



La turbidité de la rivière Tasiapik (Umiujaq, Nunavik) en lien avec la dégradation du pergélisol

Mémoire

Frédéric Manseau

Maîtrise en sciences géographiques - avec mémoire
Maître en sciences géographiques (M. Sc. géogr.)

Québec, Canada

La turbidité de la rivière Tasiapik (Umiujaq, Nunavik) en lien avec la dégradation du pergélisol

Mémoire

Frédéric Manseau

Sous la direction de :

Najat Bhiry, directrice de recherche
John Molson, codirecteur de recherche

Résumé

Les causes de la variation de la turbidité des cours d'eau ont été examinées dans le cadre de plusieurs études, et ce, dans de nombreuses régions du monde. Toutefois, les connaissances sur les liens entre la variation de la turbidité et la dégradation du pergélisol sont limitées. Les travaux menés dans les régions arctiques et subarctiques démontrent l'accélération de la dégradation du pergélisol durant les dernières décennies, provoquant des tassements importants du sol et ainsi, un accroissement du fluage d'eau chargée de sédiments vers les lacs et les cours d'eau. Cette étude vise à mieux comprendre la variation spatio-temporelle de la turbidité fluviale en contexte périglaciaire dans le but de contribuer aux connaissances globales des impacts des changements climatiques sur les processus hydrogéomorphologiques des régions nordiques. Des données sur la turbidité d'un cours d'eau et ses affluents, situés à 5 km à l'est du village d'Umiujaq (Nunavik), ont été récoltées lors de l'été 2019 dans six sites présentant des caractéristiques géomorphologiques distinctes. Des analyses statistiques ont été réalisées sur ces enregistrements, en lien avec des données de températures atmosphériques, de précipitations et de débit disponibles. Les résultats ont démontré l'importance de ces paramètres dans la variation de la turbidité de la rivière Tasiapik. Les analyses statistiques indiquent qu'il existe une corrélation significative entre les températures atmosphériques et la turbidité de la rivière, avec des coefficients de corrélation de Pearson atteignant 0,72. Ces relations sont plus ou moins importantes selon l'emplacement échantillonné sur la rivière ainsi que la période de l'année : l'influence des températures atmosphériques sur la turbidité est plus forte au début de l'été, suite à la fonte nivale. Bien que les conditions météorologiques jouent un rôle important dans la variation de la turbidité, il s'est avéré difficile de prédire la charge sédimentaire de la rivière en se basant seulement sur ces paramètres. Les caractéristiques du site telles que la topographie, la nature des dépôts de surface ainsi que la présence de lacs thermokarstiques sont des facteurs importants dans la dynamique du transport sédimentaire de la rivière Tasiapik.

Table des matières

Résumé	ii
Table des matières	iii
Liste des figures.....	v
Liste des tableaux.....	ix
Remerciements.....	xi
Introduction	1
Mise en contexte	1
Objectifs et hypothèses	6
Chapitre 1. Région et sites d'études	7
Contexte géologique.....	8
Climat et végétation.....	8
Sites d'étude.....	10
Chapitre 2. Méthodologie.....	11
Instrumentation terrain.....	11
Turbidimètres	11
Données météorologiques et débit.....	15
Relevés topographiques	16
Caméra	16
Calibration	17
Analyses en laboratoire	18
Analyses granulométriques.....	18
Analyses statistiques	19
Corrélations.....	19
ANOVA.....	20
Sélection de modèles.....	20
Boucles d'hystérésis.....	21
Chapitre 3. Résultats	22
Caractérisation de la vallée et portrait hydrologique.....	22
Zone de production	22
Zone de transfert.....	22
Zone de stockage.....	31

Conditions météorologiques et débit	32
Températures atmosphériques	32
Précipitations.....	32
Débit.....	33
Dynamique du transport sédimentaire.....	34
Observations globales.....	34
Événements ponctuels.....	38
Corrélations.....	45
ANOVA.....	51
Sélection de modèles.....	56
Boucles d'hystérésis	59
Chapitre 4. Discussion	69
Variations de la turbidité et facteurs déclencheurs	71
Mouvements de masse	71
Processus thermokarstiques.....	74
Débit.....	75
Précipitations.....	76
Conclusion	81
Bibliographie	84
Annexe A - Résultats des analyses de variances.....	89
Température atmosphérique et débit	89
Précipitation et débit.....	89
Annexe B - Résultats des comparaisons multiples	90
Température atmosphérique et débit	90
Précipitation et débit.....	90
Annexe C - Résultats des sélections de modèles.....	91
Tableau d' AIC_c	91
Sommaire du modèle 10	91
Sommaire du modèle 6	91
Annexe D - Résultats des inférence multimodèles	93
Variable débit	93
Variable température atmosphérique 48h	93
Variable précipitation	93

