÉLISATION

L'outil de modélisation numérique utilisé dans cette étude est le logiciel TELEMAC en version deux dimensions (2D) et trois dimensions (3D). Le modèle TELEMAC a aussi été couplé aux modules complémentaires TOMAWAC et SISYPHE selon le scénario simulé. Le module TOMAWAC permet d'intégrer au modèle hydrodynamique TELEMAC l'effet des vents et des vagues qui contribuent à la génération des courants littoraux. Quant au module SISYPHE, il permet d'intégrer le transport des sédiments de façon dynamique dans le modèle. Toutefois, la modélisation du transport sédimentaire avec SISYPHE comporte certaines limitations. En effet, les processus érosifs résultants de l'hydrodynamique complexe à la confluence des rivières sont difficilement quantifiables dans le cadre de cette étude, compte tenu de la taille de la zone

à modéliser et de la durée des événements hydrologiques critiques à prendre en compte. Néanmoins, SISYPHE reste un outil utile pour visualiser l'effet sur l'érosion du lit des vitesses de l'eau à la confluence des rivières.

Puisque le phénomène local de la Pointe à Langevin est influencé par des phénomènes hydrodynamiques à plus grande échelle (dynamiques fluviales sur la rivière Péribonka et la Petite rivière Péribonka, niveaux du lac Saint-Jean, vagues générées par le vent, etc.), le domaine d'étude s'étend suffisamment loin pour permettre, d'une part, de représenter adéquatement les conditions hydrodynamiques à l'approche du secteur d'intérêt, et, d'autre part, de couvrir l'ensemble du secteur susceptible de recevoir des aménagements et d'en subir des impacts potentiels.

La modélisation en trois dimensions couvre un vaste domaine, soit environ 2,5 et 6 km en amont du point de confluence respectivement pour la Petite rivière Péribonka et la rivière Péribonka, et environ 3 km en aval jusqu'à l'embouchure de la rivière Péribonka dans le lac Saint-Jean (incluant l'île Bouliane). La Figure 6.1 présente la délimitation du secteur modélisé.

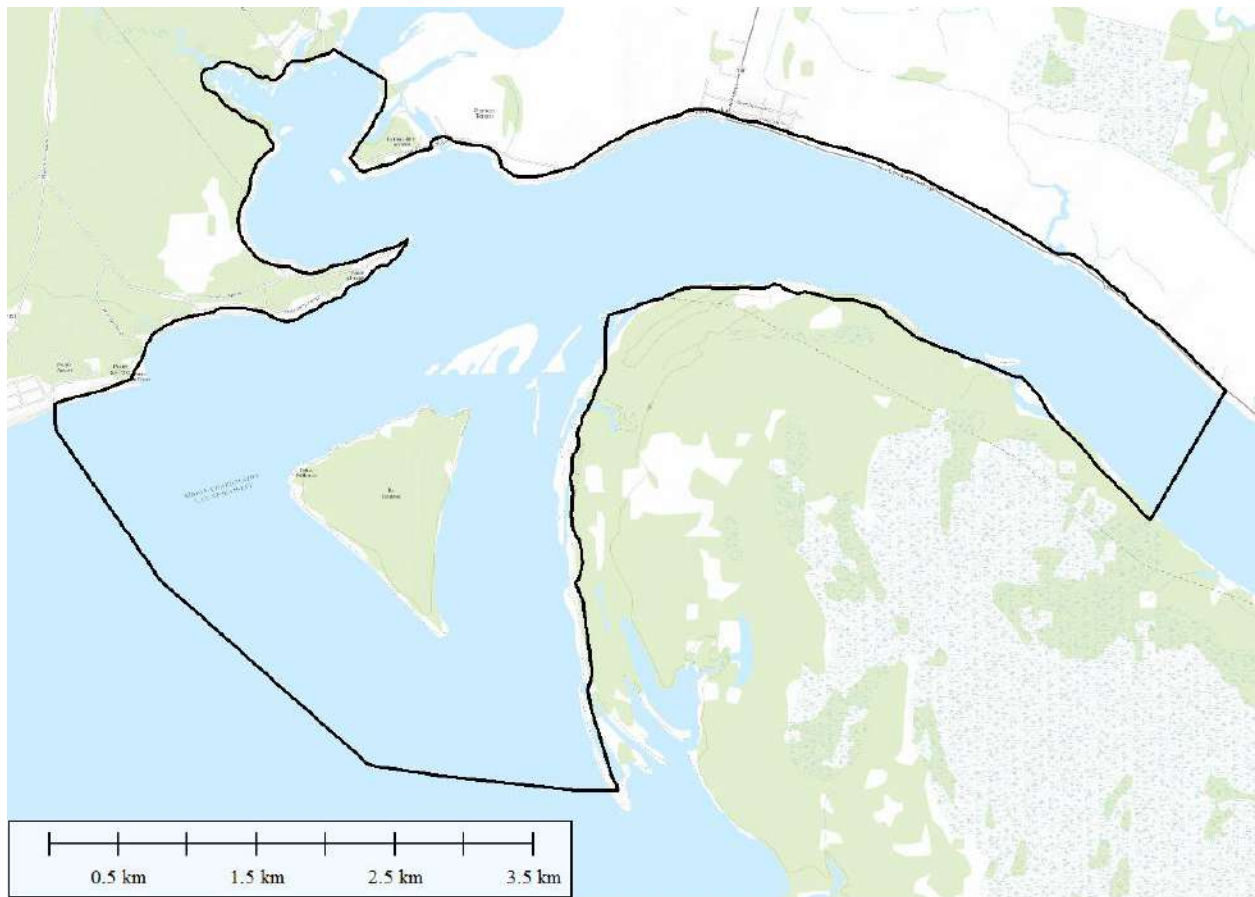


Figure 6.1 Délimitation du secteur modélisé

Tableau 6.1 Synthèse des scénarios de simulation utilisés dans le cadre de la caractérisation hydrodynamique

PÉRIODE	CONDITIONS PARTICULIÈRES	CAS CONSIDÉRÉS ¹	MORPHOLOGIE DE RÉFÉRENCE	NOM DE LA SIMULATION	OBJECTIFS
Dynamique fluviale active mi-février à mi-mai	Présence d'un couvert de glace mi-février à mi-avril	10 mars 2017 Q _{PP} = 19,9 m ³ /s Q _P = 619 m ³ /s N _{LSJ} = 98,48 m	2016	DYN-GLA-10/03-17-GEO16	Comparaison de simulations avec et sans considérer le couvert de glace afin d'en apprécier l'effet sur l'hydrodynamique. Caractérisation hydrodynamique au moment des premiers signes de glissement et de la plus forte anomalie de débits sur la Petite rivière Péribonka.
		10 mars "moyen" Q _{PP} = 5,6 m ³ /s Q _P = 539 m ³ /s N _{LSJ} = 98,51 m	2016	DYN-GLA-10/03-MOY-GEO16	Cas de référence pour la comparaison avec 10 mars 2017.
	Absence de couvert de glace mi-avril à mi-mai	29 avril 2017 Q _{PP} = 175,7 m ³ /s Q _P = 875 m ³ /s N _{LSJ} = 98,71 m	2016	DYN-29/04-17-GEO16	Caractérisation hydrodynamique dans les conditions les plus sévères de la période libre de glace.
			2017	DYN-29/04-17-GEO17	Analyse de la réduction des contraintes suivant l'approfondissement de la fosse en comparant avec le même cas, mais la morphologie 2016.
		29 avril "moyen" Q _{PP} = 91,4 m ³ /s Q _P = 748 m ³ /s N _{LSJ} = 98,64 m	2016	DYN-29/04-MOY-GEO16	Cas de référence pour comparaison avec 29 avril 2017.
			2017	DYN-29/04-MOY-GEO17	Cas de référence pour comparaison avec 29 avril 2017.
		3 mai 2017 Q _{PP} = 165,9 m ³ /s Q _P = 731 m ³ /s N _{LSJ} = 99,32 m	2017	DYN-03/05-17-GEO17	Caractérisation hydrodynamique à débit exceptionnel de la Petite rivière Péribonka et niveau du lac en augmentation.
			3 mai "moyen" Q _{PP} = 94,97 m ³ /s Q _P = 830 m ³ /s N _{LSJ} = 99,13 m	2017	DYN-03/05-MOY-GEO17
	9 mai 2017 Q _{PP} = 199,9 m ³ /s Q _P = 1 006 m ³ /s N _{LSJ} = 100,63 m	2017	DYN-09/05-17-GEO17	Caractérisation hydrodynamique à débit exceptionnel de la Petite rivière Péribonka et niveau du lac en augmentation.	
		9 mai "moyen" Q _{PP} = 80,11 m ³ /s Q _P = 825 m ³ /s N _{LSJ} = 100,00 m	2017	DYN-09/05-MOY-GEO17	Cas de référence pour la comparaison avec 9 mai 2017.
Dynamique fluviale atténuée mi-mai à mi-février	Conditions normales	25 sept. 2017 Q _{PP} = 19,4 m ³ /s Q _P = 727 m ³ /s N _{LSJ} = 100,82 m	2017	ATT-25/09-17-GEO17	Cas documenté par relevés hydrométriques et utilisé pour étalonnage du modèle. Représentatif des conditions normales d'été-automne.
	Conditions de tempête	12 nov. 2016 Q _{PP} = 27,6 m ³ /s Q _P = 677 m ³ /s N _{LSJ} = 101,24 m	2016	ATT-12/11-16-GEO16	Mise en évidence du transport littoral pour une tempête dont la direction des vents est la plus critique (OSO).

¹ Débit de la Petite rivière Péribonka, Q_{PP} : débit de la station (061801) majoré de 14,5 %; Débit de la rivière Péribonka, Q_P : débit à Chute-à-la-Savane; Niveau d'eau dans le lac Saint-Jean, N_{LSJ} : niveau à la station de Roberval (062914).

À la suite des relevés bathymétriques de 2016 et 2017, deux modèles numériques de terrain (MNT) représentant chacun la bathymétrie de 2016 et 2017 respectivement ont été élaborés de manière à caractériser les processus hydrodynamiques à la confluence des rivières, avant les événements et après l'approfondissement important de la fosse. La Figure 6.2 présente la géométrie du modèle numérique élaboré avec les données bathymétriques de 2017. La Figure 6.3 présente la morphologie des fonds de rivières intégrées dans les modèles numériques pour 2016 et 2017. L'**annexe C** présente plus en détail les étapes de l'élaboration et du paramétrage des modèles numériques, notamment la phase d'étalonnage.

Par ailleurs, le logiciel ANSYS FLUENT, souvent utilisé pour simuler des écoulements turbulents complexes en trois dimensions pour une vaste gamme d'applications d'ingénierie, a été exploité afin d'élaborer un modèle permettant de prendre en compte les effets de la présence d'un couvert de glace, ce que n'est pas en mesure de faire le logiciel TELEMAC.

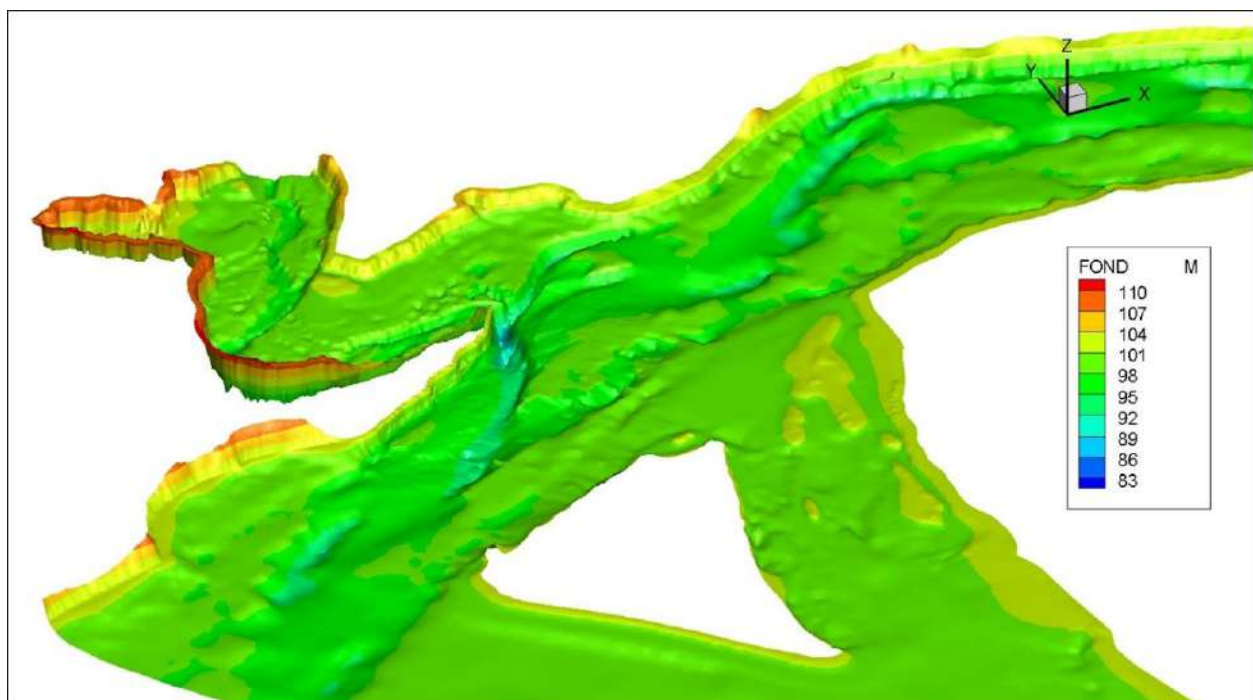


Figure 6.2 Modèle numérique de terrain – morphologie de 2017 (le ratio distance Z et XY est exagéré pour améliorer le rendu visuel)

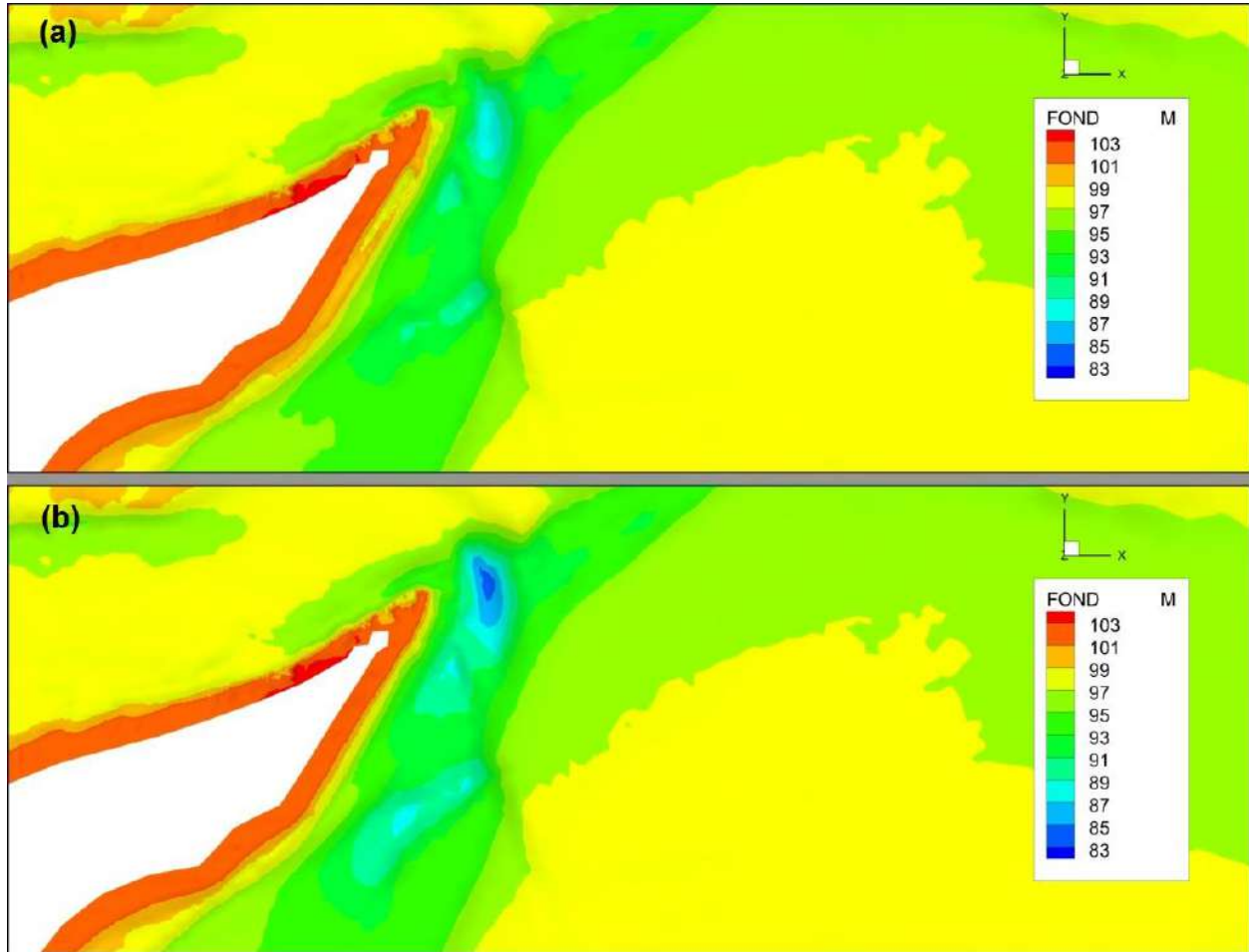


Figure 6.3 Représentation de la morphologie de 2016 (a) et de 2017 (b) dans les modèles dans le secteur de la Pointe à Langevin

6.3 CARACTÉRISATION DE LA PÉRIODE DE DYNAMIQUE FLUVIALE ACTIVE

6.3.1 EN PRÉSENCE D'UN COUVERT DE GLACE

Le cas de référence pour cette période est celui du 10 mars 2017. Les analyses hydrométéorologiques (chapitre 4) ont en effet montré que le couvert de glace est normalement encore complet à cette date. Par ailleurs, il s'agit d'un cas pour lequel l'écart à la normale était maximal en 2017 pour le débit journalier de la Petite rivière Péribonka ($19,8 \text{ m}^3/\text{s}$ contre $5,6 \text{ m}^3/\text{s}$ en moyenne, soit +250 % environ). Enfin, les premiers signes d'érosion sont apparus dès le mois de mars, en 2016 comme en 2017, indiquant que les processus hydrosédimentaires sont actifs dès la fin de l'hiver alors que le couvert de glace est présent.

Dans un premier temps, le modèle TELEMAC3D a été utilisé pour caractériser les écoulements sans tenir compte du couvert de glace. La Figure 6.4 présente les champs de vitesses dans le plan vertical, au centre de la fosse (selon les relevés de 2016), juste après le point de rencontre des eaux de la Petite rivière Péribonka et de la rivière Péribonka. L'objectif est d'évaluer, dans un premier temps, sans tenir compte de l'effet d'accroissement du couvert de glace, si les caractéristiques hydrodynamiques des confluences se manifestent (notamment les courants hélicoïdaux) et avec quelle amplitude.

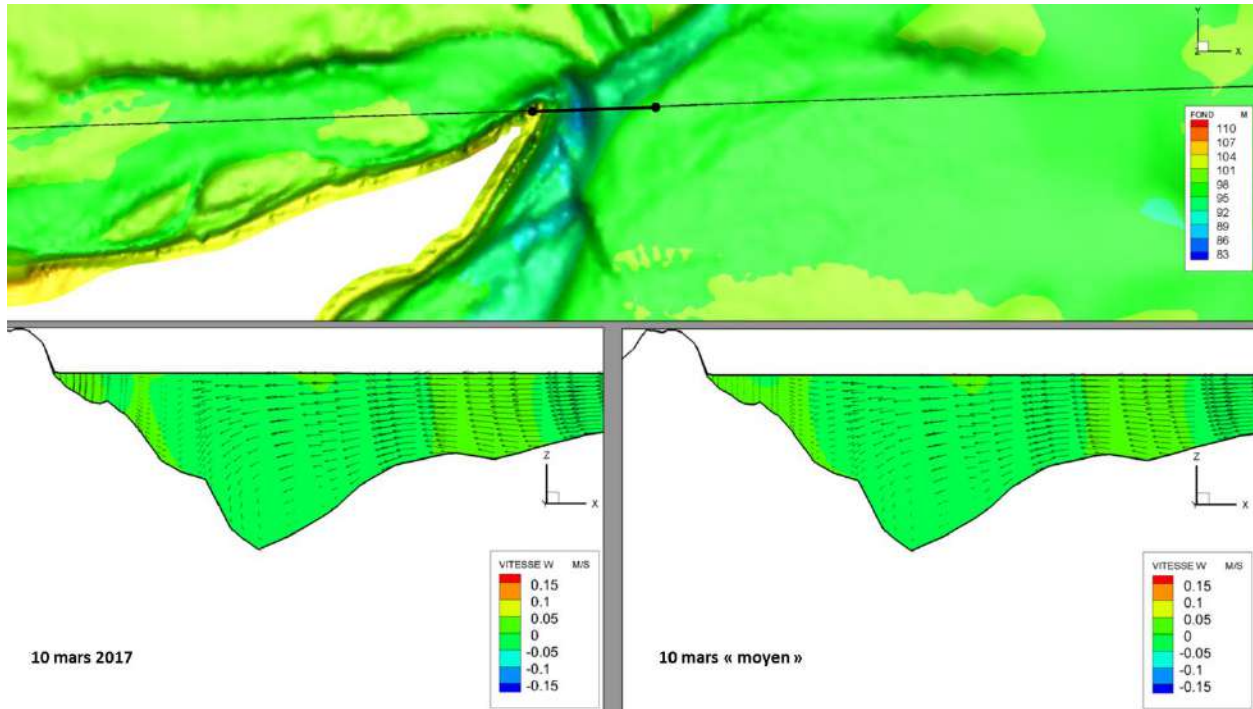


Figure 6.4 Représentation des recirculations (composante verticale de la vitesse) au droit de la fosse pour le 10 mars 2017 (DYN-GLA-10/03-17-GEO16) VS un 10 mars « moyen » (DYN-GLA-10/03-MOY-GEO16) - Effets du couvert de glace non considérés

On constate que les recirculations sont assez similaires dans le cas du 10 mars 2017 et du 10 mars « moyen » malgré la différence importante des débits de la Petite rivière Péribonka. Par ailleurs, les écoulements rotatifs des eaux en provenance de la Petite rivière Péribonka n'apparaissent pas de façon évidente, contrairement à ce qui serait attendu si l'approfondissement de la fosse était en cours.

Suivant ces constats, une seconde série d'analyses a été réalisée afin d'évaluer les effets du couvert de glace. En effet, celui-ci conduit vraisemblablement à concentrer les écoulements à l'intérieur des chenaux principaux, limitant l'accès aux hauts fonds et réduisant la section d'écoulement disponible. Le couvert de glace ajoute par ailleurs une charge sur les cours d'eau qui s'écoulent alors sous pression. De ce fait, en période hivernale, la dynamique et la répartition des écoulements sont susceptibles de différer par rapport aux conditions à l'eau libre représentées dans le premier modèle.

Afin d'évaluer les effets possibles de la présence d'un couvert de glace sur l'hydrodynamique autour de la Pointe à Langevin, WSP a donc élaboré un second modèle 3D à l'aide d'un logiciel capable de simuler les écoulements sous pression (ANSYS FLUENT). Toutefois, ce type de simulation est bien plus lourd à mettre en place, et il n'était pas possible de couvrir la totalité du domaine d'étude. Le second modèle, destiné à évaluer l'effet du couvert de glace, ne représente donc qu'un domaine limité au pourtour de la Pointe à Langevin. Ainsi, plusieurs hypothèses ont dû être posées afin de définir les conditions aux frontières de ce modèle, à partir notamment des résultats obtenus à l'aide du premier modèle 3D à l'eau libre (TELEMAC-3D), beaucoup plus vaste et ayant fait l'objet de travaux d'étalonnage. Dans la simulation réalisée, un couvert de glace d'une épaisseur moyenne de l'ordre de 0,7 m (voir section 4.4) a été considéré. Pour le représenter, un « plafond » a été imposé 0,6 m sous la surface d'écoulement simulée à l'eau libre. Enfin, la répartition des débits aux frontières du modèle a été déterminée à partir des résultats du modèle 3D complet à l'eau libre. Il s'agit d'une approche simplifiée, mais suffisante pour établir une comparaison d'ensemble avec / sans couvert de glace. La Figure 6.5 présente le domaine modélisé autour de la Pointe à Langevin, la position des six transects utilisés pour la comparaison (T1 à T6), puis la comparaison des vitesses maximales obtenues dans les simulations avec (FLUENT, à gauche) et sans (TELEMAC, à droite) couvert de glace. Il ressort de cette comparaison que :

- les vitesses semblent significativement augmentées sous l'effet du couvert de glace. On note, selon les transects, des écarts qui varient de +5 à +50 %, avec une moyenne autour de +25 %. Malgré les incertitudes liées à l'utilisation d'un modèle simplifié, on peut retenir que la présence du couvert de glace produit une accélération significative des vitesses d'écoulement;
- la répartition des vitesses est significativement influencée par la présence du couvert de glace. On note en particulier que les écoulements apparaissent beaucoup plus concentrés le long de la rive droite (à gauche sur les transects). Par ailleurs, on remarque la présence de deux champs de vitesses bien dissociés au droit du transect 5 qui traverse la fosse au point de confluence. La zone de rencontre des eaux devient alors bien visible contrairement à la simulation ne tenant pas compte du couvert de glace. La zone qui sépare les deux courants principaux, soit celui en provenance de la Petite rivière Péribonka (à gauche sur le transect, le long de la rive) et celui en provenance de la Péribonka (à droite sur le transect), se situe juste au-dessus de l'axe de la fosse. Ce constat appuie l'hypothèse de processus hydrosédimentaires actifs et d'un approfondissement de la fosse possiblement en cours;
- les écoulements de la Petite rivière Péribonka à l'intérieur de la fosse apparaissent par ailleurs (non représenté sur la Figure 6.5) de façon très claire sur les résultats de simulation avec couvert de glace alors qu'ils étaient très peu visibles dans les simulations sans couvert de glace.

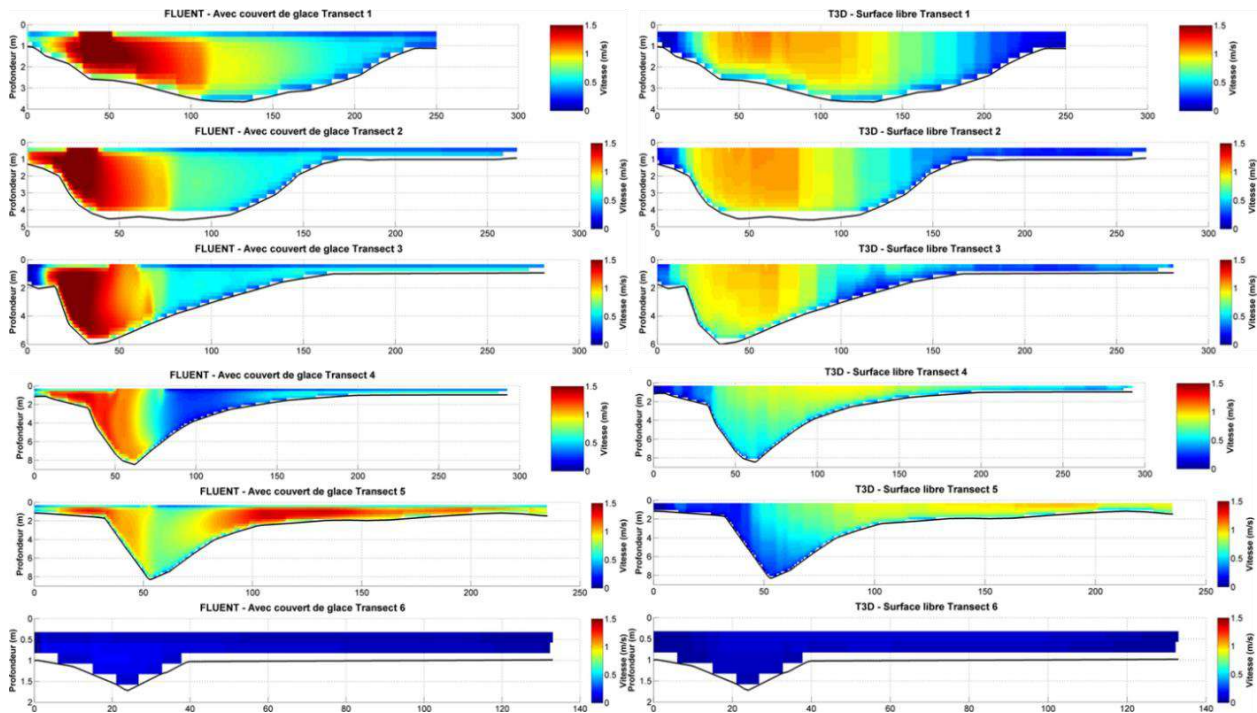
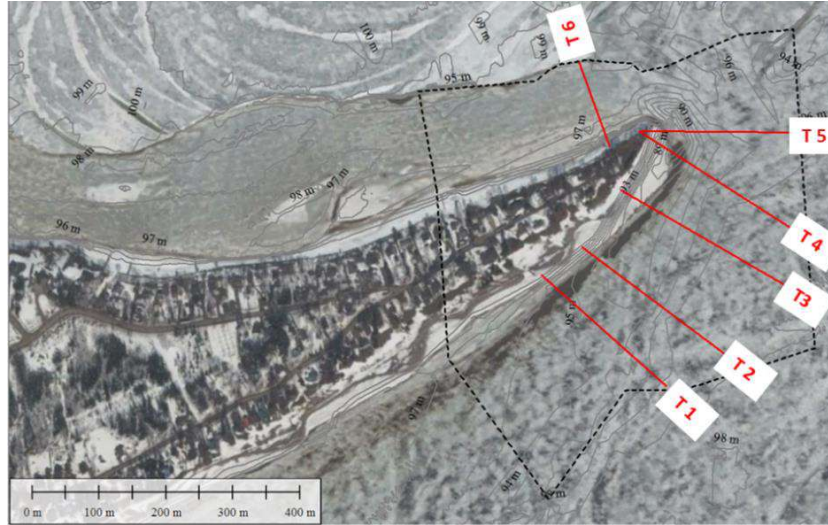


Figure 6.5 Comparaison de l'amplitude des vitesses d'écoulement dans le secteur de la Pointe à Langevin en présence et en l'absence d'un couvert de glace – Conditions de niveaux et débits du 10 mars 2017 (DYN-GLA-10/03-17-GEO16)

La comparaison des résultats des simulations avec et sans couvert de glace indique donc que les vitesses d'écoulement et leur répartition peuvent être influencées de façon significative par la présence du couvert de glace. Considérant les difficultés à modéliser avec précision les écoulements sous couvert de glace à grande échelle, les incertitudes qui persistent concernant les valeurs de débits disponibles pour la Petite rivière Péribonka (voir note de la section 4.3.2) et les incertitudes liées aux hypothèses utilisées dans la modélisation (niveaux d'eau, épaisseur de glace, etc.), il est difficile de réellement quantifier les phénomènes hydrosédimentaires en

période hivernale. Toutefois, il est possible de conclure que l'hydrodynamique est susceptible d'être significativement augmentée en période hivernale sous l'effet du couvert de glace et que les impacts d'une augmentation de débit à cette période de l'année peuvent conduire à des ajustements morphologiques importants. Les débits anormalement élevés de la Petite rivière Péribonka observés en 2017, notamment en mars, ont donc pu contribuer à l'approfondissement marqué de la fosse.

6.3.2 EN L'ABSENCE D'UN COUVERT DE GLACE

6.3.2.1 ANALYSE DU CAS CRITIQUE DU 29 AVRIL 2017

Comme indiqué précédemment, le cas de la journée du 29 avril 2017 est intéressant puisqu'il correspond à un débit particulièrement élevé de la Petite rivière Péribonka (176 m³/s contre 91 m³/s en moyenne, soit presque le double) alors que le niveau du lac Saint-Jean est encore bas, autour de 98,5 m. On s'attend donc à ce que la dynamique fluviale autour de la Pointe à Langevin soit maximale pour la période qui suit la disparition du couvert de glace et que les processus hydrodynamiques caractéristiques des points de confluence apparaissent clairement.

La Figure 6.6 présente les vitesses dans le plan vertical au droit de la fosse, au point de rencontre des eaux des deux rivières, afin de visualiser les courants rotatifs. Les conditions moyennes y sont comparées aux conditions rencontrées en 2017 à pareille date.

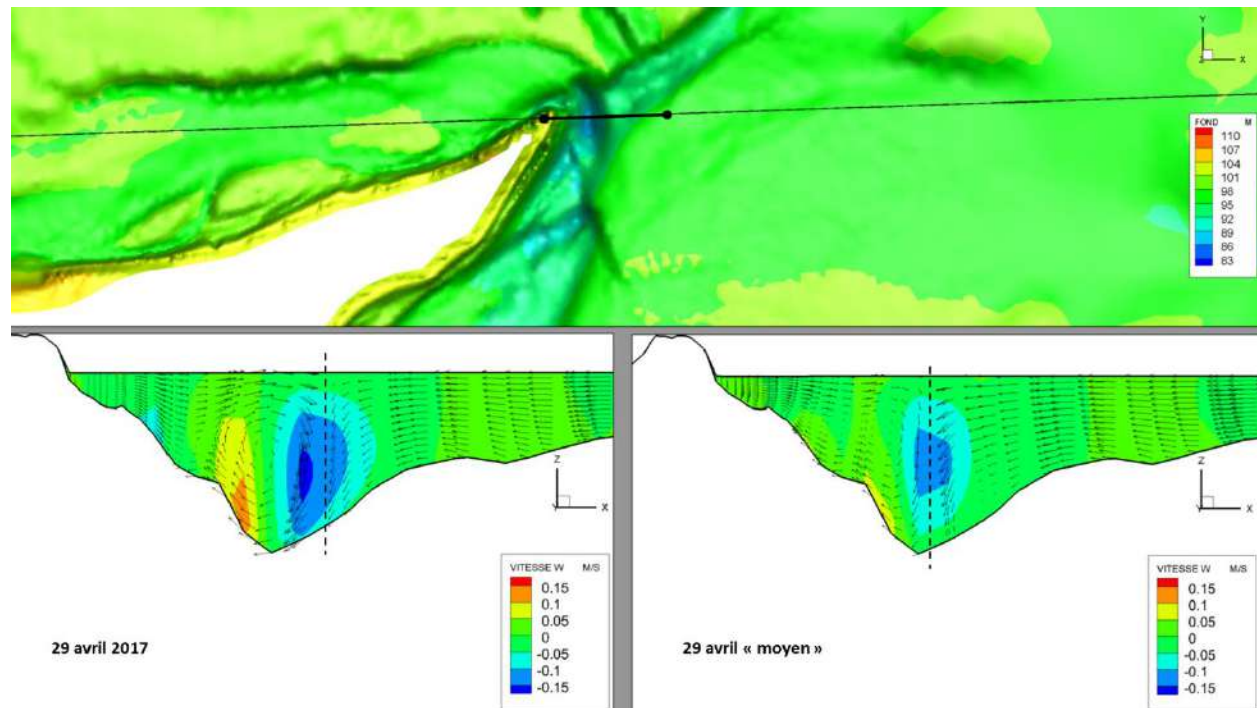


Figure 6.6 Représentation des recirculations (composante verticale de la vitesse) au droit de la fosse pour le 29 avril 2017 (DYN-29/04-17-GEO16) VS un 29 avril « moyen » (DYN-29/04-MOY-GEO16)

L'analyse de la figure précédente met en évidence deux particularités :

- le point de rencontre des écoulements entre les eaux de la Petite rivière Péribonka et celles de la rivière Péribonka se situe dans l'axe de la fosse pour les conditions « moyennes », mais plus au large dans le cas particulier de 2017. Considérant que cette zone de séparation des écoulements devrait coïncider avec l'axe de la fosse, il semble qu'à très fort débit de la Petite rivière Péribonka, l'érosion fluviale active conduite à approfondir la fosse, mais aussi à en déplacer l'axe vers l'extérieur;
- les écoulements rotatifs sont bien plus marqués en 2017 que dans les conditions normalement rencontrées à la même période de l'année. Cela se traduit par une composante verticale de la vitesse de plus grande amplitude. On peut donc en déduire que les processus hydrosédimentaires sont plus actifs qu'à la normale. Toutefois, même en conditions normales, les recirculations se produisent et laissent croire que l'hydrodynamique est suffisante pour « entretenir » la fosse.

La Figure 6.7 présente les résultats de simulation pour le même transect, mais cette fois avec la vitesse totale (et non la seule composante verticale de la vitesse dans le cas de la Figure 6.6).

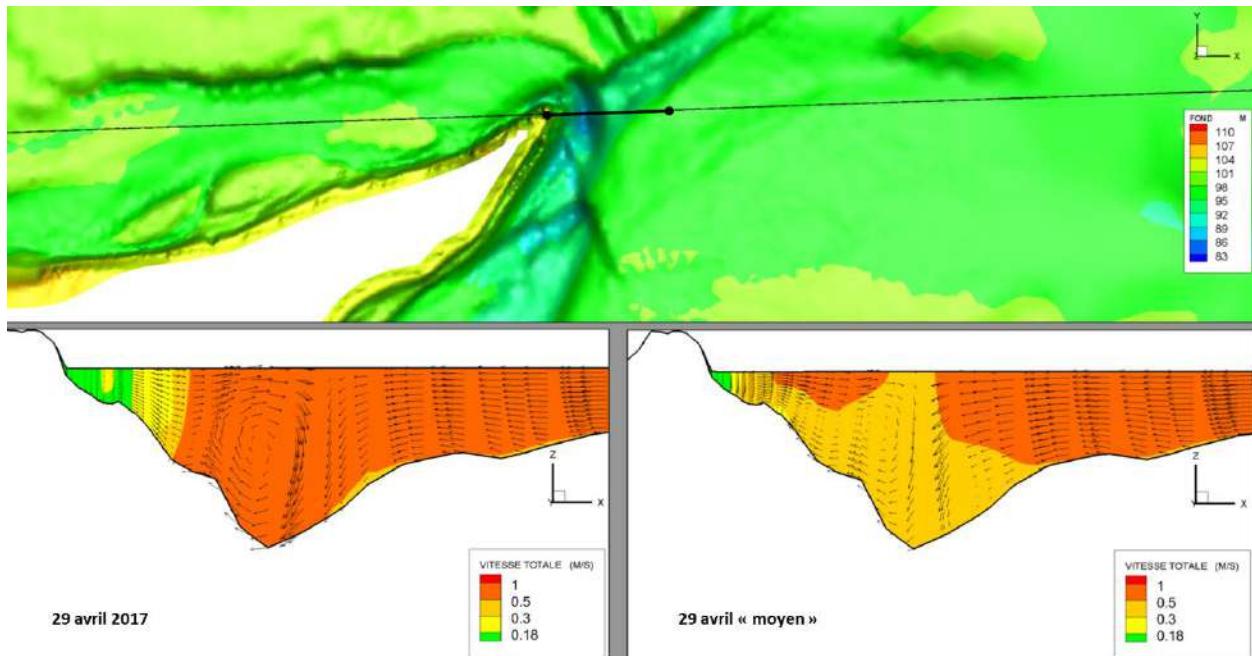


Figure 6.7 Représentation des vitesses d'écoulement au droit de la fosse pour le 29 avril 2017 (DYN-29/04-17-GEO16) VS un 29 avril « moyen » (DYN-29/04-MOY-GEO16)

On constate, à partir de la figure précédente, que les vitesses sont significativement plus élevées pour le cas particulier du 29 avril 2017 que pour le cas moyen à pareille date. Considérant la nature des matériaux et leur sensibilité à l'érosion (voir chapitre 5), les vitesses constatées, de plus de 0,5 m/s, conduisent assurément à générer de l'érosion dans la fosse. Toutefois, même en conditions moyennes à pareille date, on peut s'attendre à ce que de l'érosion se produise. En effet, les vitesses sont moindres, mais demeurent supérieures à 0,2 m/s, vitesse susceptible de provoquer de l'érosion sur les sables fins présents.

Finalement, il est possible de conclure que l'approfondissement de la fosse, qui a sans doute été initié à la fin de l'hiver alors que le couvert de glace était présent et que les débits de la Petite rivière Péribonka étaient bien plus élevés que la normale (+108 % en moyenne en mars), s'est poursuivi en avril après le départ du couvert de glace alors que les débits de la Petite rivière Péribonka restaient élevés (+39 % en moyenne en avril). L'analyse de l'hydrodynamique en conditions normales indique que les processus hydrosédimentaires sont vraisemblablement actifs régulièrement lors de la crue printanière de la Petite rivière Péribonka, lorsque celle-ci survient au mois d'avril, avant la montée du niveau du lac Saint-Jean. Toutefois, en 2017, les débits particulièrement élevés de la Petite rivière Péribonka ont sans doute contribué à augmenter l'importance de cette érosion dans la fosse au point de confluence, poursuivant un processus initié dès la fin de l'hiver. Les débits très élevés de la Petite rivière Péribonka semblent avoir favorisé un déplacement latéral de la fosse vers le large en même temps qu'un approfondissement important de celle-ci.

6.3.2.2 ÉVOLUTION DE L'HYDRODYNAMIQUE ENTRE LE 29 AVRIL ET LE 9 MAI 2017

Après avoir validé les fortes probabilités d'érosion de la fosse en mars et en avril 2017, il s'agit ici de déterminer si les processus hydrosédimentaires ont pu demeurer actifs en mai, alors que les débits de la Petite rivière Péribonka étaient toujours très élevés (+74 % en moyenne en mai), mais que le niveau du lac remontait rapidement sous l'effet des apports printaniers (+2 m environ entre le 29 avril 2017 et le 9 mai 2017).

La Figure 6.8 présente les recirculations d'eau et les vitesses au droit de la fosse, après la rencontre des eaux de la Petite rivière Péribonka et de la rivière Péribonka, successivement pour le 29 avril, le 3 mai et le 9 mai. Sur la figure, on comparera les conditions spécifiques de 2017 (à gauche) aux conditions moyennes à pareille date (à droite). Les flèches représentent la composante verticale des vitesses alors que l'échelle de couleur fournit de l'information sur la vitesse totale de l'écoulement.

À la lumière de cette figure, considérant la relative stabilité des débits au cours de la période (165 à 200 m³/s environ pour la Petite rivière Péribonka et 750 à 1 000 m³/s pour la rivière Péribonka), mais l'augmentation rapide du niveau du lac (98,7 à 100,6 m en 2017), on retire les informations suivantes :

- l'augmentation du niveau d'eau du lac Saint-Jean contribue à réduire considérablement les vitesses d'écoulement dans le secteur de la Pointe à Langevin. Toutefois, les débits particulièrement élevés de la Petite rivière Péribonka observés en 2017 (+75 % à +150 % pour les dates analysées dans la figure) ont produit des conditions vraisemblablement encore très érosives jusqu'au début mai. En conditions normales, à cette période de l'année, les vitesses commencent à repasser sous la limite approximative de début d'érosion pour les sables fins;
- à forts débits, au printemps, les processus hydrosédimentaires fluviaux semblent actifs même en conditions normales. Toutefois, l'hydrodynamique a été augmentée de façon importante en 2017 du fait des débits très élevés de la Petite rivière Péribonka;
- le positionnement de la limite de partage des eaux des deux rivières (pointillé noir sur la figure, limite des deux courants hélicoïdaux), en plus des valeurs de vitesses, semblent indiquer que les processus d'érosion ont été plus importants dans la fosse en 2017 et que celle-ci a dû avoir tendance à s'approfondir et à se déporter vers le large, chose constatée lors des analyses morphologiques réalisées au chapitre 3 (voir Figure 3.3).

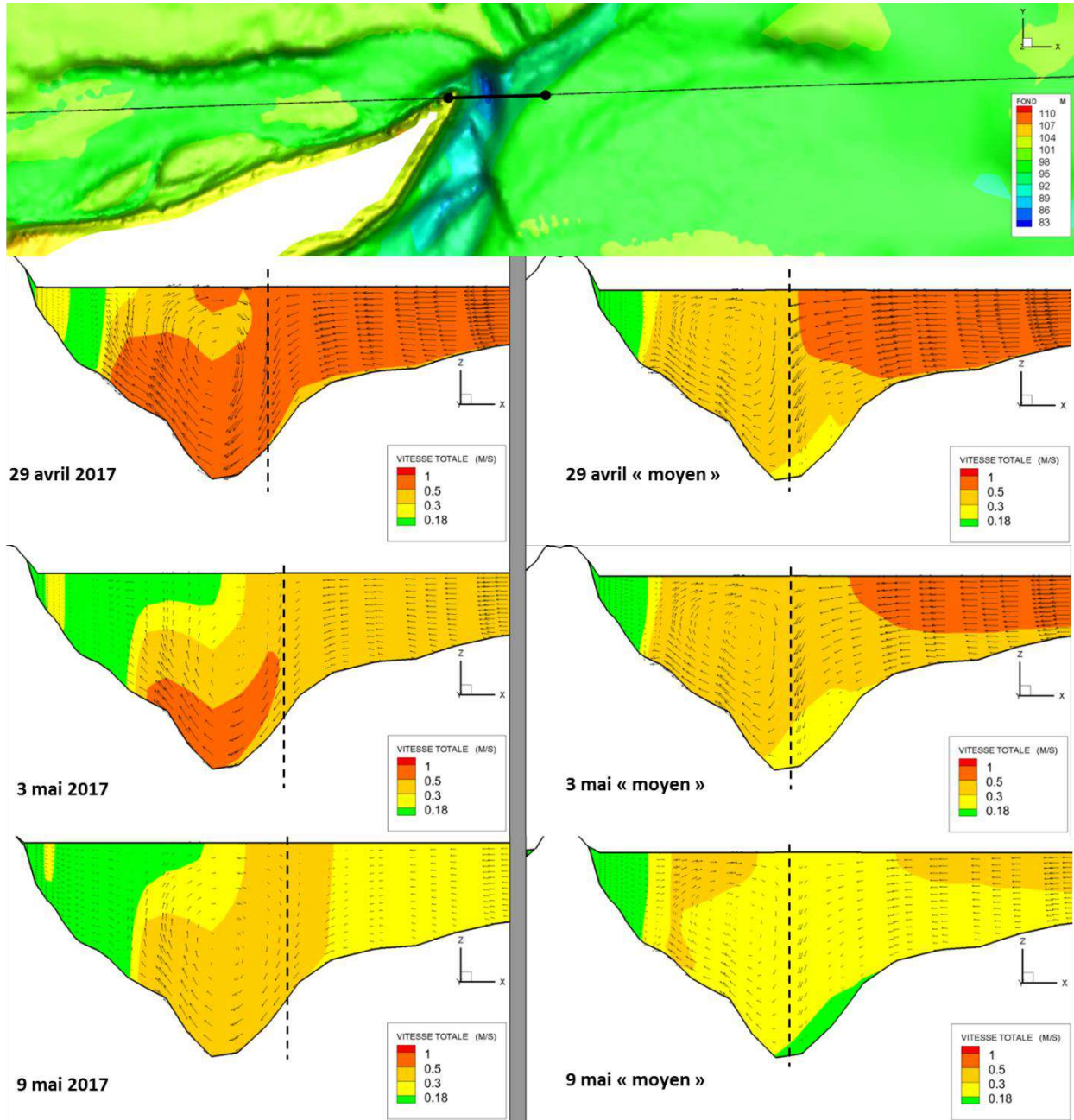


Figure 6.8 Représentation des vitesses d'écoulement au droit de la fosse pour le 29 avril (DYN-29/04-17-GEO17 et DYN-29/04-MOY-GEO17), le 3 mai (DYN-03/05-17-GEO17 et DYN-03/05-MOY-GEO17) et le 9 mai (DYN-09/05-17-GEO17 et DYN-09/05-MOY-GEO17)

6.3.3 ÉVOLUTION POSSIBLE DE LA FOSSE DANS LE FUTUR

Dans cette section, on tente d'évaluer de quelle manière pourraient évoluer la fosse et le recul des berges de la Pointe à Langevin qui y est associé. Pour ce faire, on analyse d'abord l'hydrodynamique au droit de la fosse, dans les conditions critiques du 29 avril 2017, en comparant l'amplitude des vitesses entre le modèle qui représente la fosse telle qu'elle était en 2016 et celui qui la représente dans sa forme de 2017, après approfondissement. Ainsi, on évalue si l'approfondissement de la fosse a permis d'atteindre l'équilibre hydrosédimentaire. La Figure 6.9 présente les vitesses d'écoulement au droit de la fosse pour les conditions observées le 29 avril 2017, comparant l'hydrodynamique avant et après approfondissement de la fosse.

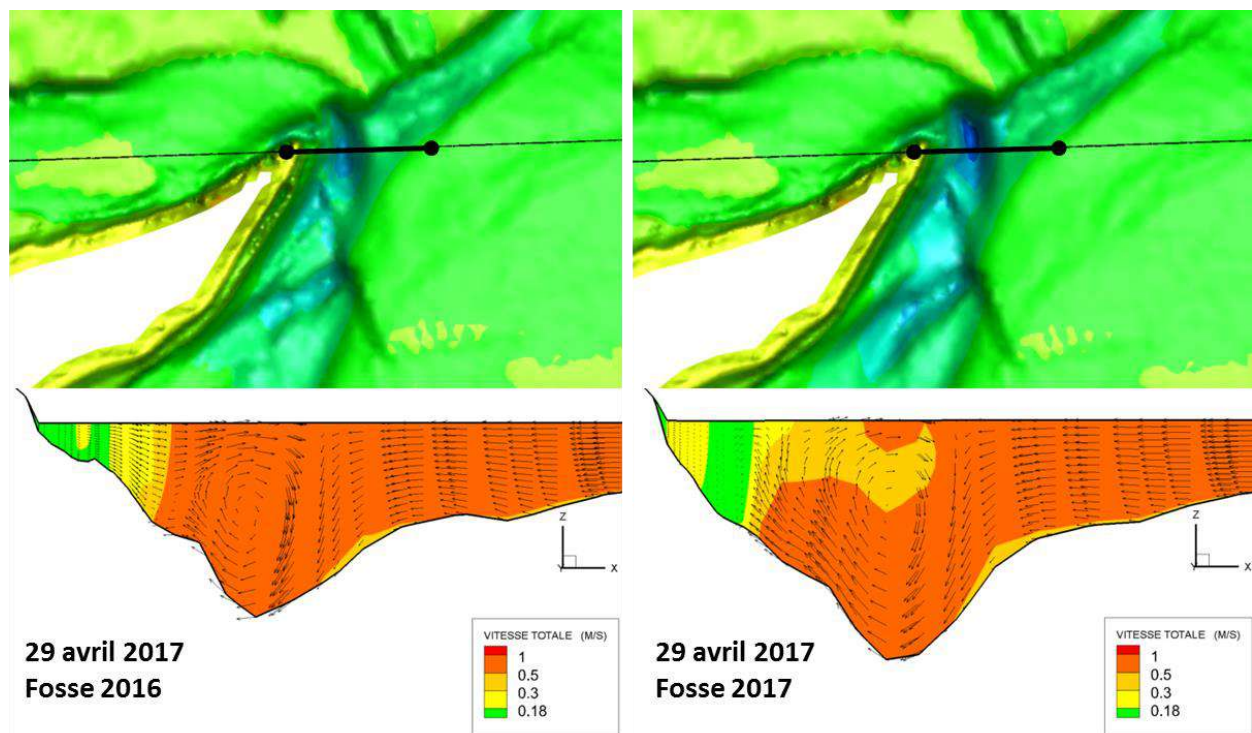


Figure 6.9 Représentation des vitesses d'écoulement au droit de la fosse pour les conditions rencontrées le 29 avril 2017, avant (DYN-29/04-17-GEO16) et après (DYN-29/04-17-GEO17) son approfondissement

On constate rapidement d'après la Figure 6.9 que si des conditions hydrométéorologiques identiques à celles vécues en 2017 se produisent à nouveau, les processus hydrosédimentaires seraient vraisemblablement de nouveau actifs et pourraient conduire à une nouvelle évolution de la fosse.

Par ailleurs, on a pu constater que, même pour des conditions normales de débits, les processus hydrosédimentaires sont probablement actifs au droit de la fosse à la fin avril et au tout début de mai, lorsque les débits de la Petite rivière Péribonka sont élevés (crue printanière) et que les niveaux du lac sont encore bas (voir Figure 6.8).

Enfin, puisque même si les vitesses sont moindres en conditions normales au droit de la fosse et qu'on observe clairement des courants hélicoïdaux susceptibles de produire des turbulences importantes à leur point de rencontre, lequel se superpose avec l'axe de la fosse dans les cas étudiés, il est fort probable que la fosse soit « entretenue » et durable dans le temps. Même si les débits demeurent proches des normales, il serait donc peu probable que la fosse se comble en partie ou en totalité au cours des prochains mois ou années. Elle pourrait par ailleurs évoluer sensiblement encore en profondeur, ne serait-ce que durant la crue printanière de la Petite rivière Péribonka à la fin avril.

6.3.4 CONCLUSIONS

Les analyses réalisées dans cette section ont permis de confirmer que les processus hydrosédimentaires ont été particulièrement sévères au droit de la Pointe à Langevin en 2017. Les débits significativement plus élevés de la Petite rivière Péribonka en mars puis en avril et en mai semblent avoir d'abord initié de l'érosion dans la fosse, alors que le couvert de glace créait une contrainte supplémentaire, puis accentué l'érosion en avril et au début de mai. La fosse se serait donc approfondie et déplacée sensiblement vers le large sous l'effet de contraintes hydrauliques quasi-continues sur une longue période de temps. Ce serait donc la durabilité de l'exposition à des contraintes érosives qui explique l'importance de l'approfondissement de la fosse survenu en 2017 et ayant conduit à des reculs importants en berge à l'extrémité de la Pointe à Langevin.

La dynamique fluviale semble donc effectivement active lorsque l'on rencontre :

- des débits plus élevés que la normale en hiver alors que le couvert de glace impose une contrainte hydraulique supplémentaire et que le niveau du lac est bas;
- des débits élevés au printemps lorsque les niveaux du lac sont bas (fin avril essentiellement pour des conditions hydrométéorologiques normales). Bien que la dynamique semble active dans des conditions normales de débits, elle varie possiblement de façon importante selon les débits rencontrés (augmentation en 2017);
- des débits particulièrement élevés et des niveaux du lac relativement hauts (jusqu'à la mi-mai probablement pour l'année 2017).

La comparaison des différentes simulations réalisées permet par ailleurs d'émettre l'hypothèse que la fosse pourrait de nouveau subir une évolution au cours des prochains mois ou années. En effet, l'équilibre ne semble pas atteint et des débits équivalents à ceux observés en 2017 pourraient relancer le processus d'érosion. Au-delà de ce constat, il semble que des conditions hydrométéorologiques normales soient suffisantes pour entretenir, voire approfondir ou déplacer sensiblement, la fosse qui s'est formée. Il apparaît donc peu probable que la situation se résorbe d'elle-même dans le futur.

6.4 CARACTÉRISATION DE LA PÉRIODE DE DYNAMIQUE FLUVIALE ATTÉNUÉE

Dans cette section, on cherche à caractériser l'hydrodynamique dans le secteur de la Pointe à Langevin pour des conditions de débits normales et des niveaux du lac représentatifs de la période été-automne. Les modèles et simulations ont ici essentiellement pour but de définir un

état de référence pour l'état actuel en prévision des analyses ultérieures qui viseront à étudier l'impact de possibles solutions d'intervention. On présente d'abord un cas représentatif de conditions normales, c'est-à-dire où aucun paramètre hydrométéorologique ne sort de l'ordinaire. Ensuite, un cas de tempête automnale est reproduit afin de représenter les courants littoraux générés par les vagues au pourtour de la Pointe à Langevin.

6.4.1 CONDITIONS NORMALES

Le cas choisi pour représenter les conditions normales représentatives de la période été-automne, lorsque les niveaux du lac sont hauts, est la journée du 25 septembre 2017. Ce cas constitue par ailleurs le scénario ayant servi à l'étalonnage du modèle 3D et pour lequel des relevés hydrométriques ont permis d'obtenir des mesures de vitesses et de débits.

La Figure 6.10 présente les vitesses maximales obtenues au droit de la fosse. On y constate que celles-ci sont inférieures à 0,18 m/s à l'intérieur de la fosse et au pourtour, soit la vitesse approximative de début d'érosion pour les sables fins en présence. Par ailleurs, les phénomènes de recirculation, qui caractérisent les confluences et qui sont à l'origine de la formation des fosses, sont très peu marqués. Ainsi, on peut confirmer que la dynamique fluviale est fortement atténuée dans ces conditions et que l'érosion d'origine fluviale est absente la plus longue partie de l'année.

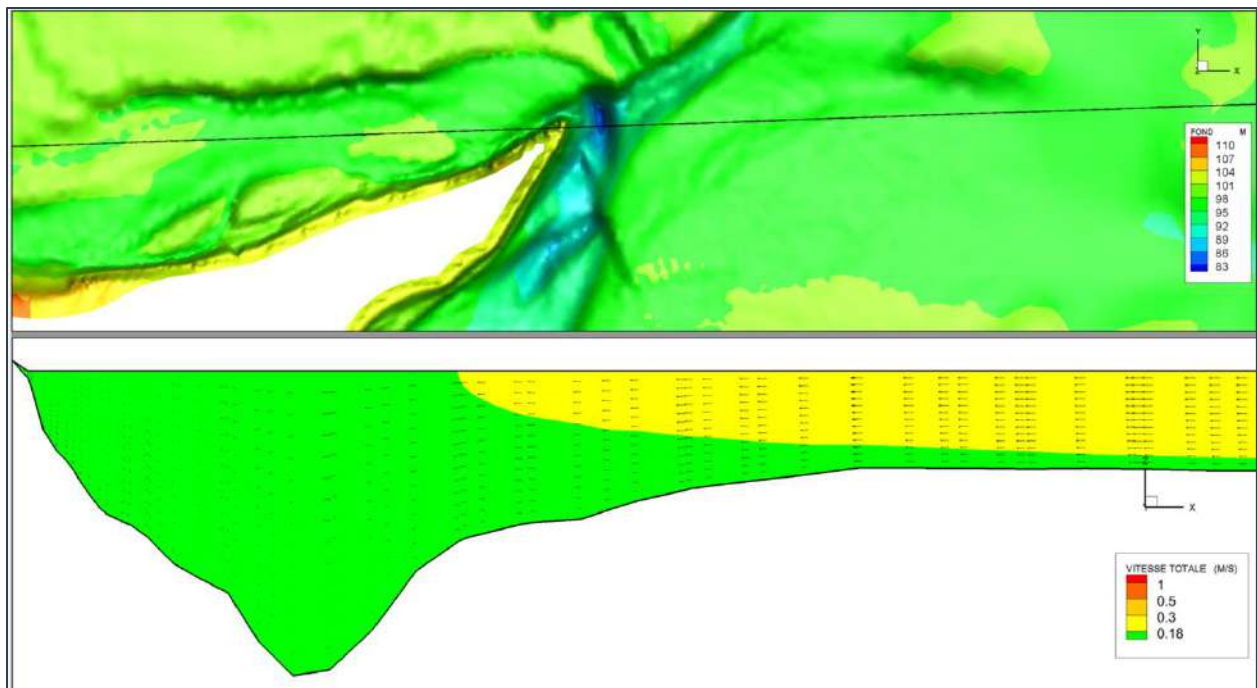


Figure 6.10 Représentation des vitesses d'écoulement au droit de la fosse pour les conditions rencontrées le 25 septembre 2017 (ATT-25/09-17-GEO17)

6.4.2 CONDITIONS DE TEMPÊTE

La tempête du 12 novembre 2016 observée dans la région du lac Saint-Jean a été retenue pour analyser les courants littoraux. Cette tempête, dont les caractéristiques ont été analysées dans le rapport R.0100 du suivi annuel des conditions érosives réalisé par le groupe Lasalle | NHC (Lasalle | NHC, 2017), a soufflé pendant environ 8 h à une vitesse moyenne de 39,3 km/h dans la direction OSO, direction critique en termes de potentiel érosif au niveau de la Pointe à Langevin (Lasalle | NHC, 2016). Les paramètres de modélisation spécifiques à ce cas de tempête sont présentés à l'**annexe C**.

La Figure 6.11 présente l'amplitude des vagues propagées jusqu'à la Pointe à Langevin dans le domaine d'étude. La Figure 6.12 présente quant à elle les vitesses à la surface de l'eau, aux abords de la Pointe à Langevin, lors de la tempête du 12 novembre 2016. L'hydrodynamique a été simulée en prenant en compte les effets des vagues. Sur cette figure, on constate que les courants littoraux générés par les vents se confrontent à la direction naturelle des écoulements des rivières, qui s'oppose à celle des vagues. On observe ainsi un courant littoral bien marqué qui remonte le long de la berge sud de la Pointe à Langevin jusqu'à la confluence avec des vitesses pouvant s'élever localement jusqu'à 2 m/s. Lors des tempêtes, ces courants littoraux présentent une capacité notable de transport de sédiments le long du littoral. Ce processus hydrosédimentaire est complémentaire aux processus fluviaux présentés dans les sections précédentes du rapport.