Liste des figures

Figure 1. Dégradation d'une butte de pergélisol (flèche rouge) et formation d'une mare thermokarstique dans la vallée Tasiapik.	3
Figure 2. Cours d'eau principal de la vallée Tasiapik le a) 16 juin 2018 lors de la fonte des neiges et le b) 20 septembre 2018. La turbidité enregistrée à ces moments était de 105 et 7 UTN respectivement.	3
Figure 3. Localisation de la vallée Tasiapik, à proximité du village d'Umiujaq, Nunavik. Source : Ministère des Ressources naturelles et de la faune.	7
Figure 4. Exemple d'un turbidimètre RBRSolo ³ Tu utilisé dans le cadre de ce projet. Source : RBR Ltd. (2018).	12
Figure 5. Configuration pour l'installation des turbidimètres lors de l'été 2019. Le grillage en noir limite l'accumulation de matières organiques provenant de l'amont et le plastique blanc limite l'influence que peut occasionner le rayonnement solaire direct.	12
Figure 6. Configuration pour l'installation des turbidimètres lors de l'été 2019. Les turbidimètres étaient installés sur des blocs de béton et déposés sur le lit de la rivière.	13
Figure 7. Délimitation du bassin versant de la vallée Tasiapik et les différentes zones du cours d'eau (zone de production, de transfert et de stockage) ainsi que la localisation des sites d'études avec l'emplacement des turbidimètres installés dans la rivière, des transects effectués, de la station météorologique SILA et du système de jaugeage. Source : Ministère des Ressources naturelles et de la Faune.	14
Figure 8. Identification des différentes zones d'une rivière. Adaptation de : Schumm, S. A. (1977). The fluvial system. New York: John Wiley & Sons, Ltd.	15
Figure 9. Caméra automatisée (flèche rouge) installée sur la rive gauche de la rivière Tasiapik, à proximité du T2.	16
Figure 10. Relation UTN-MES obtenue suite à la calibration des turbidimètres : $MES = 1.5387 \times UTN + 9.1929$ ($r^2 = 0,84$, $n = 19$).	18
Figure 11. Représentation de la nature des dépôts de surface, de la végétation et de la topographie des sites obtenue par des transects réalisés perpendiculairement à la rivière. Les profils topographiques ont une exagération verticale de 3x. h) Carte de localisation des transects effectués dans la vallée Tasiapik. Source : Ministère des Ressources naturelles et de la Faune.	23
Figure 12. Avulsion créée par le déracinement des arbres situés sur les berges de la rivière, où on observe des processus d'érosion importants.	24
Figure 13. Tassement du sol observé à proximité du T5.	25
Figure 14. Différence de turbidité entre les eaux provenant de l'affluent nord à droite, et les eaux provenant du cours d'eau principal (rivière Tasiapik), à gauche.	26
Figure 15. Lithalse en amont du T2, juin 2018.	27
Figure 16. Lithalse en amont du T2, juin 2019. Une partie de la berge s'est effondrée (flèche rouge).	28

Figure 17. Lithalse en amont du T2, octobre 2019. L'effondrement du sol a causé la rupture complète d'une partie de la berge (flèche rouge).....	28
Figure 18. Tronçon de la rivière en amont du T6; on observe des bancs de sable végétalisés et d'autres non végétalisés ainsi que des rides de courants asymétriques sur ces derniers.....	29
Figure 19. Buttes de pergélisol en dégradation à proximité du T6.....	30
Figure 20. Ostiole d'environ 20 cm de diamètres sur une lithalse à proximité du T6.....	30
Figure 21. Banc d'accumulation sur les berges de la rivière Tasiapik formé par l'apport sédimentaire provenant de petits ruisseaux qui s'écoulent perpendiculairement à la rivière.	31
Figure 22. Moyennes quotidiennes de la turbidité de la rivière Tasiapik à la station T1 (UTN), des températures atmosphériques moyennes (°C), des précipitations totales (mm) et du débit moyen de la rivière (l/s) entre le 25 juin et le 4 octobre 2019. Source : Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques.....	36
Figure 23. Moyennes quotidiennes de la turbidité de la rivière Tasiapik à la station T2 (UTN), des températures atmosphériques moyennes (°C), des précipitations totales (mm) et du débit moyen de la rivière (l/s) entre le 25 juin et le 4 octobre 2019. Source : Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques.....	36
Figure 24. Moyennes quotidiennes de la turbidité de la rivière Tasiapik à la station T4 (UTN), des températures atmosphériques moyennes (°C), des précipitations totales (mm) et du débit moyen de la rivière (l/s) entre le 25 juin et le 4 octobre 2019. Source : Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques.....	37
Figure 25. Moyennes quotidiennes de la turbidité de la rivière Tasiapik à la station T5 (UTN), des températures atmosphériques moyennes (°C), des précipitations totales (mm) et du débit moyen de la rivière (l/s) entre le 25 juin et le 4 octobre 2019. Source : Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques.....	37
Figure 26. Moyennes quotidiennes de la turbidité de la rivière Tasiapik à la station T6 (UTN), des températures atmosphériques moyennes (°C), des précipitations totales (mm) et du débit moyen de la rivière (l/s) entre le 25 juin et le 4 octobre 2019. Source : Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques.....	38
Figure 27. Moyennes quotidiennes de la turbidité de la rivière Tasiapik à la station T7 (UTN), des températures atmosphériques moyennes (°C), des précipitations totales (mm) et du débit moyen de la rivière (l/s) entre le 25 juin et le 4 octobre 2019. Source : Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques.....	38
Figure 28. Données horaires récoltées entre le 24 juin et le 4 octobre 2019 dans la vallée Tasiapik : a) les températures atmosphériques moyennes, b) les précipitations totales, c) le débit de la rivière et sa turbidité aux sites d) T1, e) T2, f) T4, g) T5, h) T6, i) T7. Source : Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques.	39
Figure 29. Données sur la turbidité de la rivière Tasiapik au site T2, les températures atmosphériques, les précipitations et le débit de la rivière lors de la période du 25 au 27 juin 2019. Source : Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques.	40