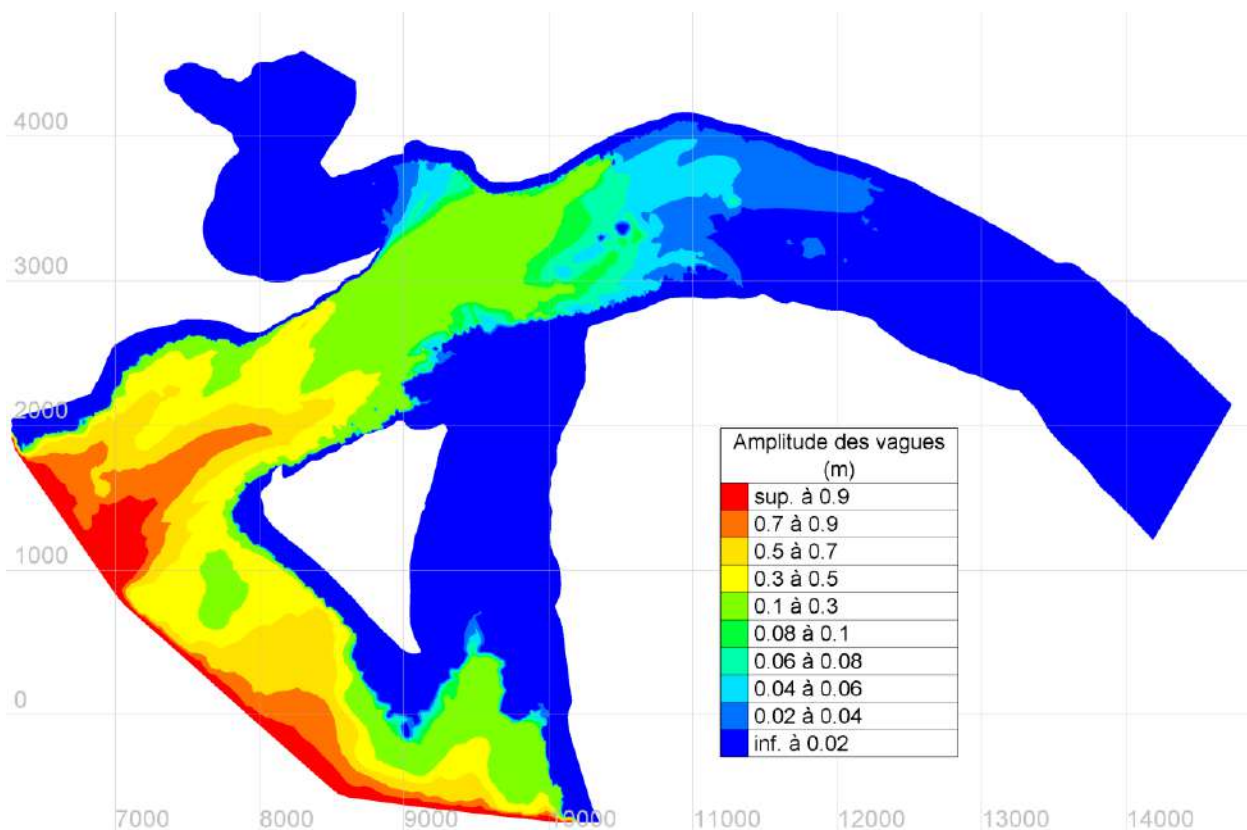


Figure 6.11 Amplitude des vagues (m), correspondant à la tempête du 12 novembre 2016, générée par le modèle TOMAWAC sur le domaine d'étude

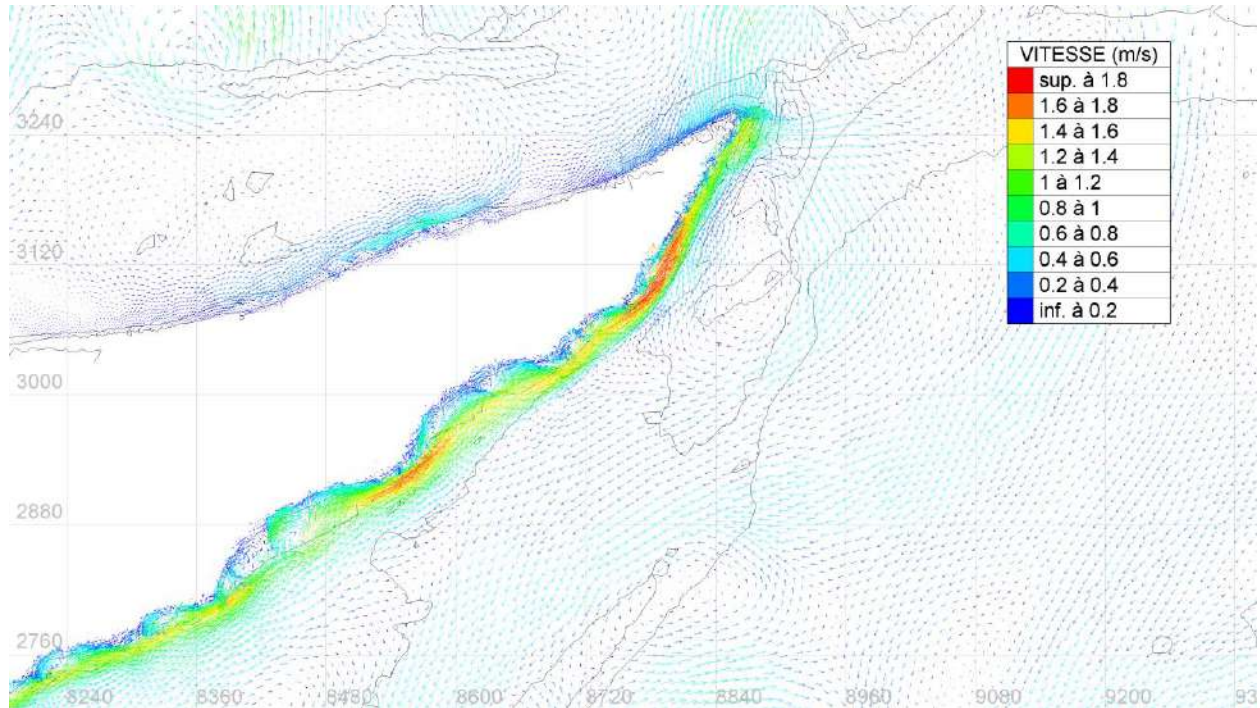


Figure 6.12 Vitesse à la surface de l'eau dans le secteur de la Pointe à Langevin, lors de la tempête du 12 novembre 2016, simulée par TELEMAC-3D

Lorsque les vents soufflent de l'ouest, les courants littoraux générés par les vagues auront tendance à transporter des sédiments le long la rive d'ouest en est. Ainsi, des vents d'ouest peuvent créer un « approvisionnement » en sédiments dans la fosse. On soulève ce point puisqu'il a été mentionné plus tôt que les apports en sédiments ont tendance à atténuer l'approfondissement des fosses aux points de confluence.

Par suite, les conditions de vents de l'année 2016 ont été analysées afin de déterminer si les apports sédimentaires littoraux auraient pu être réduits par rapport à la normale. Les analyses des conditions érosives réalisées par le groupe Lasalle | NHC pour le compte de RTA (Lasalle | NHC, 2017) ont été utilisées à cet effet. Finalement, on note effectivement une baisse moyenne de la vitesse des vents dans la direction OSO entre l'année 2016 et la période de référence 1992 à 2014. Par ailleurs, sur les roses des vents présentées dans le rapport, on peut observer une diminution en fréquence et en intensité des vents supérieurs à 30 km/h dans la direction OSO entre l'année 2016 et la période de référence 1992 à 2014. Ainsi, la diminution des vents OSO en fréquence et intensité au cours de l'année 2016 a pu réduire le « rechargement » automnal naturel de la fosse, ce qui constituerait un facteur aggravant dans le cadre de l'érosion constatée le printemps suivant.

6.5 CONCLUSIONS

Les analyses hydrodynamiques réalisées dans le cadre du mandat au moyen de divers outils de modélisation numérique ont permis de confirmer plusieurs hypothèses émises lors du diagnostic préliminaire, mais aussi de mettre en évidence plusieurs nouvelles informations.

On pourra retenir de ce chapitre les conclusions suivantes :

- les analyses réalisées dans cette section ont permis de confirmer que les processus hydrosédimentaires ont été particulièrement importants au droit de la Pointe à Langevin en 2017. Les débits significativement plus élevés de la Petite rivière Péribonka en mars puis en avril et en mai semblent avoir d'abord initié de l'érosion dans la fosse, alors que le couvert de glace créait une contrainte supplémentaire, puis accentué l'érosion en avril et au début de mai. La fosse se serait donc approfondie et déplacée sensiblement vers le large sous l'effet de contraintes hydrauliques quasi-continues sur une longue période de temps. Ce serait donc la durabilité de l'exposition à des contraintes érosives qui explique l'importance de l'approfondissement de la fosse survenu en 2017 et ayant conduit à des reculs importants en berge à l'extrémité de la Pointe à Langevin;
- la comparaison des différentes simulations réalisées permet par ailleurs d'émettre l'hypothèse que la fosse pourrait de nouveau subir une évolution au cours des prochains mois ou années. En effet, l'équilibre ne semble pas atteint et des débits équivalents à ceux observés en 2017 pourraient relancer le processus d'érosion. Au-delà de ce constat, il semble que des conditions hydrométéorologiques normales soient suffisantes pour entretenir la fosse qui s'est formée. Il apparaît donc peu probable que la situation se résorbe d'elle-même dans le futur;
- en conditions normales d'été-automne, les vitesses d'écoulement ne semblent pas pouvoir générer d'érosion d'origine fluviale dans le secteur de la Pointe à Langevin et les phénomènes de recirculation sont très peu marqués. Ainsi, on peut confirmer que la dynamique fluviale est fortement atténuée dans ces conditions et que l'érosion d'origine fluviale est absente la plus longue partie de l'année;
- bien que les débits exceptionnels de la Petite rivière Péribonka semblent constituer l'élément déclencheur dans l'approfondissement de la fosse et les reculs de berge constatés, il est possible que certains autres facteurs aient contribué à accentuer le phénomène. On estime notamment que les apports sédimentaires, qui peuvent atténuer les effets d'érosion dans la fosse, ont pu être sensiblement réduits du fait du faible nombre de tempêtes soufflant de l'ouest (recharge en sédiments côtiers);
- les modèles élaborés permettent de représenter les conditions hydrodynamiques d'un vaste secteur et dans des conditions très variables. Ils permettent notamment de tenir compte des interactions possibles entre les courants littoraux générés par les vents et les courants d'origine fluviale. Les modèles ont permis de représenter les phénomènes de recirculation très particuliers, propres aux confluences. Ainsi, on dispose désormais de tous les outils nécessaires pour étudier d'éventuelles interventions afin d'en déterminer l'efficacité potentielle et les impacts.

7 CONCLUSIONS

Dans ce chapitre, les conclusions qui ressortent des différentes analyses réalisées dans le cadre du diagnostic complet sont d'abord reprises de façon synthétique. Ensuite, afin d'initier les discussions dans le cadre de la poursuite éventuelle du projet, plusieurs solutions qui pourraient être envisagées pour contrer la problématique de recul de berge de la Pointe à Langevin sont proposées. Il ne s'agit que de pistes de solutions, dont certaines pourront rapidement être écartées en raison de leur faible probabilité de succès ou de leurs impacts potentiels. Toutefois, il semblait important, à ce stade, de réaliser un balayage assez large du champ des possibilités afin de cibler la ou lesquelles de ces pistes de solutions méritent d'être étudiées.

7.1 SYNTHÈSE DU DIAGNOSTIC COMPLET

Afin de fournir un cadre d'analyse pour le diagnostic complet, une revue de la théorie entourant les processus hydrosédimentaires qui caractérisent les confluences de cours d'eau a d'abord été proposée. À l'issue de cette revue, on retenait les informations suivantes :

- la confluence de deux cours d'eau provoque des changements brusques et marqués sur le plan hydrosédimentaire;
- les processus hydrosédimentaires aux points de confluence sont en constante évolution, suivant les variations hydrométéorologiques et les ajustements morphologiques naturels;
- la nature des ajustements morphologiques des cours d'eau dépend en partie de la nature des sédiments rencontrés et de leur sensibilité à l'érosion;
- la zone de rencontre entre les eaux en provenance de chacun des affluents constitue la zone critique en regard à la formation de la fosse d'affouillement. Elle correspond à une zone où les turbulences sont importantes et où l'énergie augmente considérablement. L'identification de l'emplacement de la zone de rencontre des eaux aide à localiser l'axe et la position de la fosse;
- les écoulements qui confluent présentent généralement des formes hélicoïdales qui convergent en surface. L'identification de ces écoulements rotatifs grâce à la modélisation permet de caractériser la zone de rencontre des eaux où la fosse se crée;
- l'intensité de ces processus hydrodynamiques dépend de multiples facteurs, dont les principaux sont l'angle formé par les deux affluents, leurs débits et la forme des approches;
- les apports sédimentaires en provenance de l'amont du point de confluence, ou par le transport littoral, et la nature des sédiments peuvent influencer l'amplitude des ajustements morphologiques et donc la profondeur de la fosse.

Par la suite, une analyse des formes présentes dans le fond du lit de la Petite rivière Péribonka et de la rivière Péribonka a été menée, notamment à partir des relevés bathymétriques complets réalisés en septembre 2017. De cette analyse morphologique, voici les principales informations ayant été mises de l'avant :

- les chenaux principaux qui se créent à l'intérieur du lit sédimentaire des deux rivières évoluent naturellement, notamment de manière à se déplacer latéralement. Un possible

déplacement latéral progressif du chenal principal de la rivière Péribonka vers la Pointe à Langevin pourrait avoir pour effet de contribuer à un rapprochement de la fosse (point de rencontre des deux chenaux principaux) par rapport à la pointe au fil des ans;

- la fosse principale située à l'extrémité de la pointe, très profonde (environ 14 m), présente un axe qui indique clairement l'existence d'un lien direct entre la formation de celle-ci et l'entrée des écoulements de la Petite rivière Péribonka dans la Péribonka;
- l'évolution importante et rapide de la fosse entre novembre 2016 et juin 2017 indique que des conditions particulières sont survenues au cours de l'hiver et du printemps 2017;
- la fosse est très localisée et son approfondissement ne s'accompagne pas d'un étirement vers l'aval. Un phénomène d'érosion régressive (recul vers l'amont) semble se produire, sans toutefois conduire à un approfondissement très marqué pour l'instant. Les risques d'érosion semblent donc, à ce stade, limités à l'extrémité de la Pointe à Langevin.

Fort de ces premières conclusions et avant de poursuivre avec les analyses géotechniques et hydrodynamiques, WSP a procédé à des analyses hydrométéorologiques visant, d'une part, à préciser la nature des changements survenus en hiver et au printemps 2017 et, d'autre part, à fournir les paramètres d'entrée pour les analyses suivantes. Ainsi, des analyses ont été effectuées sur les niveaux d'eau du lac Saint-Jean, sur les débits de la Petite rivière Péribonka et de la rivière Péribonka, sur les vents ainsi que sur les glaces. À l'issue de ces analyses, il ressort que :

- le débit de la Petite rivière Péribonka est sans doute la variable principale pour expliquer les évolutions morphologiques au point de confluence. Les débits de la Petite rivière Péribonka ont en effet été particulièrement élevés en 2017 par rapport aux moyennes historiques, notamment pour la période du 15 février au 15 mai (+66 %). Le débit moyen de la Petite rivière Péribonka observé en 2017 sur la période 15 février-15 mai constitue le maximum historique enregistré depuis 1975;
- les débits de la rivière Péribonka ont aussi été relativement élevés par rapport aux moyennes historiques, sans toutefois présenter de caractère extrême (+11 %). L'analyse du ratio de débit entre les deux rivières, également maximal en 2017, indique par ailleurs que l'augmentation ne s'est pas opérée de façon proportionnelle sur les deux cours d'eau et que les débits de la Petite rivière Péribonka sont le principal facteur de changement;
- puisque plusieurs années présentent des maximums mensuels sur la Petite rivière Péribonka supérieurs à ceux de 2017, qui correspondent à des événements de crues ponctuels, on pense que la durabilité de l'exposition à des débits soutenus lors de la période d'intérêt joue un rôle important dans l'envergure des ajustements hydrosédimentaires au point de confluence observés en 2017;
- les niveaux d'eau du lac Saint-Jean n'indiquent aucun changement significatif en 2016 ou en 2017;
- les conditions de glace semblent avoir été représentatives des conditions normales au cours des dernières années. Le couvert de glace doit être considéré dans les analyses hydrodynamiques puisqu'il est susceptible d'accentuer les vitesses et la recirculation à la fin de l'hiver (jusqu'à la mi-avril environ). En contrepartie, les turbulences présentent sous le couvert de glace contribuent à le fragiliser ce qui se traduit par le départ hâtif de la glace à l'extrémité de la pointe et le long de celle-ci. Ce risque doit être pris en compte dans la planification des usages récréatifs hivernaux;

- les conditions de vents semblent avoir été défavorables en 2016 en ce qui a trait au phénomène d'érosion de la pointe. En effet, les tempêtes ont été moins nombreuses qu'à l'habitude cette année-là et ont été accompagnées de vents majoritairement de provenance ESE. Ainsi, les courants littoraux créés par les vagues ont favorisé le transport de sédiments côtiers de la pointe vers le lac plutôt que l'inverse qui s'observe lors des tempêtes OSO (une seule de faible importance en 2016);
- une majoration des débits de l'ordre de 15 % est retenue pour estimer les débits de la Petite rivière Péribonka au droit de la Pointe à Langevin à partir des données de la station du MDDELCC située en amont de la route 169 (061801);
- l'épaisseur maximale moyenne du couvert de glace en hiver est de l'ordre de 0,7 m;
- à l'horizon 2050, les études réalisées par RTA, en partenariat avec Ouranos, indiquent que :
 - les crues printanières auront tendance à être plus longues, avec des débits moyens plus importants (10 %) pour des débits de pointe plus faibles;
 - les débits hivernaux auront tendance à augmenter (15 à 30 %).

Après ces constats, les études géotechniques ont permis, d'une part, de consolider l'information disponible quant à la nature des sols en place et, d'autre part, de mettre à jour les calculs de stabilité afin de déterminer les risques de glissement à court terme. On doit en retenir que :

- les dépôts sédimentaires observés consistent en des sols granulaires lâches. Ces sols sont fins, non cohésifs et lâches, et apparaissent donc très vulnérables à l'érosion;
- à l'extrémité de la Pointe à Langevin, les dépôts semblent se densifier à partir de l'élévation 83,5 m, ce qui correspond à l'élévation approximative du fond de la fosse selon les derniers relevés bathymétriques réalisés. Cette augmentation de la compacité des sols pourrait laisser présager une possible diminution du taux d'érosion des sols à partir de ce niveau et donc un ralentissement de l'approfondissement de la fosse dans des conditions hydrodynamiques telles que celles vécues en 2017. Cependant, la stratigraphie des sols présente des disparités entre les forages et il est difficile de confirmer la présence de couches plus compactes sur l'ensemble du secteur. Par ailleurs, les données de l'un des forages indiquent que les sols semblent redevenir lâches sous la couche compacte;
- les sables fins qui caractérisent les sols en place présentent la granulométrie la plus sensible à l'érosion qui puisse être, soit entre 0,1 et 0,3 mm en moyenne. Pour ces matériaux, la vitesse de début d'érosion peut être aussi basse que 0,18 m/s. Pour la partie des matériaux les moins sensibles, la vitesse de début d'érosion demeure par ailleurs très faible, de l'ordre de 0,4 m/s;
- puisque les analyses sont réalisées pour les sols protégés (et non exposés aux écoulements des rivières), les vitesses nécessaires à l'érosion indiquées ci-haut sont de bons indicateurs pour les zones en érosion active (mise à nue récente de nouvelles couches de sédiments), mais peuvent être sous-estimées pour les zones exposées de longue date. En effet, dans la rivière, les processus d'érosion / transport de sédiments conduisent à la formation d'une « carapace » constituée des plus grosses particules à la suite d'un tri granulométrique qui s'opère sous l'effet des contraintes hydrauliques courantes;
- les calculs de stabilité de talus indiquent que l'extrémité de la pointe est instable et que des glissements de terrain peuvent survenir à tout moment. Un recul de talus de l'ordre de 4 à 6 m doit être considéré à court terme;

- en aval de la fosse principale, le coefficient de sécurité calculé augmente progressivement et passe rapidement au-dessus de la limite de 1 en conditions statiques. Les problèmes d'instabilité sont donc concentrés à l'extrémité de la pointe, au droit de la fosse principale;
- un nouvel approfondissement de la fosse conduirait vraisemblablement à de nouveaux reculs de talus en surface.

Enfin, les analyses hydrodynamiques réalisées au moyen de divers outils de modélisation numérique ont permis de confirmer plusieurs hypothèses émises lors du diagnostic préliminaire, mais aussi de mettre en évidence plusieurs nouvelles informations :

- les processus hydrosédimentaires ont été particulièrement importants au droit de la Pointe à Langevin en 2017. Les débits significativement plus élevés de la Petite rivière Péribonka en mars puis en avril et en mai semblent avoir d'abord initié de l'érosion dans la fosse, alors que le couvert de glace créait une contrainte supplémentaire, puis accentué l'érosion en avril et au début de mai. La fosse se serait donc approfondie et déplacée sensiblement vers le large sous l'effet de contraintes hydrauliques quasi-continues sur une longue période de temps. Ce serait donc la durabilité de l'exposition à des contraintes érosives qui explique l'importance de l'approfondissement de la fosse survenu en 2017 et ayant conduit à des reculs importants en berge à l'extrémité de la Pointe à Langevin;
- la fosse pourrait de nouveau subir une évolution au cours des prochains mois ou années. En effet, l'équilibre ne semble pas atteint et des débits équivalents à ceux observés en 2017 pourraient relancer le processus d'érosion. Au-delà de ce constat, il semble que des conditions hydrométéorologiques normales soient suffisantes pour entretenir la fosse qui s'est formée. Il apparaît donc peu probable que la situation se résorbe d'elle-même dans le futur;
- en conditions normales d'été-automne, les vitesses d'écoulement ne semblent pas pouvoir générer d'érosion d'origine fluviale dans le secteur de la Pointe à Langevin et les phénomènes de recirculation sont très peu marqués. On peut confirmer que la dynamique fluviale est fortement atténuée dans ces conditions et que l'érosion d'origine fluviale est absente la plus longue partie de l'année;
- les modèles élaborés permettent de représenter les conditions hydrodynamiques d'un vaste secteur et dans des conditions très variables. Ils permettent notamment de tenir compte des interactions possibles entre les courants littoraux générés par les vents et les courants d'origine fluviale. Les modèles ont permis de représenter les phénomènes de recirculation très particuliers, propres aux confluences. Ainsi, on dispose désormais de tous les outils nécessaires pour étudier d'éventuelles interventions afin d'en déterminer l'efficacité potentielle et les impacts.

Compte tenu des analyses réalisées, WSP recommande de procéder à des suivis et à l'acquisition de certaines données complémentaires :

- procéder à de nouveaux suivis bathymétriques au cours des prochains mois afin de valider l'évolution de la fosse et mettre à jour, au besoin, les analyses de sécurité par mesure de protection du public. Ces relevés devraient par ailleurs permettre de déterminer si le chenal principal de la rivière Péribonka présente des signes de déplacement latéral actif vers la Pointe à Langevin;

- procéder à des mesures de débit et de vitesse à l'ADCP en période de crue afin de confirmer les résultats de modélisation et d'accroître le niveau de confiance envers les outils de modélisation utilisés avant de passer à l'étude de solutions;
- réaliser un suivi des nouveaux reculs éventuels de berge le long de la Pointe à Langevin afin de documenter et dater l'évolution.

7.2 ÉVALUATION PRÉLIMINAIRE DES SOLUTIONS ENVISAGEABLES

Pour conclure le diagnostic et ouvrir à la prochaine étape du projet, soit l'étude de faisabilité de différentes solutions potentielles, WSP propose dans cette dernière section un survol des pistes de solutions techniques envisageables. Ces pistes de solutions sont issues d'une réflexion qui s'appuie sur la compréhension des phénomènes acquise à travers la réalisation du diagnostic.

WSP n'a pas souhaité utiliser son expertise pour écarter d'emblée certaines pistes de solutions, jugeant opportun d'exposer l'ensemble de celles-ci pour que les moins réalistes soient écartées d'un commun accord avec les partenaires du projet.

La liste des solutions techniques potentielles présentées dans cette section s'appuie sur trois figures qui les illustrent de façon schématique, soit les Figures 7.1 à 7.3. La description des solutions potentielles va des plus pertinentes aux moins réalistes. La Figure 7.1 illustre ainsi les solutions qui semblent, a priori, les plus intéressantes à développer, la Figure 7.2 des solutions qui pourraient constituer plutôt des compléments aux premières et la Figure 7.3, des solutions peu réalistes, mais qui méritent d'être d'abord présentées puis écartées.

Il est important de retenir que les pistes de solutions présentées ici n'ont fait l'objet d'aucun dimensionnement et qu'elles sont donc présentées de façon schématique et grossière sur les figures.

Ces solutions techniques pourront être étudiées seules ou combinées dans le cadre de la prochaine étape du projet. Les scénarios d'intervention qui seront choisis pour l'étude de faisabilité devront par ailleurs être comparés à un scénario de statu quo. Pour ce dernier scénario, l'objectif sera alors d'évaluer les coûts et les impacts dans l'hypothèse où aucune intervention ne serait réalisée. Cette analyse est indispensable pour mettre en évidence les avantages et inconvénients des scénarios d'intervention et réaliser un choix éclairé.

7.2.1 SOLUTIONS PRINCIPALES

Les solutions principales, présentées à la Figure 7.1, reposent en grande partie sur la construction d'épis fluviaux. L'objectif de ces épis consiste à dévier les écoulements et modifier la trajectoire de chenaux d'écoulement principaux ou secondaires, et par conséquent, à modifier la répartition des écoulements au point de rencontre de la Petite rivière Péribonka et de la rivière Péribonka afin de repousser la fosse vers le large et d'en limiter la profondeur en facilitant le mélange progressif des eaux.

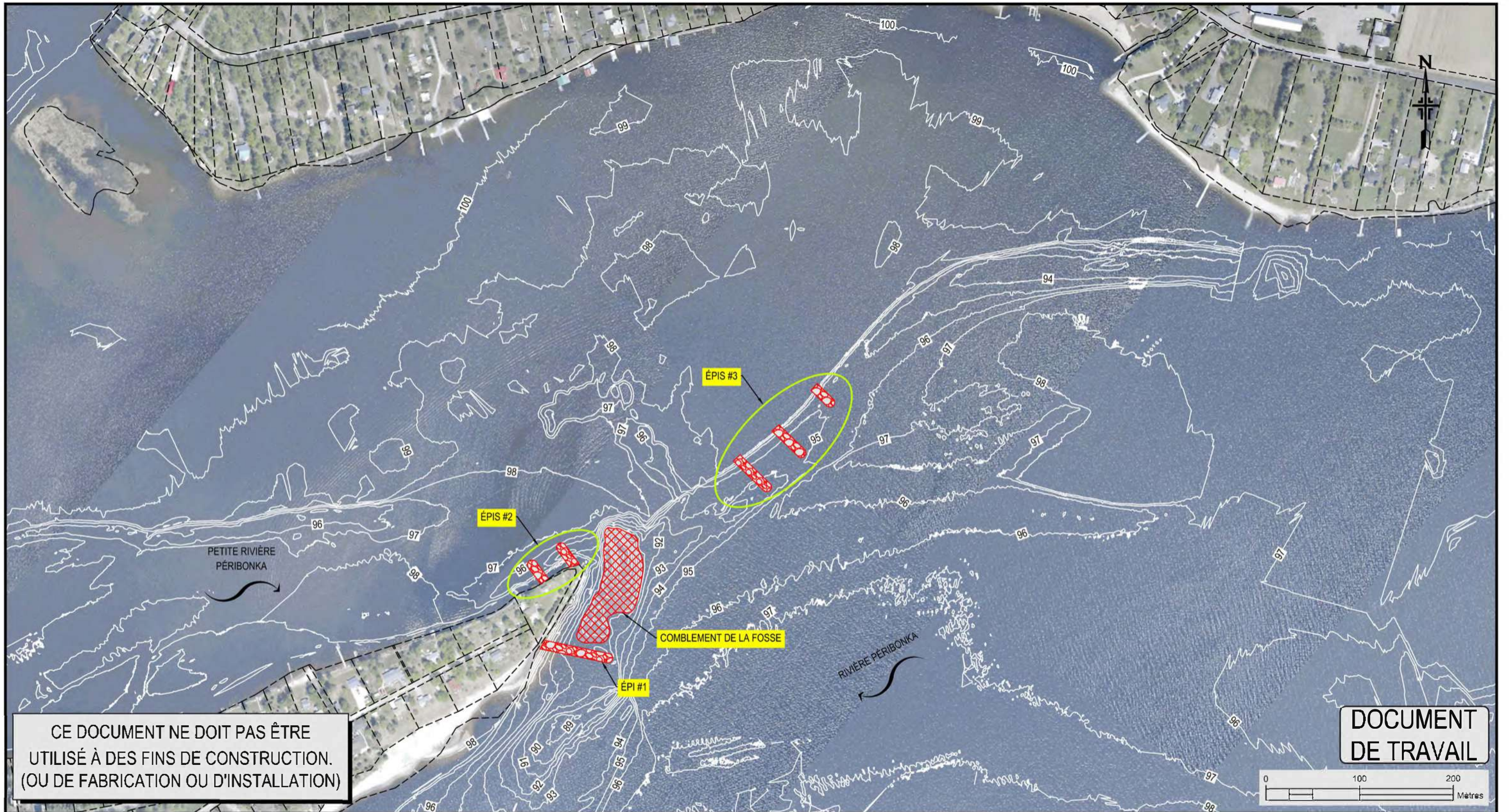
Ce type d'épi a fait ses preuves à travers le monde pour ajuster la morphologie et le tracé de chenaux de rivière, en particulier dans des contextes de rivière à fond sableux. Ils ont

notamment été utilisés à de nombreuses reprises pour s'assurer du maintien d'un chenal d'écoulement plus profond au centre des lits de rivière afin de permettre la navigation.

Ces principales pistes de solutions sont locales et leurs effets sont directs sur la fosse et la pointe. Dans l'ordre d'importance, ces solutions seraient :

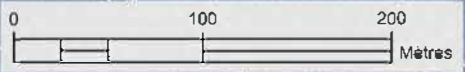
- la construction d'un épi en aval de la fosse (**épi n° 1**). Cet épi devrait, d'après WPS, être la première intervention à étudier. En effet, cette structure devrait permettre de :
 - forcer les eaux de la Petite rivière Péribonka à contourner la Pointe à Langevin plus au large et dans une courbe moins prononcée. Cela permettrait de réduire le niveau de turbulence au point de rencontre et de repousser la formation de la fosse plus au large;
 - forcer les eaux de la rivière Péribonka à passer plus au large de la Pointe à Langevin. L'épi permettrait ainsi de dévier sensiblement le chenal principal de la Péribonka vers le large, repoussant d'autant le point de rencontre avec la Petite rivière Péribonka;
 - bloquer la sortie de la fosse, créer une zone de recirculation au-dessus de celle-ci et favoriser a priori les dépôts de sédiments à l'intérieur.
- la construction d'un ou plusieurs épis en rive droite de la Petite rivière Péribonka juste en amont de la fosse (**épis n° 2**). Ce ou ces épis auraient pour but de dévier les écoulements de la Petite rivière Péribonka afin de les forcer à contourner plus largement la pointe. En complément de l'épi n° 1, ces épis permettraient donc de réduire l'angle de rencontre avec les eaux de la rivière Péribonka et de limiter les turbulences et la formation de la fosse.
- la construction d'un ou plusieurs épis dans la rivière Péribonka vis-à-vis de la Pointe à Langevin (**épis n° 3**). Ce ou ces épis auraient pour but de dévier les écoulements d'un chenal secondaire de la Péribonka qui est actuellement directement orienté vers la Pointe à Langevin et qui conduit les écoulements vers le point de rencontre des eaux et de la fosse. Ce ou ces épis permettraient donc de déplacer le point de rencontre des eaux vers l'aval et, en complément à l'épi n° 1, vers le large;
- le comblement de la fosse actuelle, partiellement ou totalement, afin de sécuriser la pointe en réduisant les risques de glissement, ainsi que pour « réinitialiser » la morphologie et l'hydrodynamique.

Dans ces solutions, la construction de l'épi n° 1, dans une forme et des dimensions à définir, semble incontournable. Les épis n° 2 et n° 3 ainsi que le comblement de la fosse apparaissent quant à eux des compléments d'intervention qui pourraient augmenter significativement les chances de succès et la pérennité des effets.



CE DOCUMENT NE DOIT PAS ÊTRE
UTILISÉ À DES FINS DE CONSTRUCTION.
(OU DE FABRICATION OU D'INSTALLATION)

DOCUMENT
DE TRAVAIL



1135, BOULEVARD LEBOURGNEUF
QUÉBEC (QUÉBEC) CANADA G2K 0M5
TÉL. : 418 623-2254 | TÉLÉC. : 418 624-1857 | WWW.WSPGRUP.COM

TITRE :

EXPERTISE ÉROSION - POINTE À LANGEVIN
PISTES DE SOLUTIONS - PRÉSENTATION SCHEMATIQUE
FIGURE 7-1

ECHELLE :

1:4000

DATE :

2018-03-12

NO PROJET :

171-12050-00

7.2.2 SOLUTIONS COMPLÉMENTAIRES

La Figure 7.2 présente trois pistes de solutions complémentaires. On parle ici de solutions complémentaires, car il semble assez certain que ces solutions déployées seules ne pourraient répondre efficacement ou durablement aux problèmes de recul de berge constatés. Cependant, elles pourraient permettre de renforcer les effets positifs des solutions principales présentées précédemment tout en apportant des réponses à des problèmes connexes.

Ces pistes de solutions complémentaires sont :

- la construction d’une série d’épis fluviaux en rive droite de la Petite rivière Péribonka, dans l’extérieur de la courbe située en amont de la Pointe à Langevin (**épis n° 4**). Ces épis viendraient barrer le chenal principal de la Petite rivière Péribonka afin de le repousser vers le large. Ainsi, les épis permettraient :
 - de solutionner durablement la problématique d’érosion de berge de la Petite rivière Péribonka (érosion fluviale due au déplacement latéral du lit de la rivière);
 - de réactiver le transport de sédiments en forçant le déplacement du lit principal de la rivière à l’intérieur des accumulations de sédiments. Les apports de sédiments seraient alors plus importants dans le secteur de la fosse à l’extrémité de la pointe ce qui pourrait permettre de réduire son potentiel d’approfondissement.
- la construction d’un ou plusieurs épis fluviaux en plus en amont, du côté intérieur de la courbe (**épis n° 5**). L’objectif de ces structures serait là aussi de déplacer en tout ou en partie le lit principal de la Petite rivière Péribonka afin de :
 - dévier les écoulements en amont de la courbe pour favoriser un chenal plus central et tenter éventuellement de recréer des chenaux d’écoulement au sein de l’accumulation de sédiments présente en rive gauche, à l’intérieur du méandre;
 - réactiver le transport de sédiments afin d’augmenter les apports dans le secteur de la fosse et réduire le potentiel d’approfondissement de celle-ci.
- le dragage de la rivière Péribonka afin de créer ou recréer un chenal principal au centre du lit de la rivière. Cela permettrait en effet de dévier la plus grande partie des eaux de la rivière Péribonka au large et de réduire la confrontation des écoulements au droit de la Pointe à Langevin. Toutefois, cette solution apparaît rapidement difficilement réalisable du fait de l’envergure des travaux, des impacts environnementaux majeurs et de la probabilité importante d’échec. En effet, si aucune structure ne force la Péribonka à emprunter et entretenir ce nouveau chenal, les probabilités sont élevées que celui-ci se comble rapidement, la rivière suivant sa tendance naturelle et privilégiant son chenal actuel.

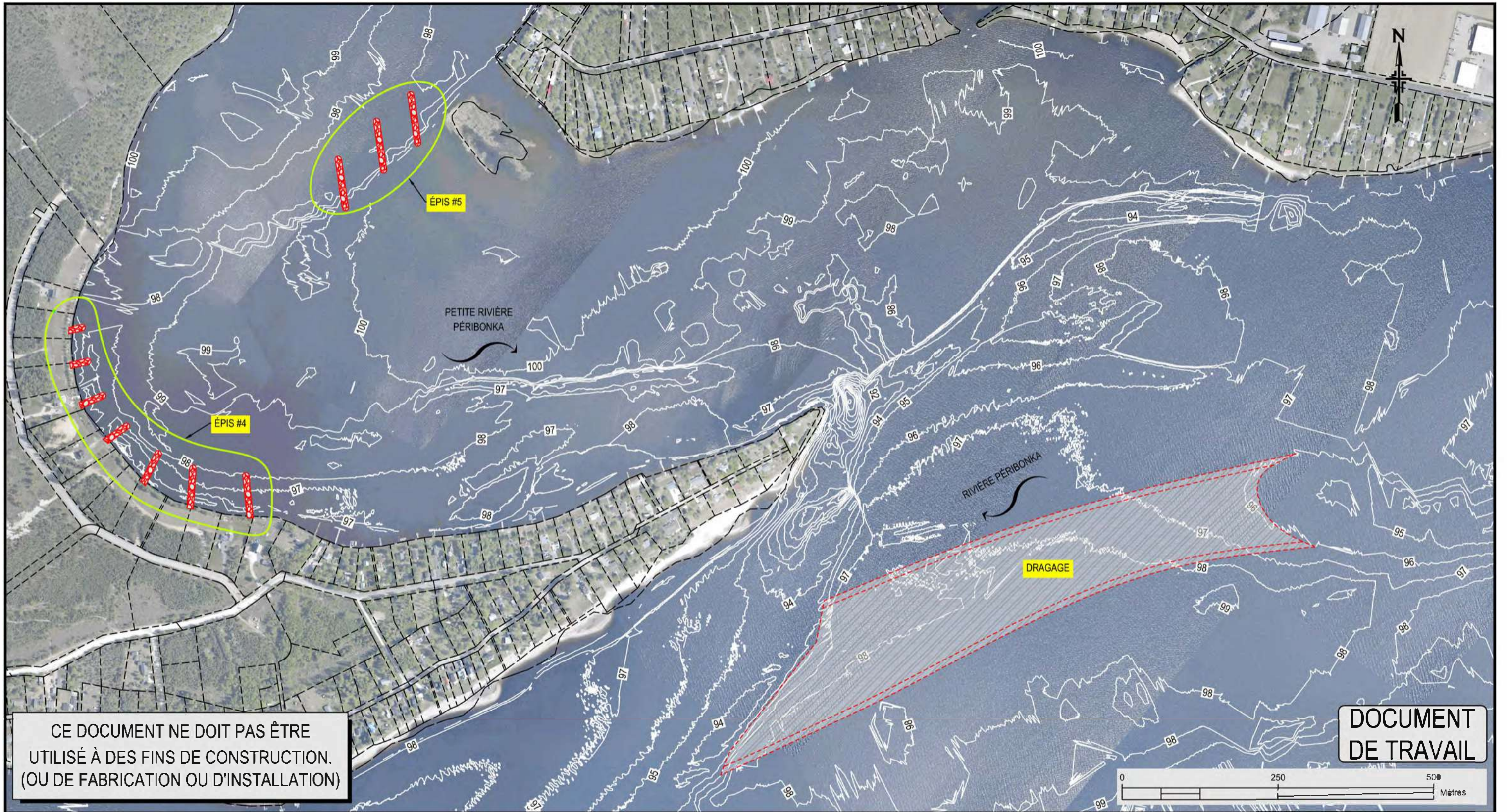
7.2.3 SOLUTIONS PEU RÉALISTES

Les solutions présentées dans cette section (Figure 7.3) apparaissent peu réalistes, mais il semble intéressant de les traiter et de présenter certains arguments avant de les rejeter définitivement. Elles consistent à dévier en tout ou en partie des écoulements de la Petite rivière Péribonka en amont de la pointe et de la fosse (court-circuit). En offrant un chemin plus direct aux écoulements, on évite aux eaux de la Petite rivière Péribonka de devoir contourner la pointe, ce qui évite tout problème de confluence et d'érosion à la Pointe à Langevin.

Deux variantes sont présentées. La première consisterait à forcer la Petite rivière Péribonka à emprunter l'un de ses bras morts, en contournant l'île Deuxième Terrasse par le nord (**canal de décharge n° 1**). La seconde consisterait plutôt à dévier les écoulements de la Petite rivière Péribonka au sein d'un canal artificiel dirigé vers l'ouest (Vauvert), court-circuitant ainsi complètement la Pointe à Langevin (**canal de décharge n° 2**). Dans un cas comme dans l'autre, plusieurs arguments s'avèrent très défavorables à ces solutions, en comparaison à celles présentées précédemment :

- les travaux seraient de très grande envergure. En plus de devoir aménager et réaménager des chenaux pour le passage de débits importants (débits de crue de la Petite rivière Péribonka), des structures permanentes devraient être construites dans le lit actuel de la Petite rivière Péribonka afin d'assurer la dérivation des eaux. Les coûts et les impacts environnementaux seraient sans aucun doute majeurs;
- ce type de projet conduirait à pénaliser plus de propriétaires que le nombre auquel il profite;
- enfin, la dérivation des eaux favoriserait la sédimentation dans le tronçon court-circuité et son comblement progressif. Les usagers en seraient pénalisés et l'habitat écologique serait fortement dégradé.

Pour ces quelques raisons principales et sûrement plusieurs autres, il apparaît peu intéressant de poursuivre avec des solutions aussi radicales que la dérivation de la rivière.



CE DOCUMENT NE DOIT PAS ÊTRE
UTILISÉ À DES FINS DE CONSTRUCTION.
(OU DE FABRICATION OU D'INSTALLATION)

DOCUMENT
DE TRAVAIL



1135, BOULEVARD LEBOURGNEUF
QUÉBEC (QUÉBEC) CANADA G2K 0M5
TÉL. : 418 623-2254 | TÉLÉC. : 418 624-1857 | WWW.WSPGRUP.COM

TITRE :

EXPERTISE ÉROSION - POINTE À LANGEVIN
PISTES DE SOLUTIONS - PRÉSENTATION SCHEMATIQUE
FIGURE 7-2

ECHELLE :

1:6000

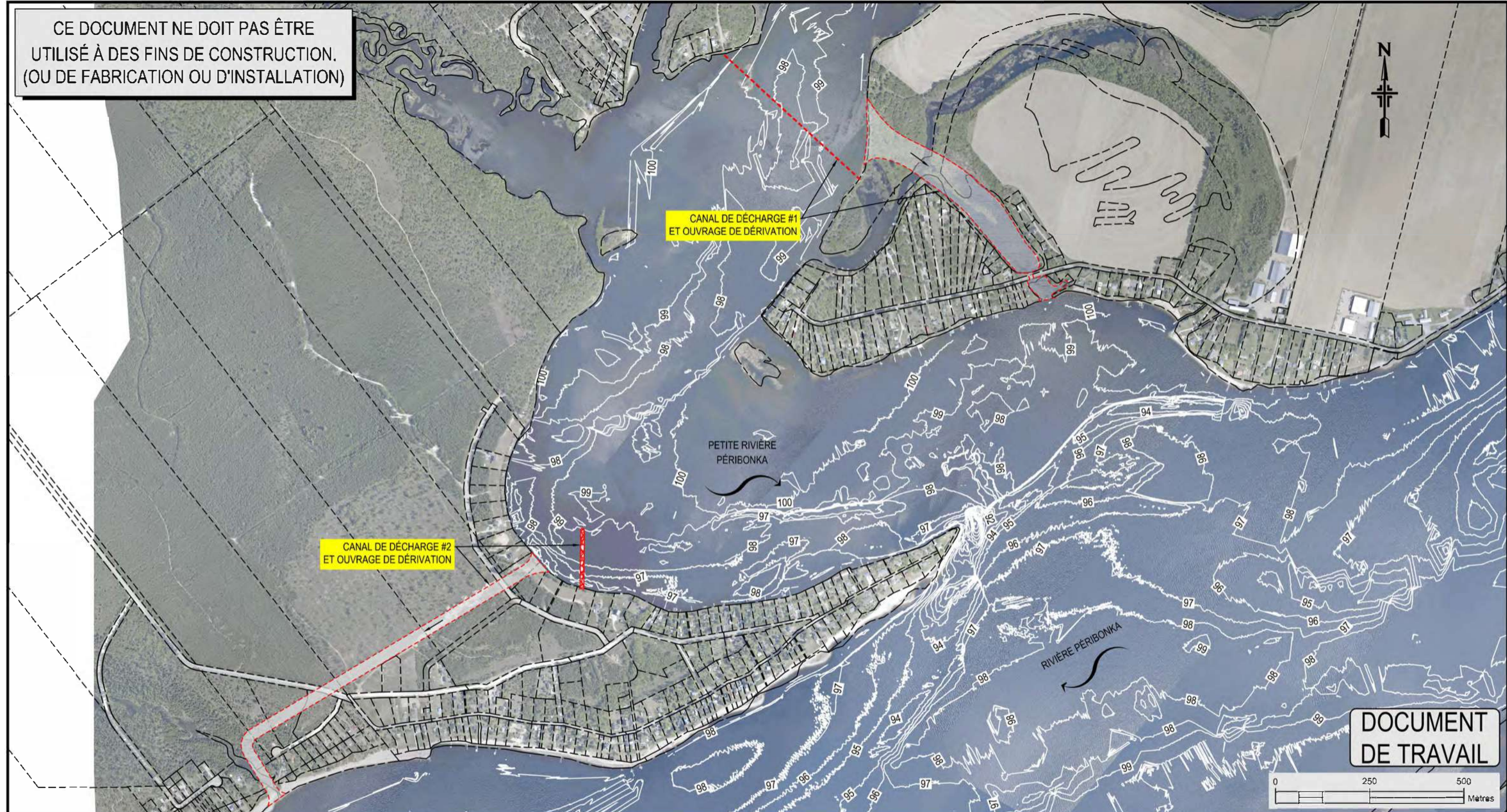
DATE :

2018-03-12

NO PROJET :

171-12050-00

CE DOCUMENT NE DOIT PAS ÊTRE
UTILISÉ À DES FINS DE CONSTRUCTION.
(OU DE FABRICATION OU D'INSTALLATION)



DOCUMENT
DE TRAVAIL



1135, BOULEVARD LEBOURGNEUF
QUÉBEC (QUÉBEC) CANADA G2K 0M5
TÉL. : 418 623-2254 | TÉLÉC. : 418 624-1857 | WWW.WSPGR@UP.COM

TITRE :

EXPERTISE ÉROSION - POINTE À LANGEVIN
PISTES DE SOLUTIONS - PRÉSENTATION SCHÉMATIQUE
FIGURE 7-3

ECHELLE :

1:10000

DATE :

2018-03-12

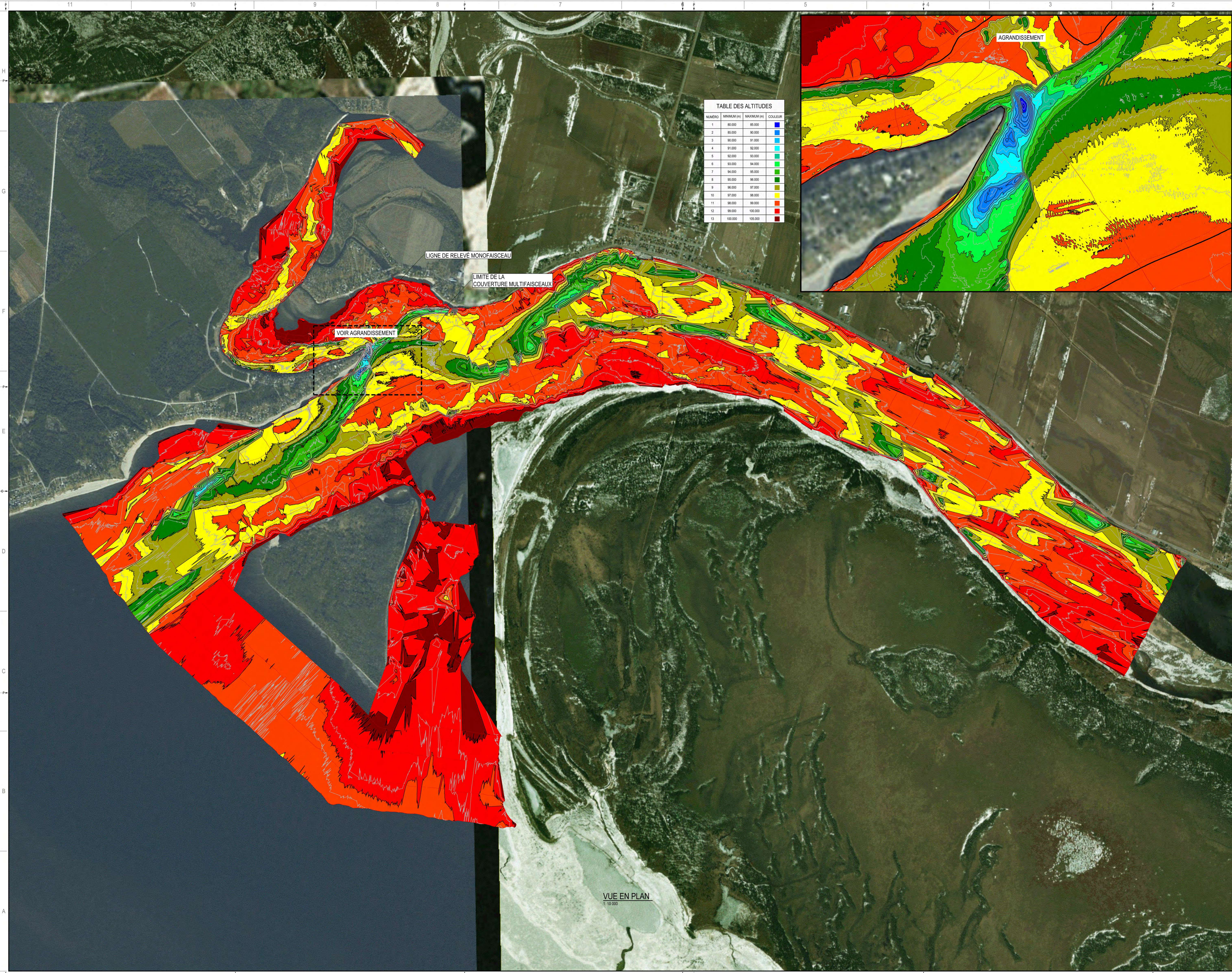
NO PROJET :

171-12050-00

ANNEXE


A RELEVÉS BATHYMÉTRIQUES SEPTEMBRE 2017





TABLER DES ALTITUDES

NUMERO	MINIMUM [m]	MAXIMUM [m]	COULEUR
1	80.000	85.000	Blue
2	85.000	90.000	Light Blue
3	90.000	91.000	Light Green
4	91.000	92.000	Green
5	92.000	93.000	Light Yellow
6	93.000	94.000	Yellow
7	94.000	95.000	Orange
8	95.000	96.000	Red-Orange
9	96.000	97.000	Red
10	97.000	98.000	Dark Red
11	98.000	99.000	Brown
12	99.000	100.000	Dark Brown
13	100.000	105.000	Black



1175, BOULEVARD LESOURDIS, BUREAU 300
 QUÉBEC, QUÉBEC CANADA G2K 6B4
 TEL.: (418) 780-8878 | TELEÉC.: (418) 780-4102 | WWW.WSPGROUP.COM

CLIENT:
Rio Tinto Alcan

REF. CLIENT: --
 PROJET: --

**EXPERTISE ÉROSION
 PONTE À LANGEVIN**

LEGÈNDE & NOTE:

NOTES:
 LES RELEVÉS BATHYMETRIQUES ONT ÉTÉ RÉALISÉS DU 25 AU 29
 SEPTEMBRE 2017.
 DATUM HORIZONTAL: NAD83
 PROJECTION: MTM FUSEAU 8
 DATUM VERTICAL: CGVD05 (MM)

PLAN G.É.:

AVERTISSEMENT: LE DROIT D'AUTEUR: CE DESSIN EST LA PROPRIÉTÉ INTELLECTUELLE DE WSP CANADA INC. AUCUNE RÉVISION, RÉPRODUCTION OU TOUT AUTRE USAGE N'EST PERMIS SANS L'AUTORISATION ÉCRITE DE WSP CANADA, INC. L'ENTREPRENEUR DEVRA VÉRIFIER TOUTES LES DIMENSIONS SUR PLACE ET FAIRE L'ADJUSTEMENT. TOUS LES SERVICES D'UTILITÉS PUBLIQUES ET RAPPORTER TOUTES ERREURS OU OMISSIONS AVANT DE COMMENCER LES TRAVAUX. L'ÉCHELLE DE CE DESSIN NE DOIT PAS ÊTRE MODIFIÉE.

ÉMISSION - RÉVISION:

NO	REV	DATE	DESCRIPTION

ÉCHELLE ORIGINALE: --
 INDICUÉE: --

SI CETTE BARRÉ NE MESURE PAS 25 MM, A AJUSTER VOTRE ÉCHELLE DE TRACAGE.

DESIGNÉ PAR: K. LAROCHE, TECH.
 RÉVISÉ PAR: F. GROUX, ING.

DISCIPLINE: **HYDRAULIQUE**

TITRE: **LEVÉ BATHYMETRIQUE
 VUE EN PLAN
 SURFACE DES ÉLEVATIONS GÉODÉSQUES**

NUMÉRO DU FEUILLET: **171-12050-00-H-002**

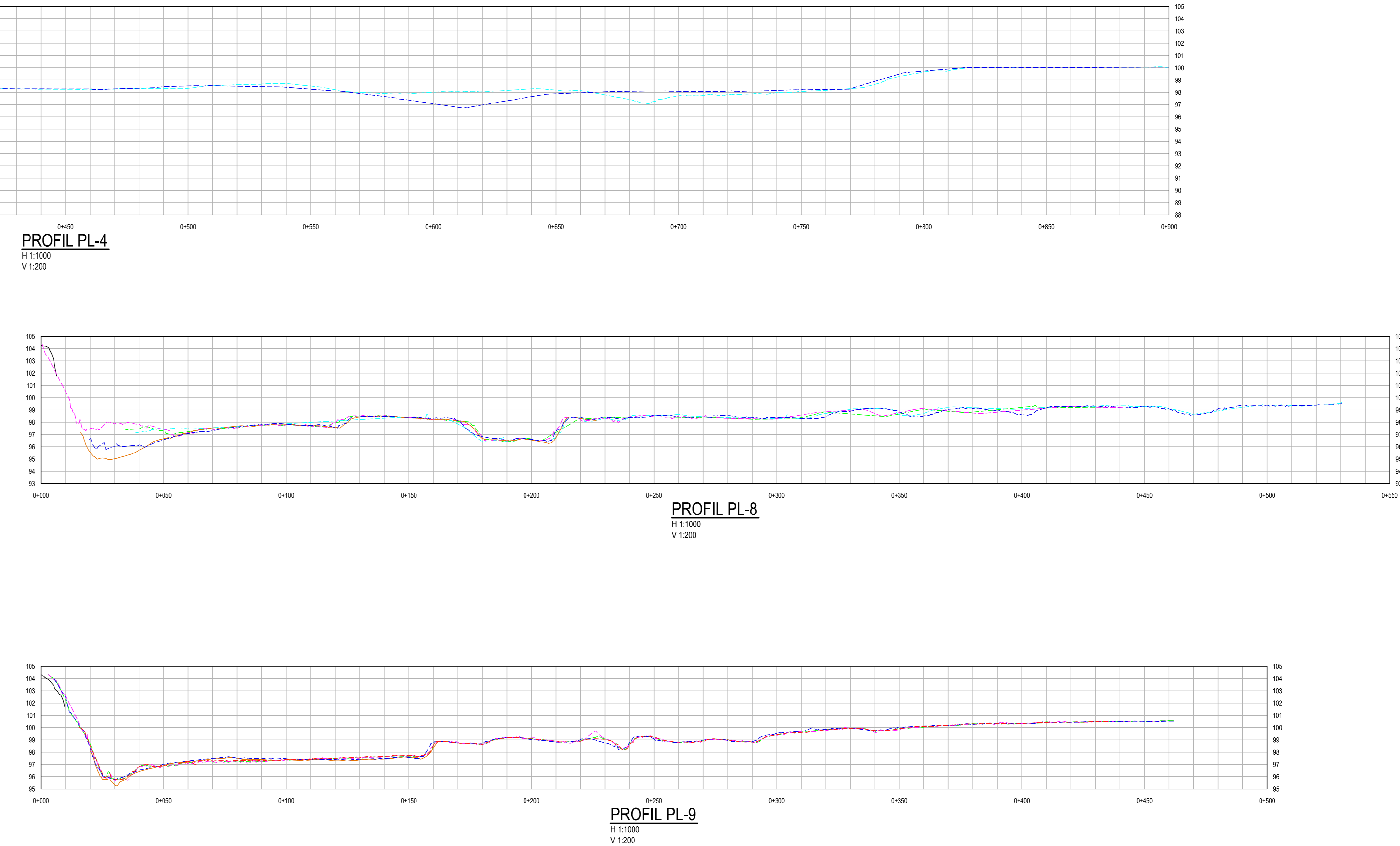
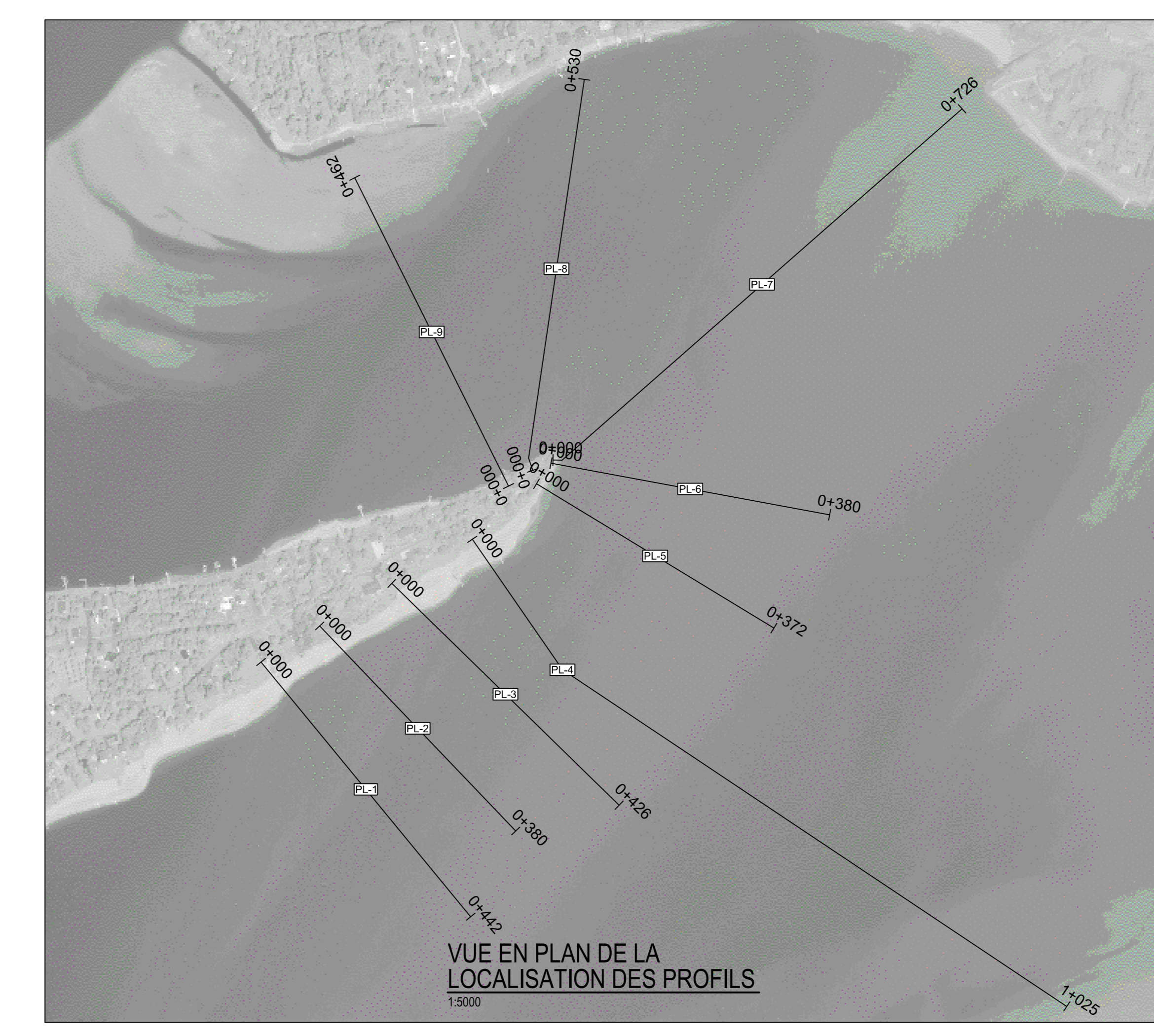
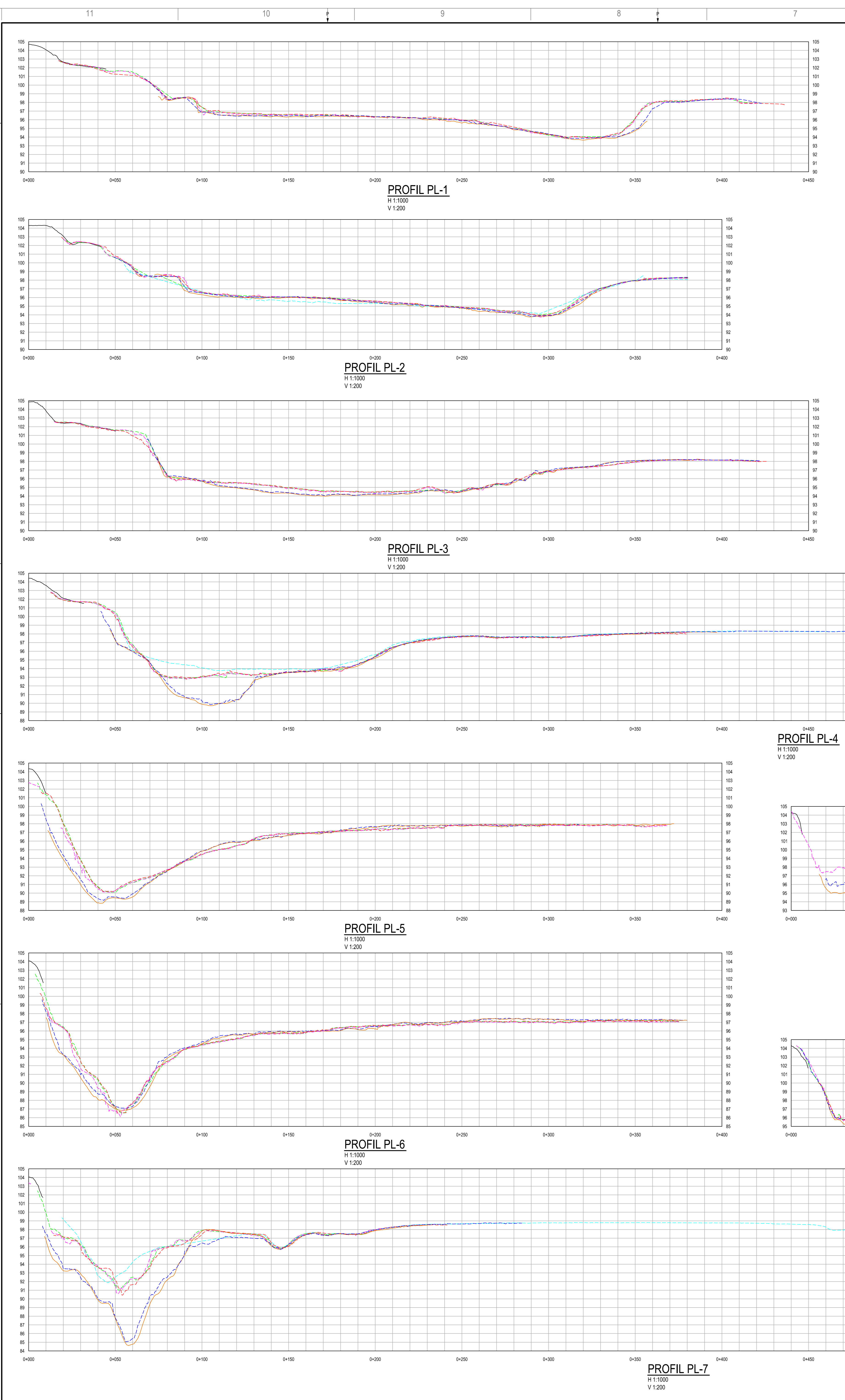
FEUILLET: 1 DE 1

ÉMISSION: **POUR INFORMATION** # REV: **0**

EN DATE DU: 2018-03-15

ANNEXE

B ÉVOLUTION DE LA BATHYMÉTRIE ENTRE 2014 ET 2017 AUTOUR DE LA POINTE À LANGEVIN



LEGENDE

- LIDAR TERRESTRE 2014
- BATHYMETRIE 2014
- BATHYMETRIE JUIN 2016
- BATHYMETRIE SEPTEMBRE 2016
- BATHYMETRIE NOVEMBRE 2016
- BATHYMETRIE JUIN 2017
- BATHYMETRIE SEPTEMBRE 2017

N.B. LES PROFILS ONT ÉTÉ RÉALISÉS PAR NORDA STELO, À L'EXCEPTION DE LA BATHYMETRIE DE SEPTEMBRE 2017, QUI A ÉTÉ AJOUTÉE PAR WSP.

wsp
1136 BOULEVARD LESBURQUELLE
QUÉBEC (QUÉBEC) CANADA G2K 0M5
TEL. : 418 823-2294 | TÉLÉC. : 418 651-1817 | WWW.WSPGROUP.COM

Rio Tinto Alcan

**EXPERTISE ÉROSION
POINTE À LANGEVIN**

PLAN GLE :

1	2016-03-15	POUR INFORMATION
A	2017-11-08	POUR INFORMATION, À CETTE ÉMISSION CE PLAN PORTAIT LE NUMÉRO 171-12050-H-002

NO PROJET : 171-12050-00 **DATE :** 2017-11-08

ÉCHELLE ORIGINALE : — **ÉCHELLE BARRE :** NE MESURE PAS 25 mm, À L'EXCEPTION DE LA BATHYMETRIE DE SEPTEMBRE 2017, QUI A ÉTÉ AJOUTÉE PAR WSP.