Figure 30. Enregistrements sur la turbidité de la rivière Tasiapik au site T1, les températures atmosphériques, les précipitations et le débit de la rivière lors de la période du 16 au 18 juillet 2019. Source : Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques.	42
Figure 31. Enregistrements horaires sur la turbidité de la rivière Tasiapik au site T1, les températures atmosphériques, les précipitations et le débit de la rivière lors de la période chaude du 25 au 27 juin 2019. Source : Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques.....	49
Figure 32. Enregistrements horaires sur la turbidité de la rivière Tasiapik au site T4, les températures atmosphériques, les précipitations et le débit de la rivière entre les 10 et 12 juillet 2019. Source : Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques.	51
Figure 33. Résultats de l'ANOVA sur les effets a) des températures atmosphériques et du débit sur la turbidité et b) des précipitations sous forme de pluie et du débit sur la turbidité. Les analyses ont été effectuées sur les mesures horaires de l'ensemble de la rivière. Les données sur les températures atmosphériques, les précipitations et le débit de la rivière ont été séparées en trois classes : < 6 °C correspond à la classe T 1; 6–15 °C à la classe T 2; > 15 °C à la classe T 3. L'absence de précipitations correspond à la classe P 1; 0.1-2,5 mm/h à la classe P 2; > 2,5 mm/h à la classe P 3. Un débit de <10 l/s correspond à la classe Q 1; 10-40 l/s à la classe Q 2; > 40 l/s à la classe Q 3. Source : Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques.	52
Figure 34. Résultats de l'ANOVA quant aux effets des températures atmosphériques et du débit de la rivière sur la turbidité pour chacun des sites; a) T1, b) T2, c) T4, d) T5, e) T6 et f) T7. Les analyses ont été effectuées sur les mesures horaires. Les données sur les températures atmosphériques et le débit de la rivière ont été séparés en trois classes : < 6 °C correspond à la classe T 1; 6-15 °C à la classe T 2; > 15 °C à la classe T 3. Un débit de <10 l/s correspond à la classe Q 1; 10-40 l/s à la classe Q 2; >40 l/s à la classe Q 3. Source : Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques.	54
Figure 35. Résultats de l'ANOVA sur les effets des précipitations sous forme de pluie et du débit de la rivière sur la turbidité pour chacun des sites; a) T1, b) T2, c) T4, d) T5, e) T6 et f) T7. Les analyses ont été effectuées sur les données horaires. Les données sur les précipitations et le débit de la rivière ont été séparées en trois classes : l'absence de précipitations correspond à la classe P 1; 0.1-2,5 mm/h à la classe P 2; > 2,6 mm/h à la classe P 3, un débit de <10 l/s correspond à la classe Q 1; 10-40 l/s à la classe Q 2; >40 l/s à la classe Q 3. Source : Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques.....	56
Figure 36. Représentation des boucles d'hystérésis de 12 événements hydrologiques observés dans la rivière Tasiapik à l'été 2019 au site T1 : a) 25-26 juin, b) 26-27 juin, c) 11-12 juillet, d) 16-17 juillet, e) 20-21 juillet, f) 15-16 août, g) 17 août, h) 19-20 août, i) 30-31 août, j) 22-23 septembre, k) 26-27 septembre et l) 27-28 septembre.....	62
Figure 37. Représentation des boucles d'hystérésis de 12 événements hydrologiques observés dans la rivière Tasiapik à l'été 2019 au site T2 : a) 25-26 juin, b) 26-27 juin, c) 11-12 juillet, d) 16-17 juillet, e) 20-21 juillet, f) 15-16 août, g) 17 août, h) 19-20 août, i) 30-31 août, j) 22-23 septembre, k) 26-27 septembre et l) 27-28 septembre.....	63
Figure 38. Représentation des boucles d'hystérésis de 12 événements hydrologiques observés dans la rivière Tasiapik à l'été 2019 au site T4 : a) 25-26 juin, b) 26-27 juin, c) 11-12 juillet, d) 16-17 juillet, e) 20-21 juillet, f) 15-16 août, g) 17 août, h) 19-20 août, i) 30-31 août, j) 22-23 septembre, k) 26-27 septembre et l) 27-28 septembre.....	64