INDIQUÉE : —

CONÇU PAR : —

DESIGNÉ PAR : K. LAROCHE, TECH.

VÉRIFIÉ PAR : E. GROUX, ING.

DISCIPLINE : HYDRAULIQUE

TITRE : LEVÉS BATHYMETRIQUES
VUE EN PLAN ET PROFILS
ÉLÉVATIONS GÉODÉSIQUES

NUMÉRO DU FEUILLET : 171-12050-00-H-003


FEUILLET : 1 DE 1 **# REV :** —

POUR INFORMATION **1**

EN DATE DU 2018-05-15

ANNEXE

C ÉLABORATION DES MODÈLES NUMÉRIQUES ET ÉTALONNAGE



ANNEXE

D RAPPORT DES SONDAGES GÉOTECHNIQUES



RIO TINTO

ÉTUDE GÉOTECHNIQUE

STABILISATION D'UN TALUS

POINTE À LANGEVIN, DOLBEAU-MISTASSINI, QUÉBEC

RÉF. WSP : 171-12050-00

DATE : 1ER FÉVRIER 2018

CONFIDENTIEL





RIO TINTO

ÉTUDE GEOTECHNIQUE

STABILISATION D'UN TALUS

POINTE À LANGEVIN, DOLBEAU-MISTASSINI,
QUÉBEC

CONFIDENTIEL

RÉF. WSP : 171-12050-00
DATE : 1ER FÉVRIER 2018

RAPPORT FINAL

WSP CANADA INC.
16E ÉTAGE
1600, BOUL RENÉ-LÉVESQUE OUEST
MONTRÉAL QC H3H 1P9
CANADA

TÉL. : +1-514-340-0046
TÉLÉC. : +1-514-340-1337

WSP.COM

GESTION DE LA QUALITÉ

VERSION	DATE	DESCRIPTION
0	2018-01-29	Version finale
1	2018-02-01	Révision 1

SIGNATURES

PRÉPARÉ PAR



Kristina Bondy, ing., M.ing. (OIQ #146117)
Chargée de projets - Géotechnique

RÉVISÉ PAR

Luc Paquette, ing. (OIQ #110523)
Chef d'équipe - Géotechnique

Le présent rapport a été préparé par WSP pour le compte de Rio Tinto conformément à l'entente de services professionnels. La divulgation de tout renseignement faisant partie du présent rapport incombe uniquement au destinataire prévu. Son contenu reflète le meilleur jugement de WSP à la lumière des informations disponibles au moment de la préparation du rapport. Toute utilisation que pourrait en faire une tierce partie ou toute référence ou toutes décisions en découlant sont l'entière responsabilité de ladite tierce partie. WSP n'accepte aucune responsabilité quant aux dommages, s'il en était, que pourrait subir une tierce partie à la suite d'une décision ou d'un geste basé sur le présent rapport. Cet énoncé de limitation fait partie du présent rapport.

L'original du document technologique que nous vous transmettons a été authentifié et sera conservé par WSP pour une période minimale de dix ans. Étant donné que le fichier transmis n'est plus sous le contrôle de WSP et que son intégrité n'est pas assurée, aucune garantie n'est donnée sur les modifications ultérieures qui peuvent y être apportées.

Référence à citer :

WSP. 2018. *Étude géotechnique, Stabilisation d'un talus, Pointe à Langevin, Dolbeau-Mistassini, Québec*. Rapport produit pour Rio Tinto. RÉf. WSP : 171-12050-00. 13 pages et annexes.

ÉQUIPE DE RÉALISATION

RIO TINTO

Chargée de projets Caroline Jolette, ing.

Technicien Nicolas Thibeault

WSP CANADA INC. (WSP)

Chef d'équipe – Géotechnique Luc Paquette, ing.

Chargée de projets - Géotechnique Kristina Bondy, ing., M.ing.

Assistante de projets et technicienne de chantier Marie-Hélène Rathé, ing. jr, M.ing.

Cartographie et géomatique Pierre Cordeau, B.Sc.

SOUS-TRAITANTS

Compagnie de forage Forage SL inc.

Arpenteur Girard Tremblay Gilbert inc.

ÉNONCÉ DE RESPONSABILITÉ

Ce rapport a été préparé par WSP Canada Inc. (WSP) uniquement pour Rio Tinto, tous les autres intervenants sont des tierces parties.

Ni WSP ni Rio Tinto ne déclarent, ne certifient ou ne garantissent à une tierce partie, que ce soit expressément ou implicitement :

- l'exactitude, l'intégralité ou encore l'utilité;
- les droits de propriété intellectuelle, ou autres droits de propriété, de toute personne ou de toute partie;
- la qualité marchande, l'adaptation à un usage particulier;
- tout renseignement, produit ou procédé divulgué, décrit ou recommandé dans ce rapport.

WSP et Rio Tinto déclinent toute responsabilité de quelque nature résultant de quelque façon de l'utilisation faite par une tierce partie de tout renseignement, produit ou procédé divulgué, décrit ou recommandé dans ce rapport. WSP et Rio Tinto déclinent toute responsabilité résultant de la confiance que toute tierce partie accorde à tout renseignement, énoncé ou recommandation contenu dans ce rapport. Si une tierce partie utilisait tout renseignement, produit ou procédé divulgué, décrit ou recommandé dans ce rapport, ou encore se fondait sur ceux-ci, elle le ferait à ses risques et périls.

TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION.....	1
1.1	Mise en contexte	1
1.2	Objectifs de l'étude	1
1.3	Contenu du rapport.....	1
2	DESCRIPTION DU SITE.....	3
3	MÉTHODES DE RECONNAISSANCE	5
3.1	Localisation des infrastructures souterraines	5
3.2	Travaux de sondages.....	5
3.2.1	Forages stratigraphiques	5
3.2.2	Installation des tubes ouverts	6
3.3	Procédures d'échantillonnage	6
3.3.1	Sols et remblais.....	6
3.4	Localisation et nivellement	6
3.5	Programme de laboratoire.....	7
4	DESCRIPTION DES SOLS.....	9
4.1	Terre végétale	9
4.2	Remblai.....	9
4.3	Dépôt naturel	9
5	EAU SOUTERRAINE.....	13

TABLEAUX

TABLEAU 3-1	COORDONNEES, ELEVATIONS ET PROFONDEURS DES FORAGES.....	7
TABLEAU 3-2	PROGRAMME DE LABORATOIRE GÉOTECHNIQUE.....	7
TABLEAU 4-1	RÉSUMÉ STRATIGRAPHIQUE DES FORAGES – PROFONDEUR (ÉLÉVATION) EN MÈTRE	9
TABLEAU 4-2	RÉSULTATS DES ANALYSES GRANULOMÉTRIQUES, DE SÉDIMENTOMÉTRIE ET DE TENEUR EN EAU SUR LE DÉPÔT NATUREL	10

TABLEAU 4-3	RÉSULTATS DES LIMITES DE CONSISTANCE ET DE TENEUR EN EAU SUR LE DÉPÔT NATUREL.....	10
TABLEAU 5-1	RELEVÉ DE L'EAU SOUTERRAINE DANS LE FORAGE 17F02	13

FIGURES

FIGURE 2-1	TRAVAUX DE FORAGES	3
------------	--------------------------	---

ANNEXES

A	LIMITATIONS ET CONDITIONS GÉNÉRALES DE L'ÉTUDE
B	PLAN DE LOCALISATION
C	RAPPORT DE FORAGES
D	RÉSULTATS DES ESSAIS EN LABORATOIRE GÉOTECHNIQUE

1 INTRODUCTION

1.1 MISE EN CONTEXTE

Les services professionnels de WSP Canada Inc. (« WSP ») ont été retenus par Rio Tinto, représentée par Madame Caroline Jollette, chargée de projets de la firme, pour réaliser une étude géotechnique factuelle des sols dans le cadre du programme de stabilisation des berges du lac Saint-Jean. Le site à l'étude est localisé à la Pointe Langevin, Dolbeau-Mistassini, Québec.

L'étude géotechnique a été réalisée selon les termes généraux du contrat octroyé à WSP par Rio Tinto, relativement à l'offre de services professionnels émise le 3 octobre 2017.

Ce rapport présente les travaux réalisés ainsi que les résultats de l'étude géotechnique permettant d'identifier la nature et les propriétés des sols en place, ainsi que le niveau de l'eau souterraine.

1.2 OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

Les objectifs de l'étude géotechnique consistaient à préciser la nature et les propriétés des sols ainsi que le niveau de l'eau souterraine prévalant sur le site afin d'émettre un rapport factuel concernant les conditions rencontrées sur le site. Les résultats de l'étude serviront pour la conception de la stabilisation des berges du lac Saint-Jean.

1.3 CONTENU DU RAPPORT

Afin de répondre aux différents objectifs de l'étude et, tel que mentionnés dans notre offre de services professionnels, les travaux réalisés dans le cadre du présent mandat ont été les suivants :

- La réalisation de deux (2) forages stratigraphiques pour fins géotechniques;
- L'installation d'un (1) tube ouvert pour la mesure du niveau de l'eau souterraine;
- La réalisation en laboratoire, d'analyses granulométriques, et par sédimentométrie, des teneurs en eau et des limites de consistance des échantillons de sol;
- L'arpentage du sondage réalisé sur le site à l'étude.

Ce rapport présente, dans l'ordre, une brève description du site et du projet, la méthode de reconnaissance et d'échantillonnage utilisée, la nature et les propriétés physiques et mécaniques des sols en place, les résultats d'essais géotechniques ainsi que les conditions de la nappe d'eau souterraine.

Le rapport inclut également quatre (4) annexes qui présentent :

- les limitations du présent rapport (annexe A);
- un plan de localisation des forages (annexe B);
- les rapports individuels des forages (annexe C);
- les résultats des essais géotechniques en laboratoire (annexe D).

Ce rapport est assujéti à certaines conditions limitatives qui découlent de la problématique inhérente aux phénomènes de contamination environnementale ainsi que celles liées aux profils géologique, géotechnique et hydrogéologique de tout site faisant l'objet d'investigation par sondage. Il est important de faire ressortir que ces conditions et limitations font partie intégrante du présent rapport et permettent une meilleure compréhension de celui-ci. Ces dernières sont présentées à la fin du texte technique.

2 DESCRIPTION DU SITE

Le site à l'étude est situé à la Pointe Langevin, Dolbeau-Mistassini, Québec. Plus spécifiquement, le forage 17F01 est localisé au numéro civique 244 rue de la Pointe et le forage 17F02 au numéro civique 236 rue de la Pointe, à la Pointe Langevin, Dolbeau-Mistassini, Qc. Les terrains sont des propriétés résidentielles et se situent en bordure du lac Saint-Jean à l'embranchement de la rivière Péribonka. Présentement, des maisons et roulottes occupent une partie du terrain.

Selon les élévations de surface du sol prises à l'emplacement du forage et selon les observations prises lors des travaux d'investigation, le terrain est relativement plat. Il est à noter qu'à l'emplacement du forage 17F02, le terrain est en pente et forme une plage sur le bord du lac Saint-Jean. De plus, au site du forage 17F01, une érosion prononcée des berges a été observée par l'effondrement d'un quai et d'arbres.

La figure 2-1 illustre les travaux réalisés au forage 17F01 sur le site.



Figure 2-1 Travaux de forages

Selon les informations fournies par le client, le projet consiste à stabiliser les berges dans la zone des forages réalisés.

Les principales caractéristiques du site sont illustrées sur le plan de localisation de forages joint à l'annexe B.

3 MÉTHODES DE RECONNAISSANCE

Cette section décrit les différentes activités réalisées dans le cadre de ce mandat, de même que les méthodologies appliquées. L'emplacement de chacun des forages a été déterminé par WSP en consultation avec le client.

Les travaux de terrain, réalisés entre le 6 et 8 décembre 2017, comprenaient :

- la localisation des infrastructures souterraines auprès des entreprises membres du service Info-Excavation;
- la réalisation de deux (2) forages stratigraphiques;
- l'installation d'un (1) tube ouvert dans un forage;
- la sélection et l'analyse d'échantillons de sol prélevés lors de la réalisation des sondages;
- la localisation des forages par arpentage.

Les méthodologies appliquées dans le cadre des travaux de terrain sont décrites aux sections 3.1 à 3.4, tandis que les travaux de laboratoire sont présentés à la section 3.5.

3.1 LOCALISATION DES INFRASTRUCTURES SOUTERRAINES

Préalablement à la réalisation des travaux, une demande de repérage des infrastructures souterraines présentes sous la surface du site à l'étude a été faite auprès des entreprises membres du service Info-Excavation. L'entreprise suivante a été contactée par ce service : Bell.

3.2 TRAVAUX DE SONDAGES

Les travaux de sondages ont été réalisés entre le 6 et 8 décembre 2017. Le prélèvement des échantillons de sol ainsi que la supervision des travaux ont été effectués par un membre du personnel technique de WSP.

3.2.1 FORAGES STRATIGRAPHIQUES

Deux (2) forages, identifiés 17F01 et 17F02, ont été effectués sur le site pour répondre aux différents objectifs de l'étude. Les forages ont atteint une profondeur de 25.00 m (élévation de 79,41 m et 79,33). La localisation des forages stratigraphiques est illustrée sur le plan de localisation à l'annexe B.

Le forage stratigraphique a été réalisé à l'aide d'une foreuse conventionnelle de marque CME-75 montée sur une chenille opérée par un foreur et un aide-foreur de la compagnie Forage SL, agissant à titre de sous-traitant de WSP.

Les forages ont été réalisés au tubage diamanté de calibre NW. Lors de l'exécution de ces forages, des échantillons remaniés de sol ont été récupérés en intervalle régulier dans la partie supérieure et en continu dans la portion inférieure du forage, en utilisant une cuillère fendue (CF) de calibre « N » (diamètre de 63 mm) ou de calibre « B » (diamètre de 51 mm). Lors des prélèvements, les indices « N » de l'essai de pénétration standard ont été mesurés pour chaque enfoncement de la cuillère fendue conformément à la norme ASTM D1586. Cet indice correspond au nombre de coups requis pour faire pénétrer le carottier standard de calibre « B » de 300 mm lorsqu'il est battu à l'aide d'un marteau pesant 63,5 kg et tombant en chute libre d'une hauteur de 760 mm.

Cet essai renseigne notamment sur la compacité des sols pulvérulents. Il est à mentionner que les valeurs des indices « N » mesurés avec la cuillère fendue de calibre « N » ont été corrigées en fonction du calibre de la cuillère.

Une description stratigraphique complète des échantillons, comprenant la nature et la composition des différentes formations interceptées, la nature des débris, lorsque présents, ainsi que toute autre information pertinente, a été réalisée sur le site pour chacun des forages. Les données recueillies sur le terrain ont été compilées dans les rapports de forages regroupés à l'annexe C. Des notes explicatives relatives aux rapports de forages, à la description des unités stratigraphiques et à la méthodologie des essais *in situ* sont également présentées à l'annexe C de ce rapport.

Tous les échantillons géotechniques prélevés sur le site ont été apportés à notre laboratoire afin d'être soumis à un examen visuel plus approfondi ainsi qu'à la réalisation d'essais en laboratoire afin de préciser les propriétés des sols en place.

3.2.2 INSTALLATION DES TUBES OUVERTS

À la suite de l'échantillonnage des sols, un tube ouvert composé d'un tuyau en PVC a été installé à une profondeur de 17 m dans le trou du forage 17F02 afin de permettre la lecture du niveau de l'eau souterraine. L'espace annulaire autour du tuyau a été comblé avec un sable calibré et le tube ouvert a été isolé de la surface au moyen d'un bouchon étanche. Le détail de l'aménagement est illustré sur les rapports de forages inclus à l'annexe C.

3.3 PROCÉDURES D'ÉCHANTILLONNAGE

3.3.1 SOLS ET REMBLAIS

Au cours des forages, les échantillons de sol ont été prélevés en continu à l'aide de cuillères fendues d'une longueur de 0,61 m. Les échantillons géotechniques ont été mis dans des sacs de plastique scellés à des fins d'analyses en laboratoire. Ces échantillons seront conservés pour une période de six (6) mois à partir de la date d'émission du rapport final, après quoi nous en disposerons, sauf avis contraire de la part du client.

3.4 LOCALISATION ET NIVELLEMENT

Les coordonnées, l'élévation et les profondeurs atteintes dans les forages sont indiquées dans le tableau 3-1. L'élévation et les coordonnées des sondages ont été relevées par un arpenteur de la firme Girard Tremblay Gilbert inc., à l'aide d'un appareil de positionnement satellitaire (GPS) et de précision millimétrique, selon le système de coordonnées MTM NAD83 – fuseau 8 lors des travaux d'arpentage effectués le 8 novembre 2017.

Tableau 3-1 **Coordonnées, élévations et profondeurs des forages**

Sondage	Nord (m)	Est (m)	Élévation géodésique (m)	Profondeur atteinte* (m)
17F01	5 403 228,79	408 832,99	104,41	25,00
17F02	5 403 106,82	408 712,50	104,33	25,00

* profondeur par rapport à la surface du sol

3.5 PROGRAMME DE LABORATOIRE

L'ensemble des échantillons a été soumis à une inspection visuelle par le personnel technique de WSP et transmis au laboratoire interne de WSP situé à Lachine, Québec. Des échantillons ont été sélectionnés et soumis à des analyses pour déterminer certaines propriétés physiques. Le tableau 3-2 indique le nombre d'échantillons sélectionnés en fonction de l'analyse effectuée. Les résultats de laboratoire sont disponibles à l'annexe D.

Tableau 3-2 **Programme de laboratoire géotechnique**

Essais (Norme)	Quantité
Analyse granulométrique par tamisage et lavage au tamis 80 µm (<i>BNQ 2501-025 et LC21-040</i>)	10
Analyse granulométrique par sédimentométrie (<i>BNQ 2501-025</i>)	4
Teneur en eau (<i>BNQ 2501-170</i>)	10
Limite de consistance (<i>BNQ 2501-092</i>)	4

4 DESCRIPTION DES SOLS

Les forages 17F01 et 17F02 ont permis de déterminer la stratigraphie des sols en place. L'ensemble des unités stratigraphiques est décrit dans la section suivante. Un résumé de la stratigraphie est présenté dans le tableau 4-1. La description détaillée des sols observés est indiquée sur les rapports de forages présentés à l'annexe C.

Tableau 4-1 Résumé stratigraphique des forages – Profondeur (élévation) en mètre

Forage	Épaisseur terre végétale (mm)	Remblai	Dépôt naturel	Fin du forage
17F01 (104,41)	180	0,18 – 1,22 (104,23 – 103,19)	1,22 (103,19)	25,00 (79,41)
17F02 (104,33)	140	0,18 – 3,05 (104,19 – 101,28)	3,05 (101,28)	25,00 (79,33)

4.1 TERRE VÉGÉTALE

Une couche de terre végétale sableuse a été observée en surface des forages 17F01 et 17F02 sur une épaisseur de 180 mm et 140 mm respectivement. La terre végétale varie de brune à brune foncée et était dans un état sec et très lâche.

4.2 REMBLAI

Une couche de remblai granulaire probable a été rencontrée sous la terre végétale dans les forages 17F01 et 17F02 jusqu'à une profondeur de 1,22 m et 3,05 m (élévation de 103,19 m et 101,28 m) respectivement. Le remblai, de couleur brun, est composé d'un sable avec des traces à un peu de silt. Des traces de gravier ont été notées dans le forage 17F02. La présence de racines a été observée au droit du forage 17F01. Selon les échantillons récupérés, le remblai était dans un état humide. Les valeurs de l'indice « N » de l'essai de pénétration standard varient entre 2 et 8 coups, ce qui indique que la compacité du remblai est très lâche à lâche.

4.3 DÉPÔT NATUREL

Directement sous le remblai, dans les forages 17F01 et 17F02, le dépôt naturel a été rencontré à partir d'une profondeur de 1,22 m et 3,05 m (élévation de 103,19 m et 101,28 m) respectivement.

Le dépôt naturel se compose d'une alternance entre un sable avec des proportions de silt variables et un silt avec des proportions variables en sable. Initialement, dans les deux forages, sous le remblai probable, le dépôt naturel consiste à un sable avec des traces à un peu de silt. Cette couche est d'une couleur brune et devient grise à partir d'une profondeur de 3,05 m (élévation de 101,36 m) dans le forage 17F01 et 4,57 m (élévation de 99,76 m) dans le forage 17F02. À ces mêmes profondeurs, le dépôt devient saturé. La couche de sable est d'une compacité très lâche à compact, les valeurs de l'indice de pénétration « N » varient entre 2 et 20. Au droit du forage 17F01, la couche de sable est observée jusqu'à une profondeur de 17,68 m (élévation de 86,73 m). Au droit du forage 17F02, cette couche est observée jusqu'à une profondeur de 10,97 m (élévation de 93,36).

À partir d'une profondeur de 17,68 m (élévation de 86,73 m) jusqu'au fin du forage 17F01, le dépôt naturel se compose d'un silt sableux lâche à compact avec des traces d'argile. Entre une profondeur de 20,84 m (élévation de 83,57 m) et 23,17 m (élévation de 81,24 m), une couche de sable silteux compact a été observée au sein du dépôt de silt sableux.

Au droit du forage 17F02, le dépôt naturel est plus stratifié. À partir d'une profondeur de 10,97 m (élévation de 93,36 m) le dépôt consiste principalement en un silt avec des quantités variables de sable et argile. Une couche de sable avec un peu de silt est notée entre une profondeur de 12,8 m (élévation de 91,53 m) et 20,12 m (élévation de 84,21 m).

Les tableaux 4-2 et 4-3 résument les résultats des essais en laboratoire réalisés sur le dépôt naturel. Les résultats détaillés des analyses sont présentés à l'annexe D.

Tableau 4-2 Résultats des analyses granulométriques, de sédimentométrie et de teneur en eau sur le dépôt naturel

Forage	Échantillon	Profondeur (m)	Teneur en eau w (%)	Gravier > 5 mm (%)	Sable < 5 mm et > 80 µm (%)	Silt < 80 µm et > 2 µm (%)	Argile > 2 µm (%)	Classification unifiée (ASTM D-2487)
17F01	CF-7	4,57 – 5,18	24,6	0	84	16		SM
	CF-16	12,81 – 13,42	27,0	0	94	6		SP-SM
	CF-27	19,52 – 20,13	26,0	0	24	73	3	-
	CF-30	21,35 – 21,96	24,4	0	80	20		SM
	CF-34	23,79 – 24,40	26,1	0	23	76	1	-
17F02	CF-4	1,82 – 2,44	9,2	0	98	2		SP
	CF-8	6,10 – 6,71	21,6	0	96	4		SP
	CF-13	10,97 – 11,58	-	0	9	91		-
	CF-21	15,24 – 15,85	22,4	0	87	13		SM
	CF-30	20,73 – 21,34	28,4	0	3	92	5	-
	CF-35	23,78 – 24,39	25,3	0	0	85	15	-

Tableau 4-3 Résultats des limites de consistance et de teneur en eau sur le dépôt naturel

Forage	Échantillon	Profondeur (m)	Limites d'Atterberg			Teneur en eau W _N (%)	Class. unifiée (ASTM D-2487)
			Limite de liquidité W _L (%)	Limite de plasticité W _P (%)	Indice de plasticité I _P (%)		
17F01	CF-27	19,52 – 20,13	20,5	21,0	-	26,0	ML
	CF-34	23,79 – 24,40	18,8	18,0	0,8	26,1	ML
17F02	CF-30	20,73 – 21,34	24,1	22,5	1,6	28,4	ML
	CF-35	23,78 – 24,39	27,2	23,0	4,2	25,3	ML

Les résultats obtenus indiquent que les sols à prédominance sableuse se classifient de façon générale SM à SP, alors que les sols à prédominance silteuse, se classifient de type ML, selon la classification USCS.

Les forages 17F01 et 17F02 ont été terminés au sein du dépôt naturel à une profondeur de 25,00 m (élevations de 79,41 m et 79,33 m respectivement).

5 EAU SOUTERRAINE

Un (1) tube ouvert a été installé au droit du forage 17F02. Le relevé du niveau de l'eau a été effectué le 22 janvier 2018, soit plus d'un (1) mois après l'installation du tube ouvert. Le tableau 5-1 indique la profondeur de l'eau souterraine.

Tableau 5-1 Relevé de l'eau souterraine dans le forage 17F02

Forage	Élévation de la surface du terrain (m)	Élévation de l'eau souterraine (m)	Profondeur du niveau d'eau mesuré par rapport à la surface (m)
17F01	104,33	99,76	4,57

Il convient de mentionner que ce relevé n'est représentatif que pour la période où il a été effectué. En effet, la nappe d'eau souterraine peut fluctuer selon les saisons, en étant habituellement basse durant l'hiver et l'été, et haute au printemps ainsi qu'à l'automne.

Selon la station hydrométrique 062914 située à Roberval, le niveau d'eau du lac Saint-Jean le 23 janvier 2018 est situé à une élévation de 99.61 m.

ANNEXES

A

LIMITATIONS ET
CONDITIONS
GÉNÉRALES DE
L'ÉTUDE

LIMITES ET CONDITIONS GÉNÉRALES

ÉTUDE GÉOTECHNIQUE

Utilisation du rapport

Les données factuelles, les interprétations et les recommandations contenues dans ce rapport se rapportent à un projet spécifique tel que décrit dans ledit rapport et ne s'appliquent à aucun autre projet ni à aucun autre site. Si le projet est modifié du point de vue de la conception, de l'emplacement ou de l'élévation ou encore, si le projet n'est pas amorcé dans un délai raisonnable, WSP devra être consultée de façon à réviser la validité des recommandations données dans le présent rapport.

Les recommandations données dans ce rapport ne servent qu'à guider l'ingénieur concepteur. Les entrepreneurs soumissionnaires ou exécutant les travaux devront compter sur leurs propres interprétations des résultats factuels des sondages pour déterminer de quelle manière les conditions géotechniques, hydrogéologiques et géologiques peuvent affecter leurs travaux.

Pour conserver l'intégrité de ce rapport et permettre son interprétation avec pertinence, aucune donnée, valeur ou résultat ne peut en être partiellement retiré. Le présent rapport ne doit être utilisé qu'aux fins pour lesquelles il a été préparé.

Suivi de l'étude et des travaux

Certains ou tous les détails de conception et de construction peuvent ne pas être connus au moment de la parution du rapport de WSP.

Il est recommandé que les services d'un professionnel soient retenus pendant la construction, d'abord pour vérifier et confirmer que les conditions géotechniques, hydrogéologiques et géologiques présentes sur l'ensemble du chantier ne diffèrent pas de celles indiquées dans le rapport de WSP. Ensuite, il est essentiel de certifier que les travaux de construction n'ont pas d'effets défavorables sur les recommandations du rapport.

Conditions des sols et du roc

Les descriptions des sols et du roc inscrites dans ce rapport proviennent de méthodes de classification et d'identification communément acceptées et utilisées en pratique géotechnique, qui ne garantissent pas que les descriptions soient exactes.

Cependant, WSP applique une description convenant à la nomenclature communément utilisée en pratique géotechnique.

Les conditions des sols et du roc décrites dans ce rapport sont celles observées au moment de l'étude. À moins d'indication contraire, ces conditions représentent les fondements qui ont amené à établir les recommandations du rapport. Les conditions des sols et du roc peuvent cependant être sensiblement modifiées par les travaux de construction (circulation d'équipements, excavation, fonçage de pieux, dynamitage, etc.) sur le site ou sur les sites voisins. Une excavation peut exposer les sols à des changements de propriétés provoqués par l'humidité, le séchage ou le gel. Sauf indication contraire, les sols et le roc doivent être protégés contre l'effet dommageable de ces changements ou du remaniement pendant la construction.

Rapports de forage et interprétation des conditions observées

Les dépôts meubles et le massif rocheux sont de nature et de propriété variables sur une plus ou moins grande superficie et aussi en profondeur. Les rapports de forage ne fournissent que des conditions approximatives et ponctuelles de ces formations géologiques à l'emplacement des forages et des sondages. Les contacts entre les différentes couches indiquées sur les rapports peuvent être difficiles à distinguer. En effet, la nature des sols peut changer progressivement avec la profondeur, de sorte que le contact entre deux couches peut être imprécis et correspondre plutôt à une zone de transition. La précision

de la stratigraphie rencontrée dépend de la méthode de forage, de la fréquence et de la méthode d'échantillonnage puis de l'homogénéité des sols rencontrés. L'espacement entre les forages, la fréquence d'échantillonnage et le type de forage dépendent des considérations budgétaires et des délais d'exécution, tous deux établis avant le début des travaux.

Les conditions géotechniques, hydrogéologiques et géologiques entre les emplacements des forages font l'objet d'une interprétation par interpolation ou encore, elles dépendent du jugement de l'ingénieur géotechnicien. En réalité, la stratigraphie peut varier sensiblement, de sorte que l'interprétation des résultats de l'étude doit être faite avec précaution par le lecteur du rapport.

Les niveaux de l'eau souterraine indiqués dans ce rapport sont uniquement ceux observés à l'endroit et à la date des relevés, tels que présentés dans le rapport. Ces conditions peuvent varier selon les saisons ou à la suite de travaux de construction sur le site ou sur les sites voisins.

Changement des conditions observées

Lorsque les conditions géotechniques, hydrogéologiques ou géologiques rencontrées sur le site diffèrent de celles indiquées au rapport, soit à cause de la nature hétérogène des sols et du roc ou encore, parce que des changements sont survenus à la suite de travaux de construction (ou pour toute autre raison), le client doit, comme condition d'utilisation du rapport, prévenir WSP du changement des conditions et fournir à WSP l'opportunité de réviser les recommandations émises dans ce rapport. Reconnaître un changement des conditions des sols et du roc requiert une certaine expérience; il est donc recommandé qu'un ingénieur géotechnicien expérimenté soit dépêché sur le site pour prendre position sur les changements des conditions rencontrées.

Drainage

Le drainage de l'eau souterraine est souvent requis aussi bien pour des ouvrages temporaires que pour des ouvrages permanents. La conception ou l'exécution impropre d'un système de drainage peut entraîner de sérieuses conséquences. WSP ne peut en aucun cas endosser la responsabilité des dommages causés par un système inadéquat de drainage, à moins que WSP n'ait été spécifiquement impliquée à la fois dans la conception détaillée et le suivi continu au chantier, lors de la construction du système de drainage.

Environnement

De façon générale, la caractérisation environnementale ne prétend pas couvrir de façon exhaustive l'ensemble des enjeux environnementaux potentiels du site à l'étude, ni de ponctuels sites de contamination. Ainsi, le contenu de ce rapport ne doit en aucun temps, être considéré comme un jugement définitif ou final de la contamination et de tout autre aspect environnemental rattaché au terrain à l'étude.

Les constatations insérées dans ce rapport sont strictement issues des renseignements et des résultats obtenus au cours des travaux de caractérisation des sols effectués par WSP, et autres documents remis par le Client en début de mandat.