Figure 39. Représentation des boucles d’hystérésis de 12 événements hydrologiques observés dans la rivière Tasiapik à l’été 2019 au site T5 : a) 25-26 juin, b) 26-27 juin, c) 11-12 juillet, d) 16-17 juillet, e) 20-21 juillet, f) 15-16 août, g) 17 août, h) 19-20 août, i) 30-31 août, j) 22-23 septembre, k) 26-27 septembre et l) 27-28 septembre.....	65
Figure 40. Représentation des boucles d’hystérésis de 12 événements hydrologiques observés dans la rivière Tasiapik à l’été 2019 au site T6 : a) 25-26 juin, b) 26-27 juin, c) 11-12 juillet, d) 16-17 juillet, e) 20-21 juillet, f) 15-16 août, g) 17 août, h) 19-20 août, i) 30-31 août, j) 22-23 septembre, k) 26-27 septembre et l) 27-28 septembre.....	66
Figure 41. Représentation des boucles d’hystérésis de 12 événements hydrologiques observés dans la rivière Tasiapik à l’été 2019 au site T7 : a) 25-26 juin, b) 26-27 juin, c) 11-12 juillet, d) 16-17 juillet, e) 20-21 juillet, f) 15-16 août, g) 17 août, h) 19-20 août, i) 30-31 août, j) 22-23 septembre, k) 26-27 septembre et l) 27-28 septembre.....	67
Figure 42. Enregistrements horaires sur les précipitations et les températures atmosphériques dans la vallée Tasiapik, ainsi que le débit et la turbidité de la rivière Tasiapik au site T4 lors de l’été 2019 : a) 15 août, b) 30-31 août et c) 26 septembre. Source : Ministère de l’Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques.....	70
Figure 43. Modèle conceptuel représentant des exemples d’événements de hausse de la turbidité au cours de l’été ainsi que les causes engendrant ces augmentations. A) Photos prises par la caméra automatisée, à proximité du site T2, le 7 juin et b) le 19 juin 2019, lors d’un niveau d’eau semblable. Les épisodes de précipitations intenses durant cette période ont engendré des mouvements de masse, où les sédiments se sont accumulés au pied de la butte cryogène. C) Lors d’épisodes de précipitations intenses, une eau chargée en sédiments s’écoule des lacs de thermokarst vers la rivière, d-e) où les sédiments s’accumulent à l’embouchure des ravins.....	78

Liste des tableaux

Tableau 1. Turbidité moyenne (UTN) des six stations de la rivière Tasiapik en 2019. Les données furent récoltées entre le 25 juin et le 4 octobre.	35
Tableau 2. Cinq plus importants événements de turbidité pour chacun des sites lors de l'été 2019, indiquant le maximum atteint lors de chaque événement, la turbidité de la rivière avant l'événement ainsi que les contextes météorologiques et d'écoulement observé avant et pendant la hausse.	44
Tableau 3. Corrélations entre la turbidité et les températures atmosphériques, les précipitations et le débit pour l'ensemble de la rivière Tasiapik ainsi que pour les six stations installées à l'été 2019. Les données proviennent de moyennes quotidiennes récoltées entre le 25 juin et le 4 octobre 2019. Le tableau des résultats comprend le coefficient de corrélation de Pearson pour chacune des relations ainsi que les tests d'hypothèse : les valeurs en gras indiquent une corrélation significative ($p = 0$ **** 0.001 *** 0.01 * 0.05). Source : Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques.	46
Tableau 4. Corrélations entre la turbidité et les températures atmosphériques, les précipitations et le débit pour l'ensemble de la rivière Tasiapik ainsi que pour les six stations installées à l'été 2019. Les analyses ont été effectuées sur les données horaires récoltées entre le 25 juin et le 4 octobre 2019. Le tableau des résultats comprend le coefficient de corrélation de Pearson pour chacune des relations ainsi que les tests d'hypothèse : les indices en gras indiquent une corrélation significative ($p = 0$ **** 0.001 *** 0.01 * 0.05). Source : Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques.	47
Tableau 5. Corrélations entre la turbidité et les températures atmosphériques, les précipitations et le débit pour l'ensemble de la rivière Tasiapik ainsi que pour les six stations installées à l'été 2019. Les analyses ont été effectuées sur les données horaires comprenant seulement les périodes de températures atmosphériques élevées (> 15 °C), récoltées entre le 25 juin et le 4 octobre 2019. Le tableau des résultats comprend le coefficient de corrélation de Pearson pour chacune des relations ainsi que les tests d'hypothèse : les indices en gras indiquent une corrélation significative ($p = 0$ **** 0.001 *** 0.01 * 0.05). Source : Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques.	48
Tableau 6. Corrélations entre la turbidité et les températures atmosphériques, les précipitations et le débit pour les six stations installées à l'été 2019 dans la rivière Tasiapik. Les données proviennent d'enregistrements horaires récoltés entre les 25 et 27 juin 2019, alors que les températures atmosphériques sont demeurées relativement élevées. Le tableau des résultats comprend le coefficient de corrélation de Pearson pour chacune des relations ainsi que les tests d'hypothèse : les indices en gras indiquent une corrélation significative ($p = 0$ **** 0.001 *** 0.01 * 0.05). Source : Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques.	50
Tableau 7. Corrélations entre la turbidité et les températures atmosphériques, les précipitations et le débit pour l'ensemble de la rivière Tasiapik ainsi que pour les six stations installées à l'été 2019. Les analyses ont été effectuées sur les données horaires comprenant seulement les périodes de précipitations d'intensité modérée ou forte ($> 2,5$ mm/h), récoltées entre le 25 juin et le 4 octobre 2019. Le tableau des résultats comprend le coefficient de corrélation de Pearson pour chacune des relations ainsi que les tests d'hypothèse : les indices en gras indiquent une corrélation significative ($p = 0$ **** 0.001 *** 0.01 * 0.05). Source : Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques.	50