Les résultats analytiques obtenus sont jugés représentatifs de la qualité environnementale des sols et prélevés aux endroits ayant fait l'objet d'une investigation et ce, pour les paramètres sélectionnés, tels que définis au mandat et selon l'entente entre WSP et le Client. Ces résultats ne constituent pas une indication quant à une contamination liée à d'autres sources ni une garantie pour les endroits n'ayant pas fait l'objet de travaux de caractérisation. Toute extrapolation à partir de ces résultats, notamment en ce qui concerne la géométrie, les volumes ou l'étendue de sols ou d'eau souterraine affectés, est formulée sur une base interprétative et doit être considérée sous toute réserve.

Les conclusions et recommandations formulées à l'intérieur de ce rapport représentent notre opinion professionnelle, au meilleur de notre connaissance au moment de la préparation de ce rapport et sont fondées sur les documents, études, renseignements et résultats présentés ici, en tenant compte des limitations applicables.

En aucun temps WSP ne pourra être tenue responsable de dommages résultant de conditions souterraines imprévisibles ou d'informations erronées provenant d'une autre source.

Toute opinion concernant l'application ou la conformité aux lois et règlements apparaissant dans ce rapport est exprimée sous toute réserve et ne doit, en aucun temps, être considérée comme un avis juridique ou se substituer à un tel avis.



B

**PLAN DE
LOCALISATION**





408 600

408 800

Rivière Péribonka

17F01
(104,41 m)

17F02
(104,33 m)

Rue de la Pointe

5 403 200

5 403 200



5 403 000

5 403 000

408 600

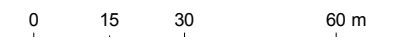
408 800

Fichier : 17_1_12050_00_EGAB_LocalForages_171120.mxd

-  Forage (WSP, 2017)
-  Repère géodésique

Coordonnées des forages

Sondages	Coordonnées X MTM 8 NAD83	Coordonnées Y MTM 8 NAD83
17F01	408 832,99	5 403 228,79
17F02	408 712,50	5 403 106,82



1 : 1 500

Projection : NAD83, MTM fuseau 8

Sources :

Image satellite : DigitalGlobe (2017-09-06),
tirée de Google Earth Pro
Cartes : - MERN, AQRéseau+, réseau routier
- RNCan, BNDT 250K, feuillets 22D et 32A
Limites de municipalités : SDA20K, 2010-01



ÉTUDE GÉOTECHNIQUE POUR LA STABILISATION D'UN TALUS

238 et 244, rue de la Pointe, Dolbeau-Mistassini, Qc

Annexe B

Plan de localisation des forages



Préparée par : K. Bondy
Dessinée par : P. Cordeau
Vérifiée par : L. Paquette

171-12050-00

20 novembre 2017

A large, bold, red capital letter 'C' is positioned on the left side of the page. It is the first letter of the title 'C RAPPORT DE FORAGES'.

RAPPORT DE FORAGES





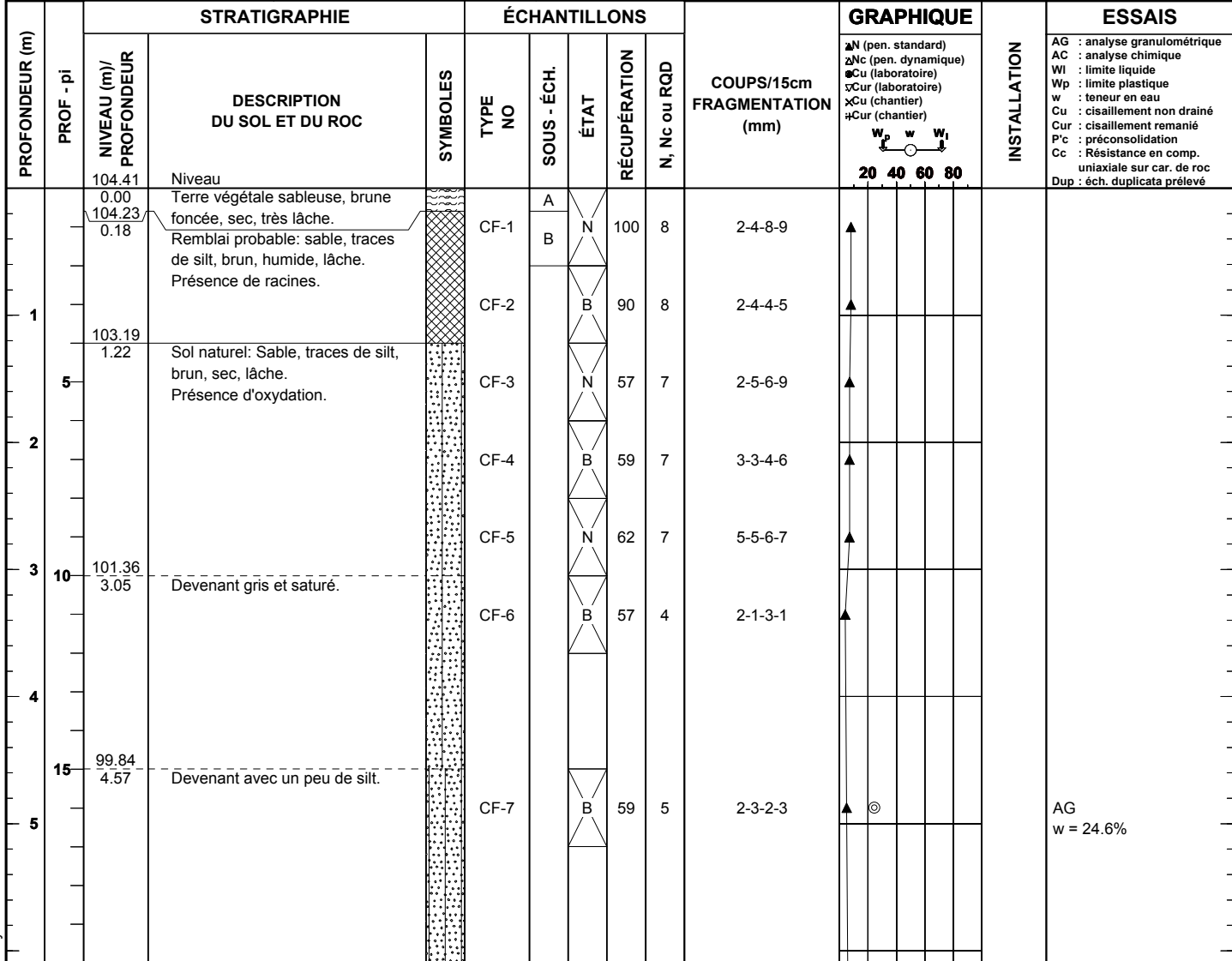
Nom du consultant: **WSP** Nom du client : **Rio Tinto Alcan**

RAPPORT DE FORAGE
Sondage N° **17F01**

Nom du projet: **Étude géotechnique pour la stabilisation d'un talus**
Nom du requérant : **Rio Tinto Alcan**
Localisation civile : **Point Langevin, rue de la Pointe, Dolbeau-Mistassini, QC**
Entrepreneur en forage: **Forages SL Inc.**
Type de forage : **Tubage** Inclinaison : Azimut :
Diamètre du forage: **NW** Diamètre du carottier:
Préparé par : **Marie-Hélène Rathé** Vérifié par : **Kristina Bondy, ing., M. ing.**

Coordonnées géodésiques X: **408833.0**
MTM (NAD-1983) Y: **5403228.8**
Z: **104.410**
No. de projet : **171-12050-00**
Plan de localisation No. :
Date du début du sondage : **2017-12-07**
Profondeur du sondage : **25.00 m**

TYPE D'ÉCHANTILLON CF Cuillère fendue CR Échantillon par forage au diamant EM Manuel TA Tarière TE Tube d'échantillonnage TM Tube à paroi mince	TERMINOLOGIE "traces" 1-10% "un peu" 10-20% adjectif (...eux) 20-35% "et" 35-50%	INDICE DE QUALITÉ DU ROC % RQD QUALIFICATIF <25 Très mauvais 25-50 Mauvais 50-75 Moyen 75-90 Bon 90-100 Excellent	COMPACTITÉ Très lâche Lâche Compact Dense Très dense	INDICE "N" 0-4 4-10 10-30 30-50 >50	NIVEAU D'EAU Date: _____ Prof.: _____
ÉTAT DE L'ÉCHANTILLON Remanié Intact (tube à paroi mince) Perdu Forage au diamant	SYMBOLES N: Indice de pénétration standard R: Refus (N > 100) PM: Poids du marteau / 61 cm R.Q.D: Indice de qualité du roc % R.Q.D = Σ Carottes > 4 po. (10 cm) longueur forée	CLASSIFICATION DES SOLS Argile < 0,002 mm Silt 0,002 à 0,080 mm Sable 0,080 à 5 mm Gravier 5 à 80 mm Cailloux 80 à 300 mm Blocs > 300mm	CONSISTANCE Très molle Molle Ferme Raide Très raide Dure	RÉSISTANCE AU CISAILEMENT (Cu) <12 kPa 12-25 kPa 25-50 kPa 50-100 kPa 100-200 kPa >200 kPa	



Remarque(s): Les indices N ont été corrigés en fonction du calibre de la cuillère fendue utilisée.

WSP_modèle de base.sty



PROFONDEUR (m)	PROF - pi	STRATIGRAPHIE		ÉCHANTILLONS				COUPS/15cm FRAGMENTATION (mm)	GRAPHIQUE	INSTALLATION	ESSAIS
		DESCRIPTION DU SOL ET DU ROC	SYMBOLES	TYPE NO	SOUS - ÉCH.	ÉTAT	RÉCUPÉRATION				
7				CF-8	B	62	6	3-3-3-5			AG : analyse granulométrique AC : analyse chimique WI : limite liquide Wp : limite plastique w : teneur en eau Cu : cisaillement non drainé Cur : cisaillement remanié P ^c : préconsolidation Cc : Résistance en comp. uniaxiale sur car. de roc Dup : éch. duplicata prélevé
8	25	CF-9		B	46	13	3-6-7-8				
9	30	CF-10		N	57	11	6-8-9-5				
10		CF-11		B	51	2	1-1-1-1				
11	35	CF-12		N	75	5	3-3-5-6				
12		CF-13		B	90	8	0-3-5-5				
12	40	CF-14		N	67	9	2-5-8-9				
13		CF-15		B	80	9	4-3-6-7				
13	45	CF-16		N	77	2	2-1-2-1				
14		CF-17		B	70	7	2-3-4-5				
14	50	CF-18		N	62	12	5-8-10-13				
15		CF-19		B	90	9	5-5-4-5				
15	55	CF-20		N	75	8	4-5-7-6				
16		CF-21		B	87	7	2-3-4-4				
16	55	CF-22		A B	N	74	9	6-7-7-7			

91.60
12.81
Devenant avec des traces de silt.

87.94
16.47
87.80
16.61
Devenant avec un peu d'argile.
Sable, un peu de silt, gris, saturé, lâche.

AG
w = 27.0%

WSP_modèle de base.sty



WSP_modèle de base.sty

▲ N (pen. standard)
 ▲ Nc (pen. dynamique)
 ● Cu (laboratoire)
 x Cur (chantier)
 x Cur (chantier)

20 40 60 80

- ESSAIS**
- AG : analyse granulométrique
 - AC : analyse chimique
 - WI : limite liquide
 - Wp : limite plastique
 - w : teneur en eau
 - Cu : cisaillement non drainé
 - Cur : cisaillement remanié
 - P'c : préconsolidation
 - Cc : Résistance en comp. uniaxiale sur car. de roc
 - Dup : éch. duplicata prélevé



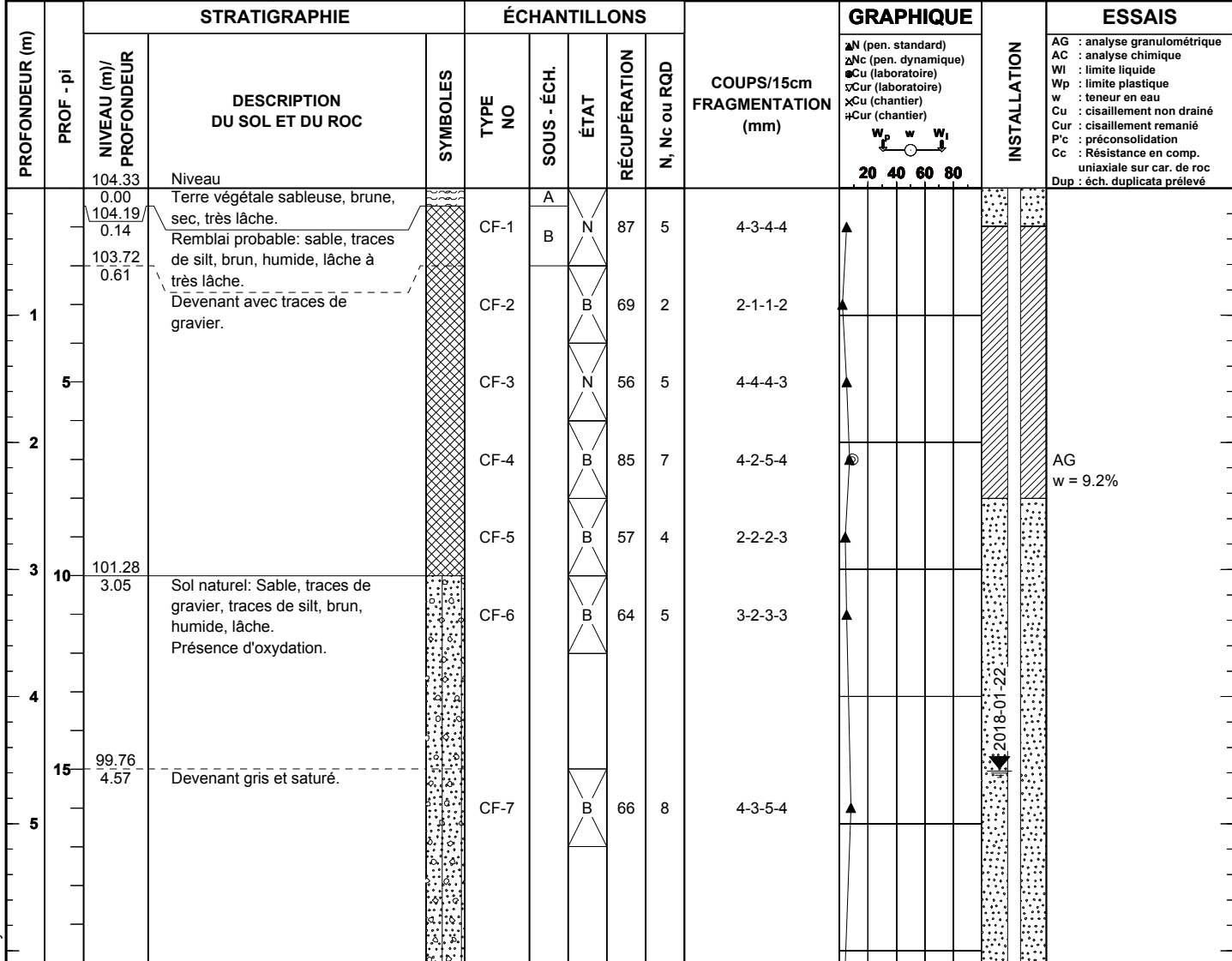
Nom du consultant: **WSP** Nom du client: **Rio Tinto Alcan**

RAPPORT DE FORAGE
Sondage N° **17F02**

Nom du projet: **Étude géotechnique pour la stabilisation d'un talus**
Nom du requérant: **Rio Tinto Alcan**
Localisation civile: **Point Langevin, rue de la Pointe, Dolbeau-Mistassini, QC**
Entrepreneur en forage: **Forages SL Inc.**
Type de forage: **Tubage** Inclinaison: Azimut:
Diamètre du forage: **NW** Diamètre du carottier:
Préparé par: **Marie-Hélène Rathé** Vérifié par: **Kristina Bondy, ing., M. ing.**

Coordonnées géodésiques X: **408712.5**
MTM (NAD-1983) Y: **5403106.8**
Z: **104.33**
No. de projet: **171-12050-00**
Plan de localisation No.:
Date du début du sondage: **2017-12-06**
Profondeur du sondage: **25.00 m**

TYPE D'ÉCHANTILLON CF Cuillère fendue CR Échantillon par forage au diamant EM Manuel TA Tarière TE Tube d'échantillonnage TM Tube à paroi mince	TERMINOLOGIE "traces" 1-10% "un peu" 10-20% adjectif (...eux) 20-35% "et" 35-50%	INDICE DE QUALITÉ DU ROC % RQD QUALIFICATIF <25 Très mauvais 25-50 Mauvais 50-75 Moyen 75-90 Bon 90-100 Excellent	COMPACTITÉ INDICE "N" Très lâche 0-4 Lâche 4-10 Compact 10-30 Dense 30-50 Très dense >50	NIVEAU D'EAU Date: 2018-01-22 Date: Prof.: 4.57 Prof.:
ÉTAT DE L'ÉCHANTILLON Remanié Intact (tube à paroi mince) Perdu Forage au diamant	SYMBOLES N: Indice de pénétration standard R: Refus (N > 100) PM: Poids du marteau / 61 cm R.Q.D: Indice de qualité du roc % R.Q.D = Σ Carottes > 4 po. (10 cm) longueur forée	CLASSIFICATION DES SOLS Argile < 0,002 mm Silt 0,002 à 0,080 mm Sable 0,080 à 5 mm Gravier 5 à 80 mm Cailloux 80 à 300 mm Blocs > 300mm	CONSISTANCE Très molle Molle Ferme Raide Très raide Dure	RÉSISTANCE AU CISAILLEMENT (Cu) <12 kPa 12-25 kPa 25-50 kPa 50-100 kPa 100-200 kPa >200 kPa



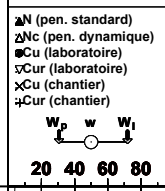
Remarque(s): Les indices N ont été corrigés en fonction du calibre de la cuillère fendue utilisée.

WSP_modèle de base.sty



PROFONDEUR (m)	PROF - pi	STRATIGRAPHIE		ÉCHANTILLONS				COUPS/15cm FRAGMENTATION (mm)	GRAPHIQUE	INSTALLATION	ESSAIS
		NIVEAU (m)/ PROFONDEUR	DESCRIPTION DU SOL ET DU ROC	SYMBOLES	TYPE NO	SOUS - ÉCH.	ÉTAT				
7											AG w = 21.6%
25											
8											
9											
30											
10											
35											
11	93.36 10.97		Silt, traces de sable et d'argile, gris, saturé, lâche.								AG
12											
40											
13	91.53 12.80		Sable, un peu de silt, gris, saturé, lâche.								
14											
45											
15											
50	89.09 15.24		Devenant compact.								
16											AG w = 22.4%
55											

WSP_modèle de base.sty



- ESSAIS**
- AG : analyse granulométrique
 - AC : analyse chimique
 - Wl : limite liquide
 - Wp : limite plastique
 - w : teneur en eau
 - Cu : cisaillement non drainé
 - Cur : cisaillement remanié
 - P'c : préconsolidation
 - Cc : Résistance en comp. uniaxiale sur car. de roc
 - Dup : éch. duplicata prélevé



PROFONDEUR (m)	PROF - pi	STRATIGRAPHIE		ÉCHANTILLONS				COUPS/15cm FRAGMENTATION (mm)	GRAPHIQUE	INSTALLATION	ESSAIS
		NIVEAU (m)/ PROFONDEUR	DESCRIPTION DU SOL ET DU ROC	SYMBOLES	TYPE NO	SOUS - ÉCH.	ÉTAT				
18											
60		86.13 18.20 85.99 18.34	Silt sableux, traces d'argile, gris, saturé, lâche. Sable, un peu de silt, traces d'argile, gris, saturé, compact.								
19											
65											
20		84.21 20.12	Silt, traces de sable et d'argile, gris, saturé, compact.								
21											
70											AG WI = 24.1% Wp = 22.5% w = 28.4%
22											
75											
23		81.17 23.16	Silt, un peu d'argile, gris, saturé, dense à compact.								
24											
80											AG WI = 27.2% Wp = 23% w = 25.3%
25		79.33 25.00	Fin du forage.								
26											
85											
27											
90											
28											

WSP_modèle de base.sty



D

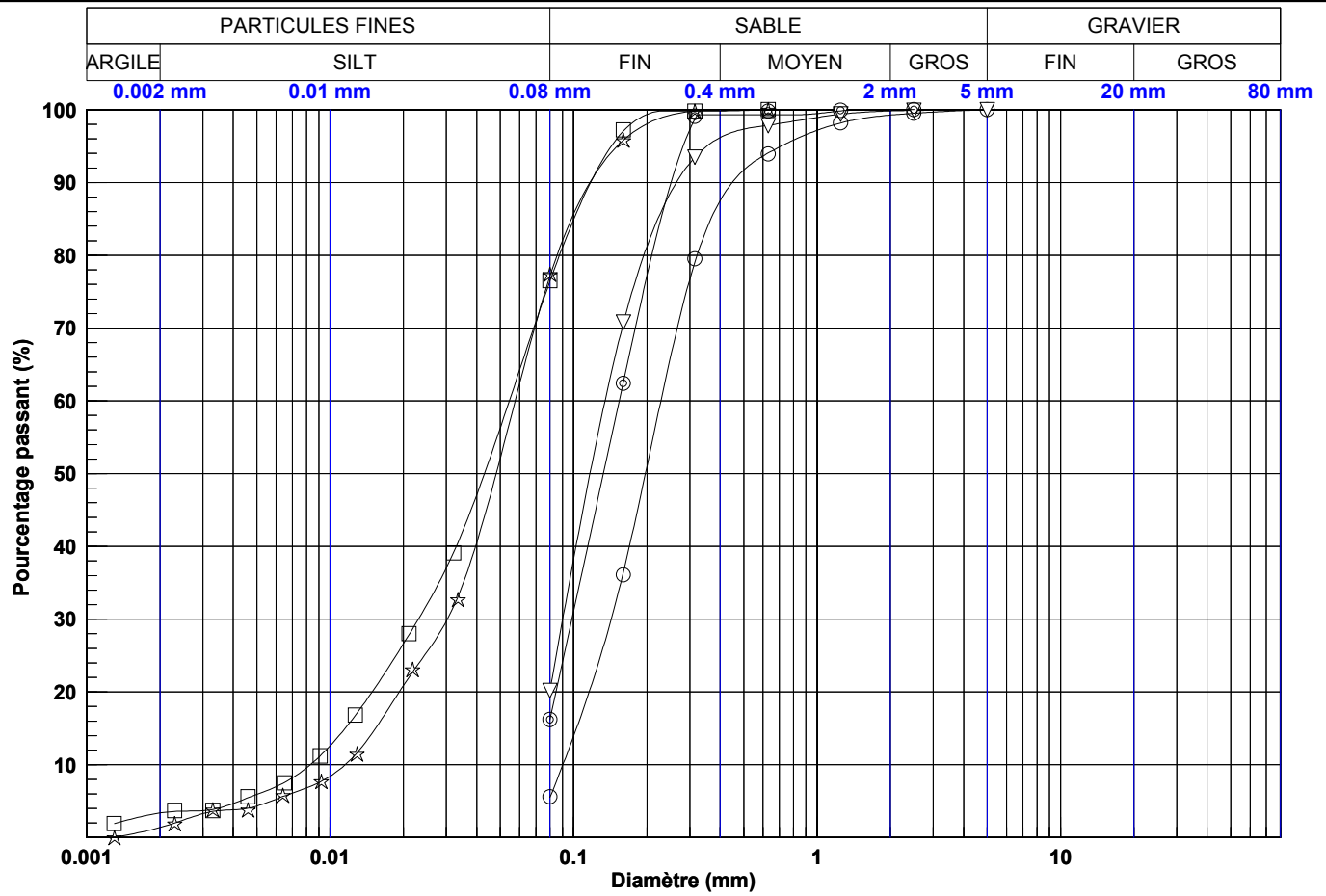
**RÉSULTATS DES
ESSAIS EN
LABORATOIRE
GÉOTECHNIQUE**

Nom du consultant : 

Nom du client : **Rio Tinto Alcan**

ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE
Sondage N° **17F01**

Nom du projet : **Étude géotechnique pour la stabilisation d'un talus** No. de projet : **171-12050-00**
 Nom du requérant : **Rio Tinto Alcan** Plan de localisation No. :
 Localisation civile : **Point Langevin, rue de la Pointe, Dolbeau-Mistassini, QC** Date du début du sondage : **2017-12-07**



Courbe	ARGILE	SILT	SABLE	GRAVIER
○	-	6	94	0
□	3	73	24	0
▽	-	20	80	0
☆	1	76	23	0
⊙	-	16	84	0

Courbe	0.002 mm	0.08 mm	0.16 mm	0.315 mm	0.63 mm	1.25 mm	2.5 mm	5 mm	10 mm	14 mm	20 mm	28 mm	40 mm	56 mm	80 mm
○	-	5.50	36.46	79.09	94.05	98.19	99.51	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
□	3.37	76.48	97.07	99.83	99.99	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
▽	-	20.31	70.64	93.48	97.87	99.39	99.90	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
☆	1.38	77.17	95.81	99.83	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
⊙	-	16.20	62.58	98.71	99.33	99.84	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Courbe	Sondage	Éch.	Profondeur (m)	Description	D10	D30	D60	Cu	Cc	USCS	WN
○	17F01	16	12.81 - 13.42	Sable, traces de silt.	0.090	0.143	0.228	2.5	1.0	SP-SM	27.0
□	17F01	27	19.52 - 20.13	Silt sableux, traces d'argile.	0.008	0.023	0.054	6.6	1.2	-	26.0
▽	17F01	30	21.35 - 21.96	Sable silteux.	-	0.090	0.135	-	-	SM	24.4
☆	17F01	34	23.79 - 24.40	Silt sableux, traces d'argile.	0.011	0.030	0.058	5.0	1.4	-	26.1
⊙	17F01	7	4.57 - 5.18	Sable, un peu de silt.	-	0.098	0.154	-	-	SM	24.6

Effectué par : **Sonia Bagué** Date : **2017-12-22** Vérifié par : **Abdelwahab Kamel Ing.** Date : **2017-12-22**
 2018-01-08 10:01:01

Y:\geotec_80\Style\lab\Lab_Granulo_et_sédiments_FR_5ech.sty L:\Environnement\Géotechnique\LOG\Geotec_principal_20171115.mdb

Nom du consultant :



Nom du client :

Rio Tinto Alcan

ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE

Sondage N° 17F02

Nom du projet : **Étude géotechnique pour la stabilisation d'un talus**

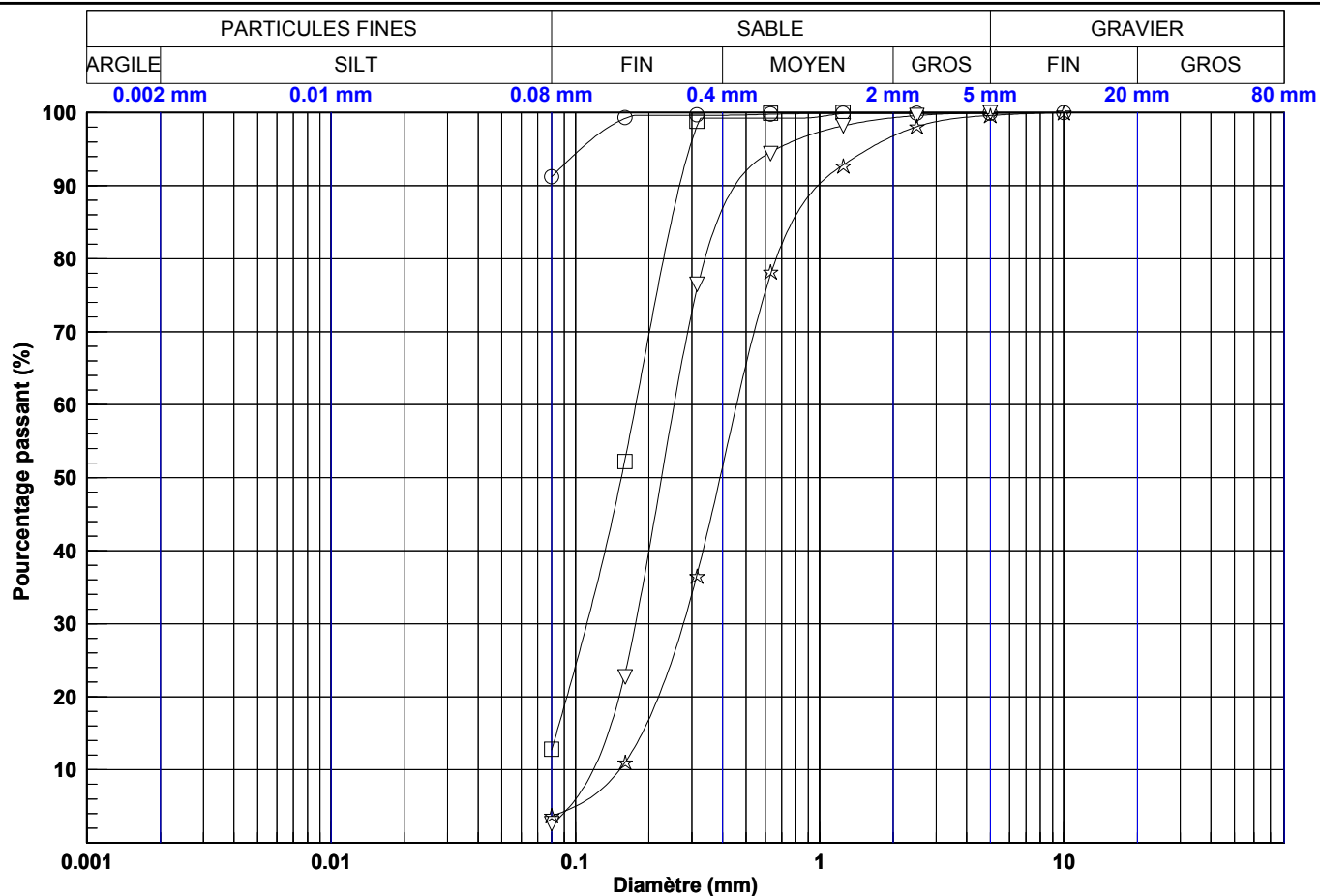
No. de projet : **171-12050-00**

Nom du requérant : **Rio Tinto Alcan**

Plan de localisation No. :

Localisation civile : **Point Langevin, rue de la Pointe, Dolbeau-Mistassini, QC**

Date du début du sondage : **2017-12-06**



Courbe	PARTICULES FINES			SABLE				GRAVIER		
○	91			9						0
□	13			87						0
▽	2			98						0
☆	4			96						0

Courbe	0.08 mm	0.16 mm	0.315 mm	0.63 mm	1.25 mm	2.5 mm	5 mm	10 mm	14 mm	20 mm	28 mm	40 mm	56 mm	80 mm
○	91	99	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
□	13	53	98	99	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
▽	2	23	76	95	98	100	100	100	100	100	100	100	100	100
☆	4	11	37	78	93	98	100	100	100	100	100	100	100	100

Courbe	Sondage	Éch.	Profondeur (m)	Description	D10	D30	D60	Cu	Cc	USCS	WN
○	17F02	13	10.97 - 11.58	Silt, traces de sable.	-	-	-	-	-	-	-
□	17F02	21	15.24 - 15.85	Sable, un peu de silt.	-	0.112	0.177	-	-	SM	22.4
▽	17F02	4	1.83 - 2.44	Sable, traces de silt.	0.119	0.176	0.254	2.1	1.0	SP	9.2
☆	17F02	8	6.10 - 6.71	Sable, traces de silt.	0.152	0.277	0.457	3.0	1.1	SP	21.6

Effectué par : Sonia Bagué

Date : 2017-12-22

Vérfié par : Abdelwahab Kamel Ing.