Tableau 8. Présentation des paramètres inclus dans chacun des modèles candidats utilisés dans la sélection de modèles.	57
Tableau 9. Tableau d'AIC _c classé du modèle le plus probable au moins probable.	58
Tableau 10. Synthèse des boucles d'hystérésis observées dans la rivière Tasiapik à l'été 2019. Le tableau présente le nombre de boucles observées dans chacun des six sites, selon le type d'hystérésis.	68

Remerciements

Je tiens à remercier spécialement ma directrice de recherche, Najat Bhiry, professeure au département de géographie de l'Université Laval, pour ses conseils, sa disponibilité et pour m'avoir permis de découvrir le Nord durant ces dernières années. Un énorme merci également à mon codirecteur, John Molson, professeur au département de géologie et de génie géologique, et à Mme Danielle Cloutier, chargée d'enseignement à la Faculté de foresterie, de géographie et de géomatique, pour les discussions, leur temps investi et les multiples connaissances qu'ils m'ont transmis. Je voudrais également remercier l'équipe d'hydrogéologues du Centre d'études nordiques pour la transmission de données hydrologiques ainsi que la merveilleuse communauté d'Umiujaq et le personnel du parc Tursujuq pour leur accueil chaleureux. Merci également à Madiha Khadhraoui et Jérémy Grenier d'avoir donné de leur temps pour venir m'aider sur le terrain à Umiujaq. Finalement, j'aimerais remercier mes collègues et amis pour leurs judicieux conseils. Un merci particulier à Chanèle qui a été présente tout au long de ma maîtrise; son soutien et ses encouragements ont énormément aidé à l'accomplissement de ce mémoire. Ce projet de maîtrise a été possible grâce au support financier de Sentinelle Nord.

Introduction

Mise en contexte

Les régions arctiques et subarctiques sont parmi les endroits les plus affectés par les changements climatiques; au cours des 30 dernières années, l'augmentation des températures atmosphériques a été deux fois plus élevée dans ces régions que la moyenne globale et continuera à augmenter plus rapidement que dans les autres régions du globe (IPCC, 2014). Selon les modèles développés par Ouranos (2015), les températures atmosphériques au Nunavik augmenteront de 1,9 °C à 5,8 °C d'ici 2050 par rapport aux observations de 1971-2000. Dans les milieux nordiques, les environnements terrestres et aquatiques subissent des modifications considérables en raison des changements climatiques, ce qui a des répercussions non seulement sur la faune et la flore, mais aussi sur les communautés qui y vivent. De nombreuses recherches ont démontré que le pergélisol et les formes de terrain qui y sont associées (p. ex., paises et lithales) se dégradent alors que les processus thermokarstiques résultant de la dégradation du pergélisol s'accroissent (p. ex., Figure 1). Cela a été observé dans plusieurs régions : au Nunavik (p. ex., Arlen-Pouliot et Bhiry, 2005; Vallée et Payette, 2007; Jolivel et Allard, 2013; Fillion et al., 2014; Beck et al., 2015) aux États-Unis (Alaska) (p. ex., Jorgenson et al., 2006), en Norvège (p. ex., Sollid et Sørbel, 1998), en Finlande (p. ex., Luoto et Seppälä, 2003) et en Russie (p. ex., Romanovsky et al., 2010). Dans la région d'Umiujaq, au Nunavik, des modèles prévoient une dégradation du pergélisol à un rythme moyen de 12 cm/an dans sa partie supérieure et de 80 cm/ an à sa base (Dagenais et al., 2020). La dégradation du pergélisol est, entre autres, responsable du relâchement de gaz à effet de serre dans l'atmosphère (p. ex., Schuur et al., 2015; Matveev et al., 2016) et de l'augmentation de l'instabilité des infrastructures (routes, piste d'atterrissage et bâtiments), tel qu'observé au Nunavik (p. ex., Allard et al., 2007; Fortier et al., 2011; Doré et al., 2014). Par ailleurs, certains auteurs ont démontré que l'augmentation des températures atmosphériques engendre un accroissement de l'apport sédimentaire dans les rivières des régions de hautes latitudes, provoquant ainsi une augmentation de la turbidité dans les environnements aquatiques (Syvitski, 2002; Lewis et al., 2005; Lamoureux et Lafrenière, 2009; Kokelj et al., 2013; Jolivel et Allard, 2017).