Date : 2017-12-22

Nom du consultant : 

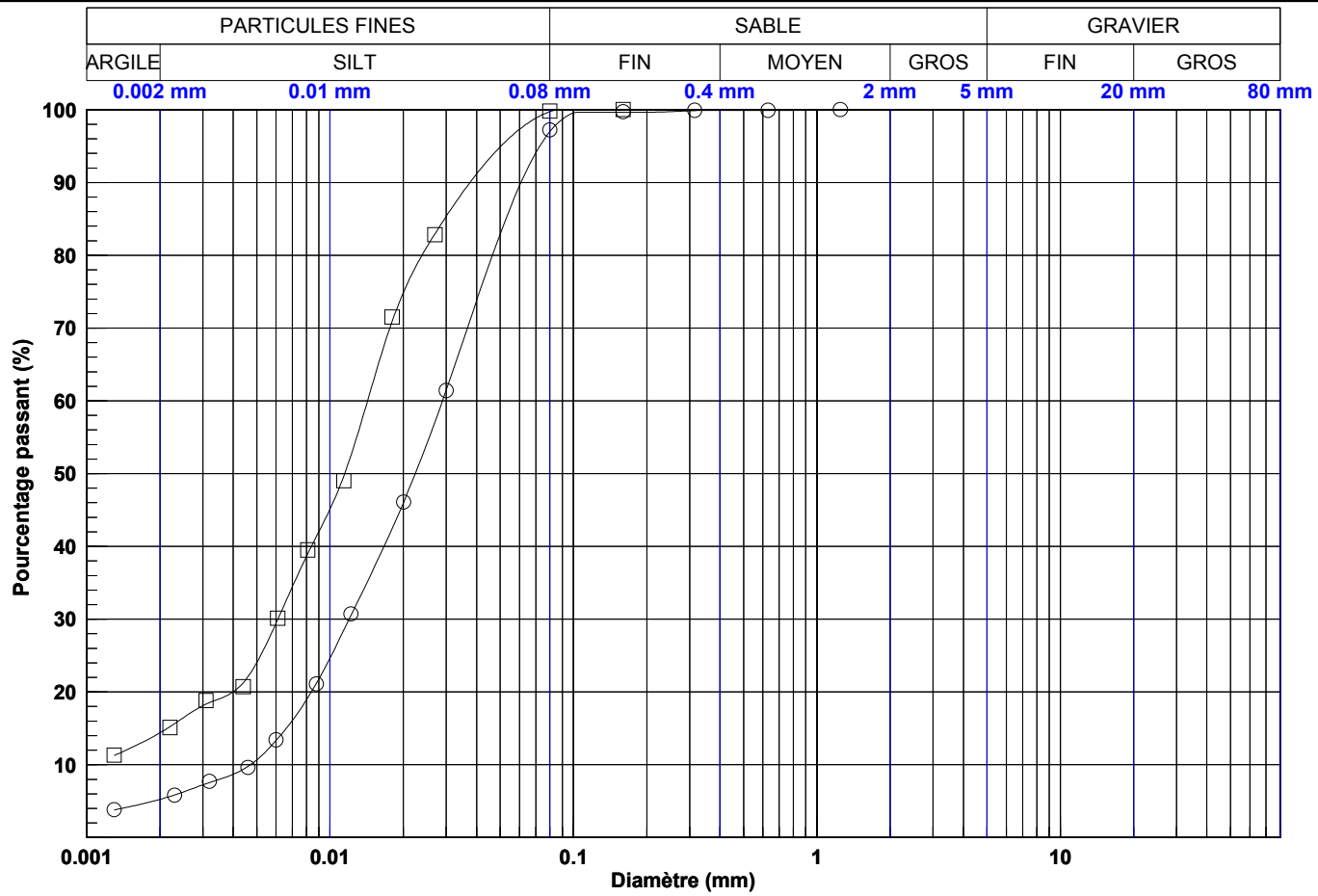
Nom du client : **Rio Tinto Alcan**

Page 1 de 1
ANALYSE GRANULOMÉTRIQUE
Sondage N° **17F02**

Nom du projet : **Étude géotechnique pour la stabilisation d'un talus** No. de projet : **171-12050-00**

Nom du requérant : **Rio Tinto Alcan** Plan de localisation No. :

Localisation civile : **Point Langevin, rue de la Pointe, Dolbeau-Mistassini, QC** Date du début du sondage : **2017-12-06**



Courbe	ARGILE	SILT	SABLE	GRAVIER
○	5	92	3	0
□	15	85	0	0

Courbe	0.002 mm	0.08 mm	0.16 mm	0.315 mm	0.63 mm	1.25 mm	2.5 mm	5 mm	10 mm	14 mm	20 mm	28 mm	40 mm	56 mm	80 mm
○	5.23	97.01	99.67	99.88	99.91	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
□	14.38	99.74	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

Courbe	Sondage	Éch.	Profondeur (m)	Description	D10	D30	D60	Cu	Cc	USCS	WN
○	17F02	30	20.73 - 21.34	Silt, traces d'argile et de sable.	0.005	0.012	0.029	6.1	1.1	-	28.4
□	17F02	35	23.78 - 24.39	Silt, un peu d'argile.	-	0.006	0.014	-	-	-	25.3

Effectué par : **Sonia Bagué** Date : **2017-12-22** Vérifié par : **Abdelwahab Kamel Ing.** Date : **2017-12-22**

Y:\geotec_80\Style\lab\Lab_Granulo_et_sédiments_FR_5ech.sty L:\Environnement\Géotechnique\ID - Logiciel\LOG\Geotec_principal_20171115.mdb

Nom du consultant :



Nom du client :

Rio Tinto Alcan

Page 1 de 1

LIMITES DE CONSISTANCE D'ATTERBERG

Sondage N° **17F01, 17F02**

Nom du projet : **Étude géotechnique pour la stabilisation d'un talus**

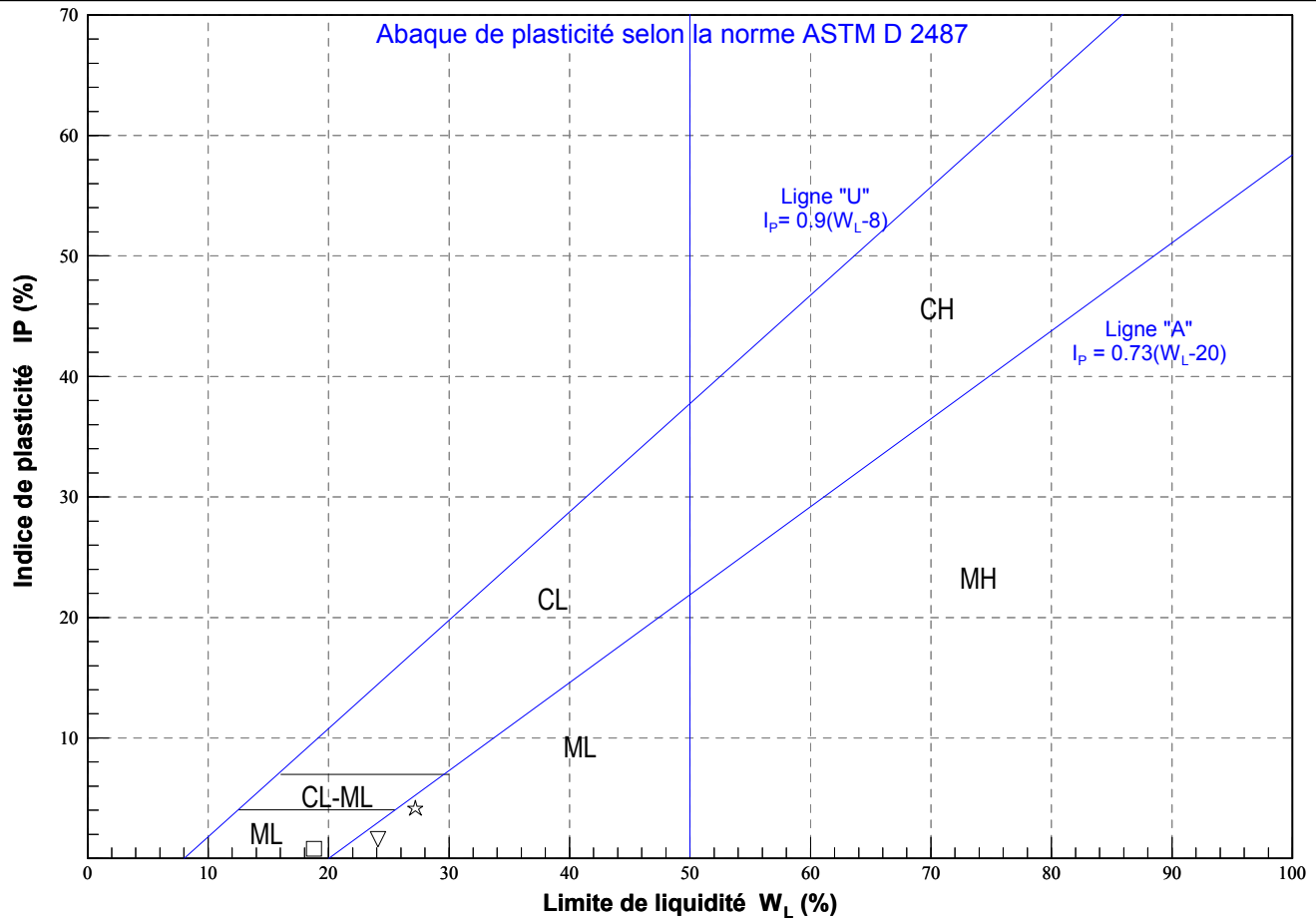
No. de projet : **171-12050-00**

Nom du requérant : **Rio Tinto Alcan**

Plan de localisation No. :

Localisation civile : **Point Langevin, rue de la Pointe, Dolbeau-Mistassini, QC**

Date du début du sondage : **2017-12-07**



Symbole	Sondage	Type	Échantillon	Profondeur	État	W_N	W_L	W_P	I_L	I_p	USCS
○	17F01	CF	27.0	19.52 - 20.13	R	26.000	20.500	21.0	-	-	ML
□	17F01	CF	34.0	23.79 - 24.40	R	26.100	18.800	18.0	10.1	0.8	ML
▽	17F02	CF	30.0	20.73 - 21.34	R	28.400	24.100	22.5	3.7	1.6	ML
☆	17F02	CF	35.0	23.78 - 24.39	R	25.300	27.200	23.0	0.6	4.2	ML

Effectué par : Sonia Bagué

Date : 2017-12-22

Vérfié par : Abdelwahab Kamel Ing.

Date : 2017-12-22

2018-01-08 00:00

Investigation géotechnique et analyse de la stabilité Site 92.11.01 Pointe Langevin Dolbeau-Mistassini (Québec)

Étude géotechnique

Rio Tinto – Énergie Électrique
100, Saint-Joseph, bureau 104
Alma (Québec) G8B 7A6



Alain Duchesne, ing.
Chargé de projets - Géotechnique
N° de membre OIQ : 134808



Nicolas Masson, ing.
Ingénieur en géotechnique
N° de membre OIQ : 5032407

N/Dossier n° : 646712

Le 24 août 2017

Distribution : Madame Caroline Jollette, ing. (PDF)



Table des matières

1	Introduction	1
1.1	Mise en contexte	1
1.2	Objectif de l'investigation géotechnique	1
1.3	Conditions du rapport	2
2	Description du site à l'étude	3
2.1	Localisation du site à l'étude	3
2.2	Géométrie du talus	3
3	Méthode de reconnaissance	5
3.1	Forages géotechniques	5
3.2	Localisation des sondages	6
3.3	Essais en laboratoire	6
4	Résultats des travaux d'investigation géotechnique	7
4.1	Nature et propriétés des matériaux	7
4.1.1	Dépôt naturel de sable	7
4.1.2	Dépôt naturel de sable silteux à silt, un peu de sable	7
4.2	Conditions de l'eau souterraine	7
5	Analyse de la stabilité des talus	8
5.1	Modélisation	8
5.2	Résultats de l'analyse de la stabilité	8
6	Synthèse et recommandations	11
6.1	Sommaire du projet	11
6.2	Recommandations	11

Liste des tableaux

Tableau 1	Niveaux d'eau mesurés à partir piézomètres à pointe poreuse installés dans la cavité du forage F-12	7
Tableau 2	Paramètres géotechniques utilisés pour la simulation numérique	8
Tableau 3	Largeur de la bande de protection à considérer sans l'application d'une surcharge et avec l'application d'une surcharge	10

Liste des figures

Figure 1	Aperçu du mouvement de sols sur le côté Sud de la Pointe Langevin (image extraite d'un vidéo amateur filmé le 16 avril 2017)	1
Figure 2	Localisation du site à l'étude (tirée de Google Earth)	3
Figure 3	Position des 9 transects de relevés bathymétriques avec les courbes bathymétriques résultants de l'interprétation des relevés de juin 2017	4
Figure 4	Foreuse Diedrich (modèle D-50) en opération au site du forage F-01-17	6
Figure 5	Transect 5 - Tranche de sol caractérisée par un FS $\leq 1,5$, sans surcharge	9
Figure 6	Transect 5 - Tranche de sol caractérisée par un FS $< 1,5$, avec excavatrice type à moins de 5 m du haut de talus	9
Figure 7	Transect 5 - Tranche de sol caractérisé par un FS $> 1,5$, avec surcharge à plus de 5 m	10
Figure 8	Limites de la bande de protection	12

Liste des annexes

Annexe 1		2
<hr/>		
Portée du rapport		
Annexe 2		6
<hr/>		
Notes explicatives des rapports de sondages		
Rapports de sondages		
Annexe 3		2
<hr/>		
Résultats des essais géotechniques en laboratoire		
Annexe 4		2
<hr/>		
Dessin 646712-01 : Localisation des sondages		

Ce rapport est composé de 27 pages incluant les annexes, il ne peut être reproduit en entier ou en partie sans l'autorisation préalable de SNC-Lavalin GEM Québec inc.

1 Introduction

1.1 Mise en contexte

Au mois d'avril 2017, un mouvement de sols s'est produit dans le secteur de la pointe Langevin sur la rive Nord de la rivière Péribonka (site 92.11.01) dans le secteur de Vauvert près de Dolbeau-Mistassini au Lac-Saint-Jean (Québec) (figure 1). Selon les informations qui nous ont été communiquées par Rio Tinto et tel que vu sur les médias sociaux, ce mouvement de sols a entraîné une certaine quantité de sols du dépôt naturel ainsi qu'un perré qui avait été installé aux mois d'août et septembre 2016. C'est dans ce contexte que les services de SNC-Lavalin Environnement et géosciences (SNC-Lavalin), opérant sous l'entité légale SNC-Lavalin GEM Québec inc. ont été retenus par Rio Tinto.

Dans un premier avis géotechnique, transmis le 27 avril 2017, SNC-Lavalin a recommandé qu'une analyse de la stabilité du talus soit effectuée. Pour effectuer cette analyse, une campagne d'investigation géotechnique serait requise, de même qu'un relevé bathymétrique. Le présent document présente les résultats de la campagne d'investigation et de l'analyse de la stabilité du talus de la pointe.

Figure 1 **Aperçu du mouvement de sols sur le côté Sud de la Pointe Langevin (image extraite d'un vidéo amateur filmé le 16 avril 2017)**



1.2 Objectif de l'investigation géotechnique

L'objectif de la campagne d'investigation géotechnique consiste à déterminer la nature et les propriétés des sols immédiatement au site de la Pointe Langevin. Les résultats de la campagne permettront de préciser les paramètres géotechniques requis pour effectuer l'analyse de la stabilité des talus de la pointe Langevin à l'aide d'une simulation numérique.

Les résultats de cette analyse devraient permettre d'établir les limites de la zone de protection requise pour protéger les personnes (résidents et travailleurs) qui pourraient avoir à s'approcher du bord du talus.

1.3 Conditions du rapport

Le présent rapport a été préparé spécifiquement pour Rio Tinto et les autres consultants collaborant au projet. Pour conserver l'intégrité de ce rapport et pour permettre de l'interpréter adéquatement, aucune donnée, valeur ou résultat ne doit partiellement ou complètement en être retiré. Toute modification au projet doit être signalée à SNC-Lavalin, afin que la portée et la pertinence des recommandations contenues dans ce rapport puissent être réexaminées et, le cas échéant, modifiées. La portée du rapport est présentée à l'annexe 1.

2 Description du site à l'étude

2.1 Localisation du site à l'étude

Le site à l'étude se situe à environ 2,5 km à l'Ouest du village de Péribonka (Québec). La Pointe Langevin est une pointe de terre qui se situe à la confluence des rivières Péribonka et Petite Péribonka. Sur la figure 2, on aperçoit la rivière Petite Péribonka qui s'écoule globalement du Nord vers le Sud en adoptant un parcours méandrique. À son embouchure, après un important changement de direction, la rivière est orientée vers l'Est. Sur cette même figure, on aperçoit également la rivière Péribonka qui s'écoule de l'Est vers l'Ouest.

Un perré de protection a été construit sur des portions des berges de ces 2 rivières. Plus précisément, du côté de la rivière Petite Péribonka, la Pointe Langevin est complètement recouverte de perré, tandis que du côté de la rivière Péribonka seul l'extrémité de la pointe, une section d'environ 20 m était recouverte de perré et ce perré a été installé pendant l'été 2016.

Dans le secteur à l'étude, les sols sont principalement composés de sable moyen et uniforme.

Figure 2 Localisation du site à l'étude (tirée de Google Earth)



2.2 Géométrie du talus

Le secteur de la Pointe Langevin a fait l'objet d'un suivi par bathymétrie en 2014, en 2016 puis en 2017 par Le Groupe Conseil Nutshimit-Nippour. En juin 2017, 9 transects ont été relevés par bathymétrie. La figure 2 montre la position de ces transects superposés sur une photo satellite de la Pointe Langevin. À l'examen des relevés bathymétrique et en considérant également le

relevé LIDAR de 2014, on constate que la surface du terrain de la pointe est située entre l'élévation 104,1 et 104,4 m. Au Nord de la pointe, l'élévation du fond de la rivière Petite-Péribonka varie de 96 m à 98 m. Au Sud du côté de la rivière Péribonka, le fond de la rivière est situé en général entre les élévations 96 m et 98 m. Toutefois, à partir de l'extrémité de la Pointe Langevin et le long de celle-ci, l'interprétation des relevés bathymétriques montre la présence d'un sillon dont le point bas est situé à 85 m. La figure 3 montre les courbes bathymétriques qui résultent de l'interprétation du relevé de juin 2017.

Figure 3 Position des 9 transects de relevés bathymétriques avec les courbes bathymétriques résultants de l'interprétation des relevés de juin 2017



3 Méthode de reconnaissance

3.1 Forages géotechniques

Les travaux d'investigation ont été effectués les 7 et 8 juin 2017. Pendant cette période, 1 forage, numéroté F-01-17, a été effectué à l'aide d'une foreuse hydraulique autotractée de marque Diedrich, modèle D-50 (figure 4). Le rapport de forage est présenté à l'annexe 2.

L'avancement des forages a été effectué par la rotation d'un sabot diamanté installé en bout de tubages NW et par lavage au tricône. Entre chaque avancé de tubage, des échantillons de sols remaniés ont été prélevés au moyen d'un carottier fendu normalisé de calibre B, d'un diamètre extérieur de 51 mm et d'une longueur de 610 mm, conformément aux exigences de la norme ASTM D 1586-11, décrivant l'essai de pénétration standard (SPT). L'indice de pénétration « N » est mesuré lors de cet essai, indiquant l'état de compacité des sols granulaires. Ces valeurs sont indiquées dans le rapport de forage de l'annexe 2. Ces travaux ont été effectués sous la surveillance de Monsieur Vincent Gauthier, surveillant en géotechnique de SNC-Lavalin.

Le forage a été arrêté volontairement dans les sols à 17,98 m de profondeur sans atteindre le roc.

À l'intérieur de la cavité de ce forage, 2 piézomètres munis d'une cellule poreuse de type Casagrande ont été installés à des profondeurs de 5,92 et 15 m, afin de mesurer le niveau de l'eau souterraine dans les sols. Les schémas d'installation de ces tubes sont montrés au rapport de forage de l'annexe 2.

Figure 4 Foreuse Diedrich (modèle D-50) en opération au site du forage F-01-17



3.2 Localisation des sondages

L'emplacement des sondages a été localisé à l'aide d'un GPS de marque Trimble offrant une précision en X et en Y inférieure à 1 m. Les coordonnées de chacun des sites sont indiquées aux rapports de sondages présentés à l'annexe 2. La position du forage est montrée au dessin 646712-1 de l'annexe 4.

3.3 Essais en laboratoire

Les échantillons de sols recueillis dans le forage ont été transportés au laboratoire de géotechnique de SNC-Lavalin, à des fins d'examen visuel, d'analyses et de classification. En tout, 2 échantillons représentatifs du dépôt naturel ont été sélectionnés et soumis à une analyse granulométrique par tamisage et 1 échantillon a été soumis à une analyse granulométrique par sédimentométrie. Les résultats de ces essais ont été utilisés afin d'établir la stratigraphie des sols en place. Les résultats des essais en laboratoire ont été intégrés au rapport de forage de l'annexe 2.

Les échantillons qui n'ont pas été utilisés pour les essais en laboratoire seront conservés pendant 12 mois suivant la date de parution du présent rapport. Par la suite, ils seront éliminés à moins d'un avis contraire de votre part.

4 Résultats des travaux d'investigation géotechnique

4.1 Nature et propriétés des matériaux

Une description générale des différents horizons rencontrés dans le forage F-1-17 est présentée dans les paragraphes suivants, par ordre croissant de profondeur.

4.1.1 Dépôt naturel de sable

Sous une mince couche de sols organiques, on observe le dépôt naturel de sable contenant des traces de silt. La compacité du matériau est jugée lâche à compact en vertu des valeurs de l'indice N qui varient de 3 à 27 (19 mesures) et de 9 en moyenne en excluant la valeur minimale de 3 et la valeur maximale de 27.

Deux analyses granulométrique par tamisage ont été effectuées sur ce matériau. Les résultats de ces essais sont montrés sur la figure 1 de l'annexe 3. Selon les résultats de ces analyses, le matériau est généralement composé de 91 à 93 % de sable et de 7 à 9 % de silt.

4.1.2 Dépôt naturel de sable silteux à silt, un peu de sable

Selon une appréciation visuelle, la granulométrie du matériau devient plus fine avec l'accroissement de la profondeur. À partir de 15,24 m de profondeur, le matériau est un sable silteux puis à 16,76 m, le matériau devient un silt sableux.

Une analyse granulométrique par sédimentométrie a été effectuée sur un échantillon prélevé à l'intérieur de cette couche. Le résultat de cet essai indique un contenu en silt de 80 %, en sable de 14 % et en argile de 6 %.

Le sable silteux à silt, un peu de sable est généralement compact avec des indices N qui varient de 9 à 14 (4 mesures).

4.2 Conditions de l'eau souterraine

Deux piézomètres ont été installés à l'intérieur de la cavité du forage F-1-17. Le tableau 1 présente le niveau de la nappe d'eau souterraine mesuré à l'intérieur de ces instruments le 8 juin 2017.

Tableau 1 Niveaux d'eau mesurés à partir des piézomètres à pointe poreuse installés dans la cavité du forage F-12

Profondeur de la base de la cellule poreuse (m)	Date de la mesure	Profondeur de la nappe (m) par rapport à la surface	Niveau correspondant (m)
5,92	2017-06-08	3,18	140,36
12,04	2017-06-08	3,15	132,66

Il est important de souligner que le niveau de l'eau souterraine peut fluctuer à la hausse ou à la baisse et se situer à des profondeurs différentes selon les années, les saisons et les conditions climatiques (pluies abondantes, fonte des neiges, période de sécheresse, etc.) et des modifications apportées à l'environnement (excavation, pompage, etc.).

5 Analyse de la stabilité des talus

5.1 Modélisation

Les analyses de stabilité ont été réalisées en utilisant la version 8.0 du logiciel *Slope/W* produit par la compagnie *GeoSlope International Ltd.* Le modèle de calcul utilisé est celui de Morgenstern-Price.

Les paramètres géotechniques considérés pour chacun des types de sols échantillonnés sur cette section sont présentés au tableau 2 et proviennent de relations empiriques utilisées couramment en géotechnique.

Tableau 2 Paramètres géotechniques utilisés pour la simulation numérique

Matériau	Profondeur (m)	Paramètres			
		Poids volumique humide, γ_h (kN/m ³)	Angle de frottement interne ϕ' (°)	Cohésion c' (kPa)	Résistance au cisaillement non drainé c_u (kPa)
Dépôt naturel de sable	0,00 à 15,24	19	31	0	--
Dépôt naturel de silt avec un peu de sable	2,60 à 4,89	19	32	0	--

Le bloc modèle utilisé dans le cadre de la simulation numérique provient de l'assemblage du levé LIDAR de 2014 et des relevés bathymétriques (2D) acquis en juin 2017. La jonction des 2 levés résulte d'une interprétation de SNC-Lavalin.

Le choix du facteur de sécurité minimal à considérer dépend en général du degré de confiance dans les paramètres influençant la simulation numérique et du niveau de conséquence d'une rupture. Pour la présente étude, bien que les paramètres géotechniques soient bien connus, la morphologie du talus est sujette à un certain niveau d'incertitude. En effet, bien que le bloc modèle soit construit à partir d'un relevé bathymétrique précis, la pente du talus sous le niveau de l'eau peut se modifier graduellement sous l'effet de l'érosion, et ce, sans qu'aucun signe extérieur n'en témoigne. Par conséquent, un facteur de sécurité (FS) de 1,5 sera considéré dans le cadre de cette analyse.

5.2 Résultats de l'analyse de la stabilité

Considérant la nature des matériaux en place, la simulation numérique est effectuée pour une rupture profonde en conditions drainées uniquement. De plus, la simulation tient compte de l'application d'une surcharge de 45 kPa équivalente à la pression exercée au sol par une excavatrice hydraulique de marque Komatsu PC 200 (excavatrice type).

Les figures 5 à 7 montrent sur le transect 5, la tranche de sol pour laquelle le facteur de sécurité est inférieur à 1,5. Plus particulièrement, la figure 5 montre la situation lorsqu'aucune surcharge n'est appliquée en haut de talus. La figure 6 montre l'influence d'une surcharge sur le facteur de sécurité et enfin, la figure 7 montre la largeur de la bande de protection pour que la surcharge équivalente l'excavatrice type n'ait aucune influence sur le facteur de sécurité.

Figure 5 Transect 5 - Tranche de sol caractérisée par un FS $\leq 1,5$, sans surcharge

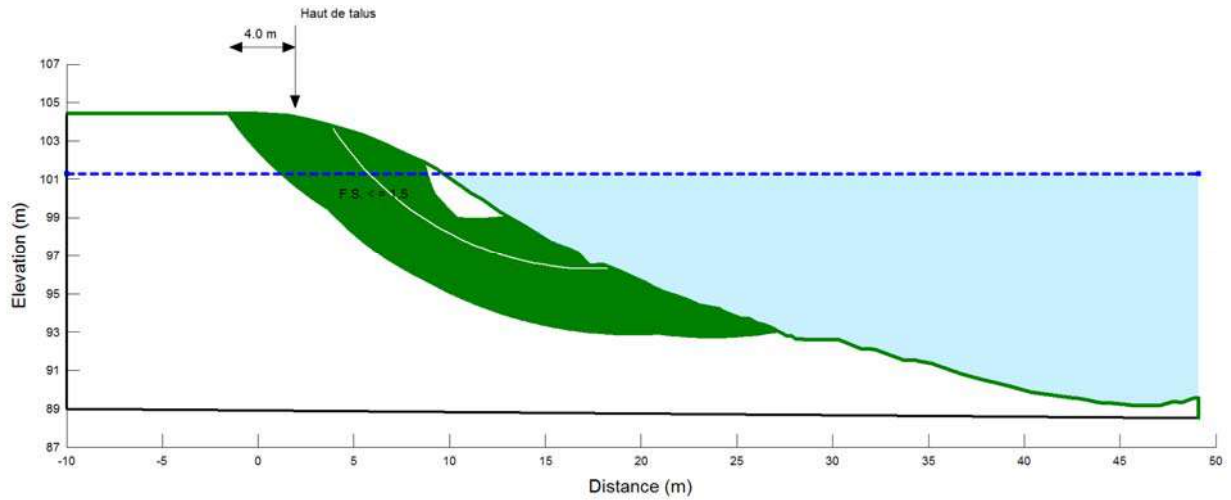


Figure 6 Transect 5 - Tranche de sol caractérisée par un FS $< 1,5$, avec excavatrice type à moins de 5 m du haut de talus

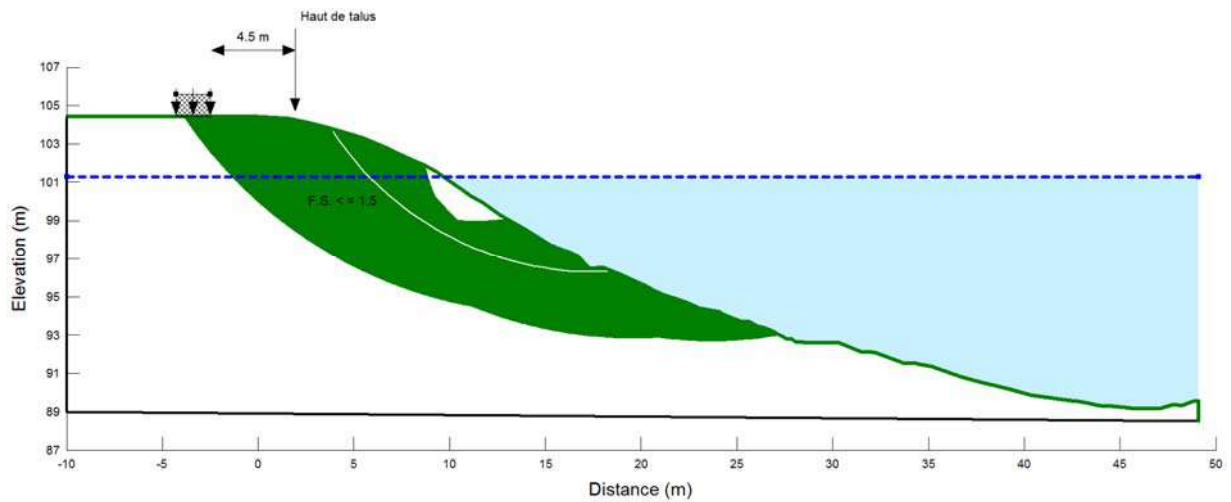
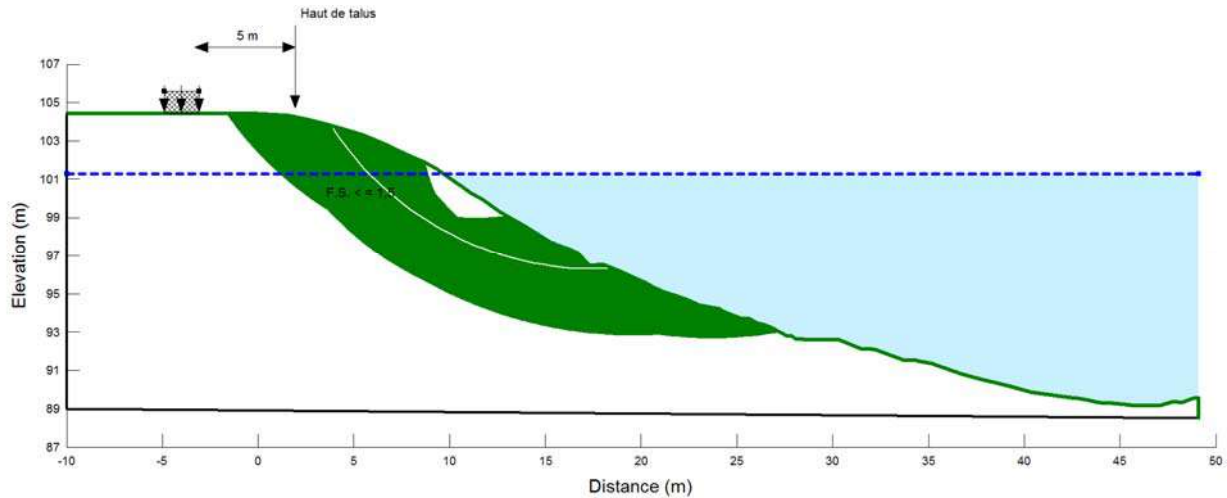


Figure 7 Transect 5 - Tranche de sol caractérisé par un FS > 1,5, avec surcharge à plus de 5 m



Par ailleurs, le tableau 3 présente la largeur de la bande de protection à respecter sans l’application de surcharge et la bande de protection à respecter avec l’application d’une surcharge pour les transects 5, 6 et 7. Pour tous les autres transects, le facteur de sécurité face aux glissements rotationnels profonds est supérieur à 1,5, par conséquent, la bande de protection minimale à respecter est de 3 m, tel que mentionné aux encadrements de Rio Tinto.