La turbidité est une mesure de l'aspect trouble d'un liquide causé par les particules fines (généralement de 0 à 0,25 mm) qui reflètent la lumière pénétrant dans ce liquide. C'est une composante importante de la qualité de l'eau d'une rivière puisqu'elle est indicatrice de la concentration de matière en

suspension dans l'eau. La turbidité des eaux des rivières de la plupart des régions est bien étudiée puisqu'elle est à l'origine de perturbations dans les réseaux trophiques des rivières. Elle est, entre autres, responsable de la diminution du taux de succès de prédation de certaines espèces de poissons (Minello et Benfield, 2018) ainsi que d'une modification de la structure de leurs branchies (Cumming et Herbert, 2016). En plus des effets sur les organismes aquatiques, de hauts niveaux de turbidité dans l'eau peuvent affecter l'efficacité de certains systèmes de traitement des eaux. C'est le cas des systèmes aux ultra-violets, dont leur efficacité à éliminer les bactéries hétérotrophes diminue lorsque l'eau à traiter est plus turbide. En effet, Gullian et al. (2012) ont démontré que l'efficacité d'un système de traitement de l'eau est de 90% sur de l'eau à 9,9 unités de turbidité néphélométrique (UTN), alors qu'elle est de 60% sur de l'eau à 16,3 UTN. Les UTN dépendent principalement de la charge sédimentaire en suspension dans l'eau. À titre d'exemple, la turbidité du cours d'eau à l'étude le 16 juin 2018 était de 105 UTN (Figure 2a), et de 7 UTN le 20 septembre 2018 (Figure 2b). 105 UTN représentent une valeur relativement élevée; la turbidité de l'eau potable se situe généralement entre 0,05 et 1,5 UTN tandis que celle de l'eau à la sortie d'une station d'épuration se situe entre 4 et 20 UTN. Les travaux de certains auteurs ont démontré que plusieurs facteurs peuvent mener à des imprécisions dans les données enregistrées par les turbidimètres. Par exemple, Downing (2006) a démontré que, même si la charge de sédiments en suspension de différentes rivières est égale, les valeurs UTN varient en fonction de la taille des particules et du type de sédiments. D'autres travaux ont aussi démontré une imprécision dans les données en raison de facteurs biologiques, comme la présence de phytoplanctons dans l'eau et l'accumulation d'algues sur les capteurs qui interfèrent dans l'émission de la lumière infrarouge projetée par les capteurs OBS (Schoellhamer, 1993; Downing, 2006).

Les causes expliquant la variation de la turbidité dans les rivières ont été liées à plusieurs facteurs. L'intensité des précipitations, favorisant le transport des sédiments disponibles sur la surface du sol vers les rivières, ainsi que le débit d'un cours d'eau, qui accroît la quantité de sédiments mis en suspension, sont des causes majeures de la variation de turbidité interannuelle (Lawler et al., 2006; Hamilton et Luffman, 2009). La taille et la topographie du bassin de drainage jouent aussi un rôle majeur dans l'apport de sédiments vers les rivières; en général, plus la topographie du bassin de drainage est accentuée et que sa superficie est grande, plus la charge sédimentaire transportée par les rivières du bassin est importante (Milliman et Syvitski, 1992). La géologie et le couvert végétal du bassin versant sont également des facteurs importants puisqu'ils influencent le taux d'érosion ainsi que

la disponibilité en sédiments à la surface du sol (Inman et Jenkins, 1999). Toutefois, dans un contexte où les changements climatiques affectent fortement les régions nordiques, ayant comme conséquence une accélération de la dégradation du pergélisol, les connaissances sur la variation de la turbidité dans ces environnements restent limitées et méritent une attention particulière.



Figure 1. Dégradation d'une butte de pergélisol (flèche rouge) et formation d'une mare thermokarstique dans la vallée Tasiapik.



Figure 2. Cours d'eau principal de la vallée Tasiapik le a) 16 juin 2018 lors de la fonte des neiges et le b) 20 septembre 2018. La turbidité enregistrée à ces moments était de 105 et 7 UTN respectivement.

Dans les environnements nordiques, différents auteurs ont démontré que la majorité de la charge sédimentaire transportée annuellement dans une rivière se produit pendant la période de fonte nivale ou lors de périodes d'intenses précipitations (Forbes et Lamoureux, 2005; Cockburn et Lamoureux, 2008; Dugan et al., 2009). À titre d'exemple, dans un bassin versant situé à Cape Bounty sur l'île de Melville (Nunavut), 35% de la charge sédimentaire annuelle fut transporté lors de deux journées de

fortes précipitations (Dugan et al., 2009). D'autres études ont démontré qu'une forte proportion du transport sédimentaire dans les rivières de régions arctiques se produit lors d'une période de débit plus élevé pendant la période de fonte nivale (Forbes et Lamoureux, 2005; Cockburn et Lamoureux, 2008). En général, les rivières des régions de hautes latitudes sont caractérisées par une charge sédimentaire moins importante que les rivières des régions tempérées. Selon Syvitski (2002), plusieurs facteurs expliquent cette différence. D'abord, la surface du sol des régions de hautes latitudes est généralement couverte de neige durant une plus grande partie de l'année, limitant l'érosion du sol. Ensuite, le pourcentage de précipitations sous forme de pluie, qui est un facteur important dans l'apport sédimentaire vers les cours d'eau, est moins important que dans les régions tempérées, limitant le ravinement et l'érosion.

Un modèle sur la charge sédimentaire des rivières développé par Syvitski (2002) prévoit une augmentation de la quantité de sédiments transportée par les cours d'eau lors d'une hausse de la température de surface du bassin de drainage. Ce modèle prévoit une augmentation de 22% de la charge sédimentaire pour chaque hausse de température moyenne de 2 °C et une augmentation de 10% de la charge sédimentaire pour chaque élévation de 20% du débit de l'eau (Syvitski, 2002), alors qu'une augmentation du débit de base des rivières situées en zone de pergélisol est attendue dans les prochaines décennies (Lemieux et al., 2020). Toutefois, il est important de noter que ce modèle se base sur le bassin de la rivière Colville (Alaska), qui diffère de la vallée Tasiapik : la rivière Colville est d'une longueur approximative de 560 km, comprend plus de 5000 affluents (Walker et Hadden, 1998) et se situe au nord de la limite des arbres.

L'augmentation de la charge sédimentaire dans les régions nordiques serait étroitement liée à des processus engendrés par la dégradation du pergélisol. Dans les environnements pergélisolés, des événements de glissements de la couche active du pergélisol vers les rivières peuvent mener à une augmentation brève et abrupte de la turbidité (Lamoureux et Lafrenière, 2009). Les travaux de Kokelj et al. (2013) dans les bassins versants des rivières Mackenzie et Peel (Territoires du Nord-Ouest) ont montré que la charge sédimentaire était trois fois supérieure dans les rivières où les rives étaient affectées par la présence d'effondrements liés à la dégradation du pergélisol que celles n'en ayant pas. La moyenne de turbidité dans les rivières impactées variait entre 94 et 349 UTN entre les 11 juin et 11 juillet 2010. À titre d'exemple, la moyenne de turbidité dans la rivière Tasiapik lors de l'été 2019 a varié entre 20 et 32 UTN (Tableau 1). Dans le Haut-Arctique canadien, lors de l'été 1998, 32% de

l'apport sédimentaire total d'une rivière fut enregistré dans une période de seulement quatre heures en raison d'un événement de mouvement de masse rapide engendré par une augmentation de l'épaisseur de la couche active du pergélisol (Lewis et al., 2005). La concentration de sédiments en suspension lors de cet événement a atteint un maximum d'environ 83 g/l.

Au Nunavik, une seule étude s'est penchée sur cette problématique et a permis d'établir un lien entre l'augmentation de la turbidité fluviale et l'augmentation des températures atmosphériques (Jolivel et Allard, 2017). Les auteurs ont utilisé des turbidimètres à capteur à rétrodiffusion optique (*optical backscatter point sensor* - OBS) pour faire le suivi sur une période de trois ans de la turbidité de la rivière Sheldrake, située à 8 km au nord du village d'Umiujaq. Leurs travaux ont permis de lier les hausses de turbidité à des périodes de températures atmosphériques élevées. Selon leurs résultats, différentes situations seraient responsables de la hausse de la turbidité de la rivière Sheldrake : 1) la charge sédimentaire de la rivière proviendrait, entre autres, du ruissellement des sédiments ayant été libérés par les ostioles vers la rivière, 2) la hausse de turbidité pourrait être causée par le transport d'une grande quantité de sédiments à travers des chenaux vers la rivière lors du débordement de mares thermokarstiques et 3) certains épisodes d'augmentation de la turbidité ont été associés à des événements ponctuels de glissement de la couche active du pergélisol vers la rivière lorsque les températures atmosphériques étaient élevées.

Ainsi, les travaux réalisés par Syvitski (2002) et ceux de Jolivel et Allard (2017) ont permis de lier l'augmentation de la turbidité fluviale dans les rivières des régions de hautes latitudes à l'augmentation des températures atmosphérique. Toutefois, des recherches supplémentaires doivent être menées dans différents milieux pour vérifier si le régime thermique est un facteur important dans la variation de la turbidité des rivières de hautes latitudes. Autrement dit, il est pertinent de documenter la variation de la turbidité du cours d'eau en lien direct avec plusieurs variables météorologiques (température, précipitations liquide et nivale) ainsi qu'avec le débit de la rivière et les conditions locales (proximité des buttes cryogènes, présence de la végétation le long des cours, etc.). Au Nunavik, la source d'eau potable de 12 des 14 communautés, y compris celle d'Umiujaq, provient d'eau de surface (Lemieux et al., 2016). Il est donc important de documenter la qualité des écosystèmes aquatiques de ces régions pour assurer, entre autres, la pérennité et l'accessibilité à l'eau potable.

Objectifs et hypothèses

L'objectif général de cette étude consiste à mieux comprendre la variation spatio-temporelle de la turbidité fluviale en contexte périglaciaire dans le but de contribuer aux connaissances globales des impacts des changements climatiques sur l'hydrogéomorphologie des régions nordiques. Les objectifs spécifiques sont de 1) caractériser l'hydrogéomorphologie du cours d'eau principal de la vallée Tasiapik (et certains de ses affluents), 2) évaluer la turbidité du cours d'eau durant la période sans gel, 3) analyser les paramètres météorologiques tels que la température de l'air et les précipitations ainsi que les paramètres de terrain, incluant le débit de la rivière et la topographie du site et 4) établir des relations entre ces divers paramètres.