Tableau 3 Largeur de la bande de protection à considérer sans l’application d’une surcharge et avec l’application d’une surcharge

Transect	Bande de protection, sans surcharge (m)	Bande de protection, avec surcharge (m)
5	4,0	5,0
6	3,5	4,0
7	6,5	7,0

6 Synthèse et recommandations

6.1 Sommaire du projet

Un mouvement de sols s'est produit sur la rive Sud de la Pointe Langevin, située dans le secteur de Dolbeau-Mistassini. Ce décrochement a impliqué un important volume de sols du dépôt naturel et a emporté un perré de protection qui avait été mis en place en 2016.

Suite à cet évènement, il a été recommandé d'installer une bande de protection autour de la zone affectée afin d'assurer la sécurité des utilisateurs du terrain. Par la suite, des relevés bathymétriques ainsi qu'une campagne d'investigation géotechnique ont été effectués afin de faire l'analyse de la stabilité du talus.

L'analyse et les recommandations qui suivent sont formulées en prévision de la réalisation de travaux correcteurs temporaires.

6.2 Recommandations

À la lumière des résultats de l'analyse de stabilité, nous recommandons de maintenir une bande de protection de 7,0 m de largeur au bout de la pointe et de 5,0 m de largeur sur le côté Sud de celle-ci. La circulation de tout équipement mécanique devra être proscrite à l'intérieur de cette bande de protection.

La bande de protection devra être implantée, tel que montré à la figure 8. Les limites proposées doivent être mesurées par rapport au haut de talus observé sur le terrain.

Selon les travaux qui seront effectués, advenant l'utilisation d'un équipement autre que l'excavatrice type considérée dans cette analyse, la méthode de travail devra être validée par un ingénieur en géotechnique.

Figure 8 Limites de la bande de protection



Annexe 1

Portée du rapport

PORTÉE DU RAPPORT

1. UTILISATION DU RAPPORT

A. Utilisation du rapport : Le présent rapport a été préparé, et les travaux qui y sont mentionnés ont été réalisés par SNC-Lavalin GEM Québec inc. (SNC-Lavalin) exclusivement à l'intention du client (le Client) auquel le rapport est adressé, qui a pris part à l'élaboration de l'énoncé des travaux et en comprend les limites. La méthodologie, les conclusions, les recommandations et les résultats cités au présent rapport sont fondés uniquement sur l'énoncé des travaux et assujettis aux exigences en matière de temps et de budget, telles que décrites dans l'offre de services et/ou dans le contrat en vertu duquel le présent rapport a été émis. L'utilisation de ce rapport, le recours à ce dernier ou toute décision fondée sur son contenu par un tiers est la responsabilité exclusive de ce dernier. SNC-Lavalin n'est aucunement responsable de tout dommage subi par un tiers du fait de l'utilisation de ce rapport ou de toute décision fondée sur son contenu. Les conclusions, les recommandations et les résultats cités au présent rapport (i) ont été élaborés conformément au niveau de compétence normalement démontré par des professionnels exerçant des activités dans des conditions similaires de ce secteur, et (ii) sont déterminés selon le meilleur jugement de SNC-Lavalin en tenant compte de l'information disponible au moment de la préparation du présent rapport. Les services professionnels fournis au Client et les conclusions, les recommandations et les résultats cités au présent rapport ne font l'objet d'aucune autre garantie, explicite ou implicite. Les conclusions et les résultats cités au présent rapport sont valides uniquement à la date du rapport et peuvent être fondés, en partie, sur de l'information fournie par des tiers. En cas d'information inexacte, de la découverte de nouveaux renseignements ou de changements aux paramètres du projet, des modifications au présent rapport pourraient s'avérer nécessaires. Les résultats de cette étude ne constituent en aucune façon une garantie que le terrain à l'étude est exempt de toute contamination. Le présent rapport doit être considéré dans son ensemble, et ses sections ou ses parties ne doivent pas être vues ou comprises hors contexte. Si des différences venaient à se glisser entre la version préliminaire (ébauche) et la version définitive de ce rapport, cette dernière prévaudrait. Rien dans ce rapport n'est mentionné avec l'intention de fournir ou de constituer un avis juridique. Le contenu du présent rapport est de nature confidentielle et exclusive. Il est interdit à toute personne, autre que le Client, de reproduire ou de distribuer ce rapport, de l'utiliser ou de prendre une décision fondée sur son contenu, en tout ou en partie, sans la permission écrite expresse du Client et de SNC-Lavalin.

B. Modifications au projet : Les données factuelles, les interprétations et les recommandations contenues dans ce rapport ont trait au projet spécifique tel que décrit dans le rapport et ne s'appliquent à aucun autre projet ni autre site. Si le projet est modifié du point de vue conception, dimensionnement, emplacement ou niveau, SNC-Lavalin devra être consultée de façon à confirmer que les recommandations déjà données demeurent valides et applicables.

C. Nombre de sondages : Les recommandations données dans ce rapport n'ont pour but que de servir de guide à l'ingénieur en conception. Le nombre de sondages pour déterminer toutes les conditions souterraines qui peuvent affecter les travaux de construction (coûts, techniques, matériel, échancier), devrait normalement être plus élevé que celui pour les besoins du dimensionnement. Le nombre de points d'échantillonnage et d'analyses chimiques ainsi que la fréquence d'échantillonnage et le choix des paramètres peuvent influencer la nature et l'envergure des actions correctives ainsi que les techniques et les coûts de traitement ou de disposition. Les entrepreneurs qui soumissionnent ou qui sous-traitent le travail, devraient compter sur leurs propres études ainsi que sur leurs propres interprétations des résultats factuels des sondages pour apprécier de quelle façon les conditions souterraines peuvent affecter leur travail et les coûts des travaux.

D. Interprétation des données, commentaires et recommandations : À moins d'avis contraire, l'interprétation des données et des résultats, les commentaires et les recommandations contenus dans ce rapport sont fondés, au mieux de notre connaissance, sur les politiques, les critères et les règlements environnementaux en vigueur à l'emplacement du projet et à la date de production du rapport. Si ces politiques, critères et règlements font l'objet de modifications après la soumission du rapport, SNC-Lavalin devra être consultée pour réviser les recommandations à la lumière de ces changements. Lorsqu'aucune politique, critère ou réglementation n'est disponible pour permettre l'interprétation des données et des résultats analytiques, les commentaires ou recommandations exprimés par SNC-Lavalin sont basés sur la meilleure connaissance possible des règles acceptées dans la pratique professionnelle. Les analyses, commentaires et recommandations contenus dans ce rapport sont fondés sur les données et observations recueillies sur le site, lesquelles proviennent de travaux d'échantillonnage effectués sur le site. Il est entendu que seules les données directement recueillies à l'endroit des sondages, des sites d'échantillonnage et à la date de l'échantillonnage sont exactes et que toute interpolation ou extrapolation de ces résultats à l'ensemble ou à une partie du site comporte des risques d'erreurs qui peuvent elles-mêmes influencer la nature et l'ampleur des actions requises sur le site.

2. RAPPORTS DE SONDAGE ET INTERPRÉTATION DES CONDITIONS SOUTERRAINES

A. Description des sols et du roc : Les descriptions des sols et du roc données dans ce rapport proviennent de méthodes de classification et d'identification communément acceptées et utilisées dans la pratique de la géotechnique. La classification et l'identification du sol et du roc font appel à un jugement. SNC-Lavalin ne garantit pas que les descriptions seront identiques en tout point à celles faites par un autre géotechnicien possédant les mêmes connaissances des règles de l'art en géotechnique, mais assure une exactitude seulement à ce qui est communément utilisé dans la pratique de la géotechnique.

B. Conditions des sols et du roc à l'emplacement des sondages : Les rapports de sondage ne fournissent que des conditions du sous-sol à l'emplacement des sondages seulement. Les limites entre les différentes couches sur les rapports de sondage sont souvent approximatives, correspondant plutôt à des zones de transition, et ont donc fait l'objet d'une interprétation. La précision avec laquelle les conditions souterraines sont indiquées, dépend de la méthode de sondage, de la fréquence et de la méthode d'échantillonnage ainsi que de l'uniformité du terrain rencontré. L'espacement entre les sondages, la fréquence d'échantillonnage et le type de sondage sont également le reflet

de considérations budgétaires et de délais d'exécution qui sont hors du contrôle de SNC-Lavalin.

C. Conditions des sols et du roc entre les sondages : Les formations de sol et de roc sont variables sur une plus ou moins grande étendue. Les conditions souterraines entre les sondages sont interpolées et peuvent varier de façon significative des conditions rencontrées à l'endroit des sondages. SNC-Lavalin ne peut en effet garantir les résultats qu'à l'endroit des sondages effectués. Toute interprétation des conditions présentées entre les sondages comporte des risques. Ces interprétations peuvent conduire à la découverte de conditions différentes de celles qui étaient prévues. SNC-Lavalin ne peut être tenu responsable de la découverte de conditions de sol et de roc différentes de celles décrites ailleurs qu'à l'endroit des sondages effectués.

D. Niveaux de l'eau souterraine : Les niveaux de l'eau souterraine donnés dans ce rapport correspondent seulement à ceux observés à l'endroit et à la date indiqués dans le rapport. Ces conditions peuvent varier de façon saisonnière ou suite à des travaux de construction sur le site ou sur des sites adjacents. Ces variations sont hors du contrôle de SNC-Lavalin.

3. NIVEAUX DE CONTAMINATION

Les niveaux de contamination décrits dans ce rapport correspondent à ceux détectés à l'endroit et à la date indiqués dans le rapport. Ces niveaux peuvent varier selon les saisons ou par suite d'activités sur le site à l'étude ou sur des sites adjacents. Ces variations sont hors de notre contrôle. Les niveaux de contamination sont déterminés à partir des résultats des analyses chimiques effectuées sur un nombre limité d'échantillons de sol, d'eau de surface ou d'eau souterraine. La nature et le degré de contamination entre les points d'échantillonnage peuvent varier de façon importante de ceux à ces points. La composition chimique des eaux souterraines à chaque point d'échantillonnage est susceptible de changer en raison de l'écoulement souterrain, des conditions de recharge par la surface, de la sollicitation de la formation investiguée (i.e. puits de pompage ou d'injection à proximité du site) ainsi que de la variabilité saisonnière naturelle. La précision des niveaux de contamination de l'eau souterraine dépend de la fréquence et du nombre d'analyses effectuées. La liste des paramètres analysés est basée sur notre meilleure connaissance de l'histoire du site et des contaminants susceptibles d'être trouvés sur le site et est également le reflet de considérations budgétaires et de délais d'exécution. Le fait qu'un paramètre n'ait pas été analysé n'exclut pas qu'il soit présent à une concentration supérieure au bruit de fond ou à la limite de détection de ce paramètre.

4. SUIVI DE L'ÉTUDE ET DES TRAVAUX

A. Vérification en phase finale : Tous les détails de conception et de construction ne sont pas connus au moment de l'émission du rapport. Il est donc recommandé que les services de SNC-Lavalin soient retenus pour apporter toute la lumière sur les conséquences que pourraient avoir les travaux de construction sur l'ouvrage final.

B. Inspection durant l'exécution : Il est recommandé que les services de SNC-Lavalin soient retenus pendant la construction, pour vérifier et confirmer d'une part que les conditions souterraines sur toute l'étendue du site ne diffèrent pas de celles données dans le rapport et d'autre part, que les travaux de construction n'aient pas un effet défavorable sur les conditions du site.

5. CHANGEMENT DES CONDITIONS

Les conditions de sol décrites dans ce rapport sont celles observées au moment de l'étude. À moins d'indication contraire, ces conditions forment la base des recommandations du rapport. Les conditions de sol peuvent être modifiées de façon significative par les travaux de construction (trafic, excavation, etc.) sur le site ou sur les sites adjacents. Une excavation peut exposer les sols à des changements dus à l'humidité, au séchage ou au gel. Sauf indication contraire, le sol doit être protégé de ces changements ou remaniements pendant la construction. Lorsque les conditions rencontrées sur le site diffèrent de façon significative de celles prévues dans ce rapport, dues à la nature hétérogène du sous-sol ou encore à des travaux de construction, il est du ressort du Client et de l'utilisateur de ce rapport de prévenir SNC-Lavalin des changements et de fournir à SNC-Lavalin l'opportunité de réviser les recommandations de ce rapport. Reconnaître un changement des conditions de sol demande une certaine expérience. Il est donc recommandé qu'un ingénieur géotechnicien expérimenté soit dépêché sur le site afin de vérifier si les conditions ont changé de façon significative.

6. DRAINAGE

Le drainage de l'eau souterraine est souvent requis aussi bien pour des installations temporaires que permanentes du projet. Une conception ou exécution impropre du drainage peut avoir de sérieuses conséquences. SNC-Lavalin ne peut en aucun cas prendre la responsabilité des effets du drainage à moins que SNC-Lavalin ne soit spécifiquement impliqué dans la conception détaillée et le suivi des travaux de construction du système de drainage.

7. CARACTÉRISATION ENVIRONNEMENTALE – PHASE I (Phase I)

Ce rapport a été rédigé suite à des activités de recherche diligentes et à partir d'une évaluation de sources de données ponctuelles ou des renseignements obtenus auprès de tiers et qui peuvent comporter des incertitudes, lacunes ou omissions. Ces sources d'informations sont sujettes à des modifications au fil du temps, par exemple, selon l'évolution des activités sur le terrain à l'étude et ceux environnants. La Phase I n'inclut aucun essai, échantillonnage ou analyse de caractérisation par un laboratoire. Sauf exception, la Phase I s'appuie sur l'observation des composantes visibles et accessibles sur la propriété et celles voisines et qui pourraient porter un préjudice environnemental à la qualité du terrain à l'étude. Les titres de propriété mentionnés dans ce rapport sont utilisés pour identifier les anciens propriétaires du site à l'étude et ils ne peuvent en aucun cas être considérés comme document officiel pour reproduction ou d'autres types d'usages. Enfin, tout croquis, vue en plan ou schéma apparaissant dans le rapport ou tout énoncé spécifiant des dimensions, capacités, quantités ou distances sont approximatifs et sont inclus afin d'assister le lecteur à visualiser la propriété.

Annexe 2

Notes explicatives des rapports de sondage
Rapports de sondage



Un rapport de sondage permet de résumer la stratigraphie des sols et du roc, leurs propriétés ainsi que les conditions d'eau souterraine. Cette note a pour but d'expliquer la terminologie, les symboles et abréviations utilisés.

COUPE STRATIGRAPHIQUE

1. PROFONDEUR – NIVEAU

La profondeur et le niveau des différents contacts stratigraphiques sont donnés par rapport à la surface du terrain à l'endroit des sondages au moment de leur exécution. Les niveaux sont indiqués en fonction d'un système indiqué dans l'entête du rapport de sondage.

2. DESCRIPTION DES SOLS

Les sols sont décrits selon leur nature et leurs propriétés géotechniques.

Les dimensions des particules constituant un sol sont les suivantes :

NOM	DIMENSION (mm)	
Argile	<	0,002
Silt	0,002 -	0,08
Sable	0,08 -	5
Gravier	5 -	80
Caillou	80 -	300
Bloc	>	300

La proportion des divers éléments de sol, définis selon la dimension des particules, est donnée d'après la terminologie descriptive suivante :

TERMINOLOGIE DESCRIPTIVE	PROPORTION DE PARTICULES (%)	
Traces	1 -	10
Un peu	10 -	20
Adjectif (ex. : sableux, silteux)	20 -	35
Et (ex. : sable et gravier)	>	35

2.1 COMPACTITÉ DES SOLS PULVÉRULENTS

La compacité des sols pulvérulents est évaluée à l'aide de l'indice de pénétration « N » obtenu par l'essai de pénétration standard :

COMPACTITÉ	INDICE DE PÉNÉTRATION « N » (coups / 300 mm)	
Très lâche	<	4
Lâche	4 -	10
Compacte ou moyenne	10 -	30
Dense	30 -	50
Très dense	>	50

2.2 CONSISTANCE ET PLASTICITÉ DES SOLS COHÉRENTS

La consistance des sols cohérents est évaluée à partir de la résistance au cisaillement. La résistance au cisaillement non drainé de l'argile intacte (s_u) et de l'argile remaniée (s_r) est mesurée en chantier ou en laboratoire.

CONSISTANCE	RÉSISTANCE AU CISAILLEMENT, s_u (kPa)	
Très molle	<	12
Molle	12 -	25
Ferme	25 -	50
Raide	50 -	100
Très raide	100 -	200
Dure	>	200

PLASTICITÉ	LIMITE DE LIQUIDITÉ, w_L (%)	
Faible	<	30
Moyenne	30 -	50
Élevée	>	50

3. DESCRIPTION DU ROC

Le roc est décrit en fonction de sa nature géologique, de ses caractéristiques structurales et de ses propriétés mécaniques.

L'indice de qualité du roc (RQD) est déterminé selon la norme ASTM D 6032.

CLASSIFICATION	INDICE DE QUALITÉ RQD (%)	
Très mauvaise qualité	<	25
Mauvaise qualité	25 -	50
Qualité moyenne	50 -	75
Bonne qualité	75 -	90
Excellente qualité	90 -	100

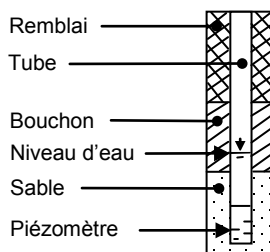
JOINTS	ESPACEMENT MOYEN (mm)	
Très rapprochés	0 -	60
Rapprochés	60 -	200
Moyennement espacés	200 -	600
Espacés	600 -	2000
Très espacés	>	2000

RÉSISTANCE	RÉSISTANCE À LA COMPRESSION UNIAXIALE, q_u (MPa)	
Extrêmement faible	<	1
Très faible	1 -	5
Faible	5 -	25
Moyennement forte	25 -	50
Forte	50 -	100
Très forte	100 -	250
Extrêmement forte	>	250



NIVEAU D'EAU

La colonne « Niveau d'eau » indique le niveau de l'eau souterraine mesuré dans un tube d'observation, un piézomètre, un puits d'observation ou directement dans un sondage. La date du relevé est également indiquée dans cette colonne. Le croquis ci-contre illustre les différents symboles utilisés.



ABRÉVIATIONS

A	Absorption, L/min-m (essai d'eau sous pression)
AC	Analyses chimiques
C	Essai de consolidation
C _c	Coefficient de courbure
C _U	Coefficient d'uniformité
S _u	Résistance au cisaillement à l'état intact, mesurée au scissomètre de chantier, kPa
S _{ur}	Résistance au cisaillement à l'état remanié, mesurée au scissomètre de chantier, kPa
S _{uc}	Résistance au cisaillement à l'état intact, mesurée au pénétromètre à cône (cône suédois), kPa
S _{urc}	Résistance au cisaillement à l'état remanié, mesurée au pénétromètre à cône (cône suédois), kPa
S _{up}	Résistance au cisaillement à l'état intact, mesurée au scissomètre portatif, kPa
S _{rp}	Résistance au cisaillement à l'état remanié, mesurée au scissomètre portatif, kPa
D _r	Densité relative des particules solides
E _M	Module pressiométrique, kPa ou MPa
G	Analyse granulométrique par tamisage et lavage
I _L	Indice de liquidité
I _p	Indice de plasticité, %
k _c	Coefficient de perméabilité (conductivité hydraulique) mesuré en chantier, m/s
k _L	Coefficient de perméabilité (conductivité hydraulique) mesuré en laboratoire, m/s
N _{dc}	Indice de pénétration (essai de pénétration dynamique au cône, DCPT)
N	Indice de pénétration (essai de pénétration standard, SPT)
P ₈₀	Analyse granulométrique par lavage au tamis 80 µm
P _L	Pression limite de l'essai pressiométrique, kPa
P _r	Essai Proctor
γ	Poids volumique, kN/m ³
γ'	Poids volumique déjaugé, kN/m ³
q _u	Résistance à la compression uniaxiale du roc, MPa
R	Refus à l'enfoncement du carottier fendu
S	Analyse granulométrique par sédimentométrie
S _i	Sensibilité (s _v /s _r)
T.A.S.	Taux d'agressivité du sol
w	Teneur en eau, %
w _L	Limite de liquidité, %
w _p	Limite de plasticité, %

ÉCHANTILLONS

1. TYPE ET NUMÉRO

La colonne « Type et numéro » correspond à la numérotation de l'échantillon. Il comprend deux lettres identifiant le type d'échantillonnage, suivi d'un chiffre séquentiel. Les types d'échantillonnage sont les suivants :

CF : carottier fendu	CR : carottier diamanté
CG : carottier grand diamètre	VR : prélèvement manuel
TM : tube à paroi mince	ET : tarière
TU : tube échantillonneur en plastique (Geoprobe)	

2. ÉTAT

La profondeur, la longueur et l'état de chaque échantillon sont indiqués dans cette colonne. Les symboles suivants illustrent l'état de l'échantillon :



3. RÉCUPÉRATION

La récupération de l'échantillon correspond à la longueur récupérée de l'échantillon par rapport à la longueur de l'enfoncement de l'échantillonneur, exprimée en pourcentage.

ESSAIS IN SITU ET EN LABORATOIRE

Les résultats des essais effectués en chantier et en laboratoire sont indiqués dans les colonnes « Essais in situ et en laboratoire » à la profondeur correspondante.

La liste d'abréviations suivante sert à identifier ces essais.

CLIENT : Rio Tinto Alcan
PROJET : Analyse de stabilité du talus, pointe Langevin
ENDROIT : Pointe Langevin
DOSSIER : 646712

FORAGE : F-01-17
DATE : 2017-06-07
COORDONNÉES :
E : 408819 **N** : 5403201

PROFONDEUR (m)	ÉLEVATION (m)	DESCRIPTION	ÉCHANTILLONS					ESSAIS IN-SITU ET EN LABORATOIRE				
			CALIBRE	TYPE ET NUMÉRO	ÉTAT	RÉCUPÉRATION (%)	N ou RQD (%)	TENEUR EN EAU ET LIMITES D'ATTERBERG (%)				AUTRES ESSAIS
								W _p	W _L	W		
							20	40	60	80		
	101,40	Sable fin à moyen avec traces de silt. Compacité lâche à moyenne.										
1			B	CF-1		20	7					
			B	CF-2		41	12					
2			B	CF-3		75	10					
			B	CF-4		82	8					
3			B	CF-5		62	7					G
			B	CF-6		87	7					
4			B	CF-7		49	9					
			B	CF-8		66	11					
5			B	CF-9		49	9					
			B	CF-10		100	6					
6			B	CF-11		74	13					
7												
8												

REMARQUES : PDM: Poids du marteau.

EFFECTUÉ PAR : V. Gauthier, tech.

APPROUVÉ PAR : N. Masson, ing.

MÉTHODE DE FORAGE : D-50

F:\Geotec\80\Style_projet\646712-LOG-BH-NOTE-2014\FM.sty PLOTTED: 2017-06-23 15:24 hrs

CLIENT : Rio Tinto Alcan
PROJET : Analyse de stabilité du talus, pointe Langevin
ENDROIT : Pointe Langevin
DOSSIER : 646712

FORAGE : F-01-17
DATE : 2017-06-07
COORDONNÉES :
E : 408819 **N** : 5403201

PROFONDEUR (m)	ÉLEVATION (m)	DESCRIPTION	NIVEAU D'EAU 2017-06-08	ÉCHANTILLONS				ESSAIS IN-SITU ET EN LABORATOIRE					
				CALIBRE	TYPE ET NUMERO	ÉTAT	RÉCUPÉRATION (%)	N ou RQD (%)	TENEUR EN EAU ET LIMITES D'ATTERBERG (%)				AUTRES ESSAIS
									W _p	W	W _L		
							20	40	60	80			
9				B	CF-12		100	8					
10				B	CF-13		51	27					
				B	CF-14		67	11					
11				B	CF-13-16 CF-15		70	3					G
				B	CF-16		38	10					
12				B	CF-17		38						N: PDM
13				B	CF-18		100	13					
14				B	CF-19		54	9					
				B	CF-20		69	8					
15	15,24	86,16		B	CF-21		69	14					
16													

REMARQUES : PDM: Poids du marteau.

EFFECTUÉ PAR : V. Gauthier, tech.

APPROUVÉ PAR : N. Masson, ing.

MÉTHODE DE FORAGE : D-50

CLIENT : Rio Tinto Alcan
PROJET : Analyse de stabilité du talus, pointe Langevin
ENDROIT : Pointe Langevin
DOSSIER : 646712

FORAGE : F-01-17
DATE : 2017-06-07
COORDONNÉES :
E : 408819 **N** : 5403201

PROFONDEUR (m)	ÉLEVATION (m)	DESCRIPTION	NIVEAU D'EAU 2017-06-08	ÉCHANTILLONS				ESSAIS IN-SITU ET EN LABORATOIRE					
				CALIBRE	TYPE ET NUMÉRO	ÉTAT	RÉCUPÉRATION (%)	N ou RQD (%)	TENEUR EN EAU ET LIMITES D'ATTERBERG (%)				AUTRES ESSAIS
									W _p	W	W _L		
							20	40	60	80			
16.76	84.64	Silt avec un peu de sable fin et traces d'argile. Compacité moyenne.		B	CF-22		79	9					S
17				B	CF-23		72	10					
17.98	83.42			B	CF-24		82	14					
		Fin du forage											
19													
20													
21													
22													
23													
24													

REMARQUES : PDM: Poids du marteau.

EFFECTUÉ PAR : V. Gauthier, tech.

APPROUVÉ PAR : N. Masson, ing.

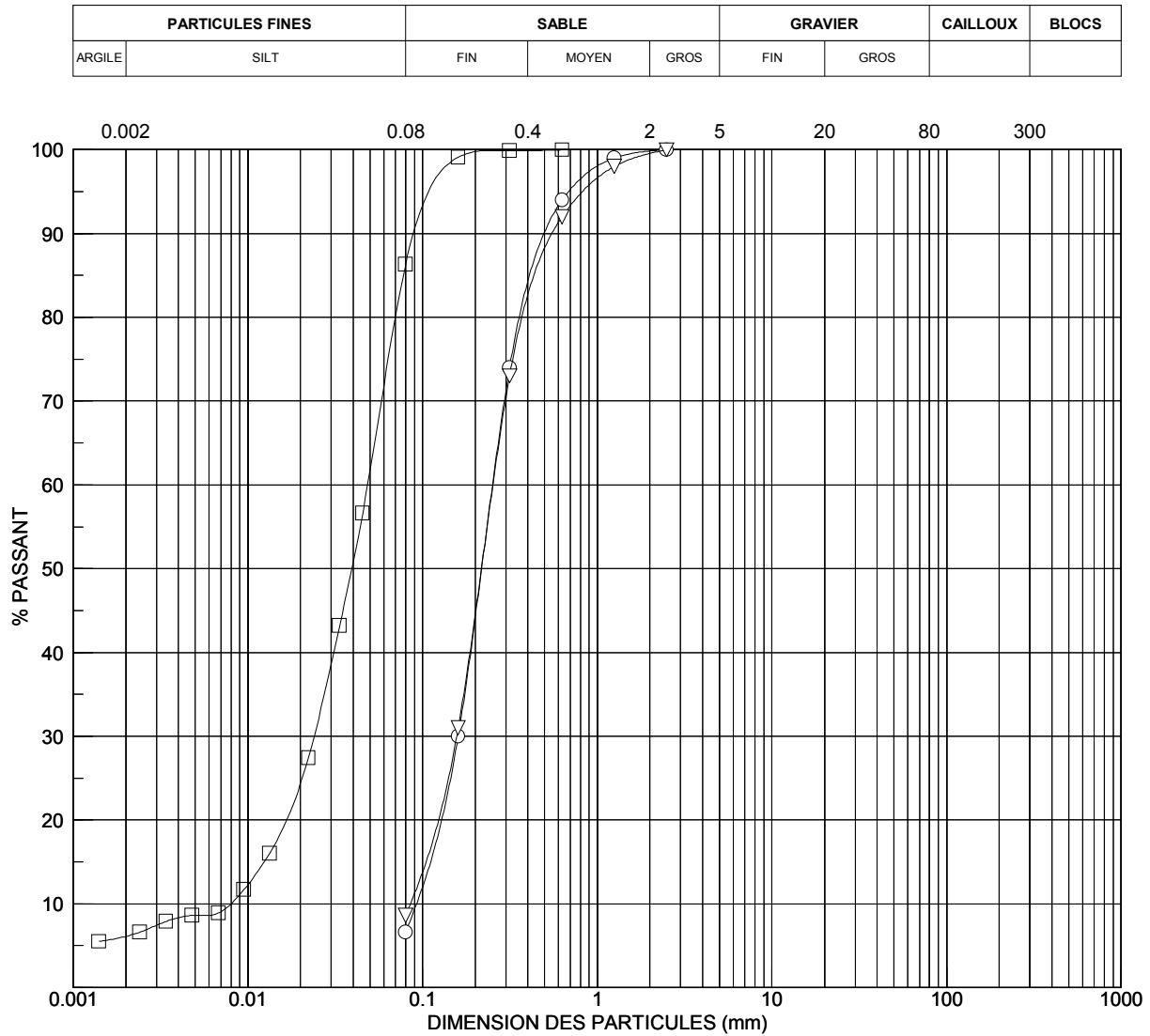
MÉTHODE DE FORAGE : D-50

Annexe 3

Résultats des essais géotechniques en laboratoire

CLIENT : Rio Tinto Alcan
 PROJET : Analyse de stabilité du talus, pointe Langevin
 LOCALISATION : Pointe Langevin
 DOSSIER : 646712

FIGURE 1



	Sondage	Éch.	Prof. (m)	Description	Gravier (%)	Sable (%)	Silt & argile (%)
○	F-01-17	CF-13-16	9,14 - 11,89	Sable, traces de silt.	0.0	93.4	6.6
□	F-01-17	CF-23-24	16,76 - 17,98	Silt, un peu de sable, traces d'argile.	0.0	13.7	86.3
▽	F-01-17	CF-3-6	1,52 - 4,27	Sable, traces de silt.	0.0	91.4	8.6



Remarques:

Annexe 4

Dessin 646712-01 : Localisation des sondages



LÉGENDE :

- F-01-17 104,1 m  Forage, numéro niveau
-  Section (par d'autres)



CLIENT : Rio Tinto, Programme de stabilisation des berges du Lac-St-Jean

PROJET : Analyse de stabilité du talus

ENDROIT : Pointe Langevin, Dolbeau-Mistassini

TITRE : Localisation du forage

ÉCHELLE : 1:2500

DATE : 2017-08-22	DOSSIER : 646712	DESSIN : 646712-01
-------------------	------------------	--------------------

V:\Projets\646712_RT_Pointe Langevin\4_Realisation\ Dessin\En cours\646712.dwg

ANNEXE

E ANALYSES DE STABILITÉ GÉOTECHNIQUE