Les hypothèses de cette recherche sont que :

1. La variabilité de la turbidité du cours d'eau de la vallée Tasiapik dépend en partie des variations des températures de l'air dans la vallée. Ainsi, une augmentation des températures atmosphériques quotidiennes, menant à une accélération de la dégradation du pergélisol, devrait induire une augmentation dans la turbidité des rivières.
2. Les variations dans la turbidité fluviale dans la vallée Tasiapik sont différentes selon l'emplacement d'analyse sur la rivière. La géomorphologie, la topographie et la nature des sédiments situés dans la zone d'étude sont des composantes pouvant mener à une différence de la turbidité au sein du même cours d'eau.

Chapitre 1. Région et sites d'études

La vallée Tasiapik se situe à 5 km à l'est du village d'Umiujaq (56°33' N, 76°31' W), sur la côte est de la baie d'Hudson, en région subarctique (Figure 3). Les travaux se sont déroulés dans un bassin versant d'une superficie de 12,25 km², d'orientation nord-ouest sud-est et délimité au nord par la butte d'Umiujaq et au sud-est par le lac Tasiujaq (Guillaume-Delisle). La vallée Tasiapik est traversée par un cours d'eau et ses affluents, s'écoulant sur environ 4 km vers le lac. Cette rivière n'ayant pas de nom officiel, elle sera nommée la rivière Tasiapik dans le cadre de cette étude. La largeur du cours d'eau varie entre 0,5 m dans sa partie amont et 75 m à l'embouchure; elle dépasse rarement une profondeur de 1 m. Le lac Tasiujaq est d'une superficie de 712 km² (Gouvernement du Québec, 2012) et est compris dans le parc national Tursujuq, un lieu important pour les activités de plein air, la pêche et la chasse, tant pour la communauté d'Umiujaq que pour les touristes.

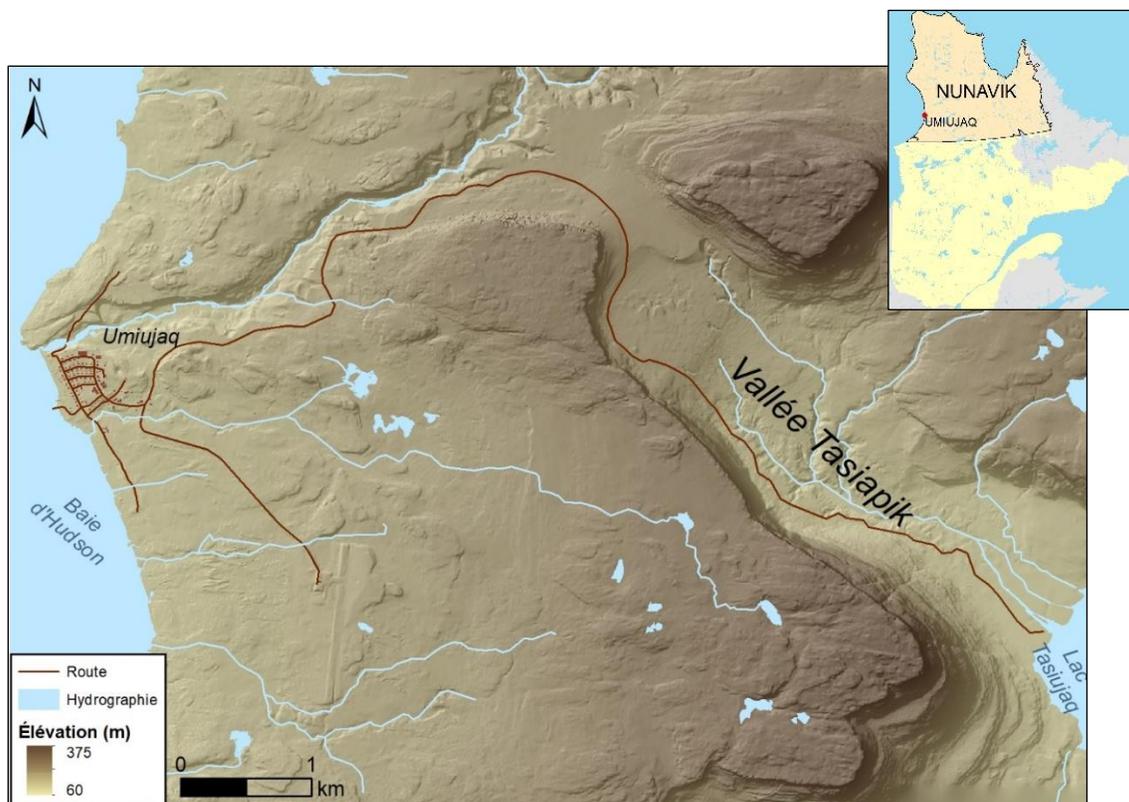


Figure 3. Localisation de la vallée Tasiapik, à proximité du village d'Umiujaq, Nunavik. Source : Ministère des Ressources naturelles et de la faune.

Contexte géologique

La région d'Umiujaq se situe dans la province géologique du Supérieur. Le socle est constitué de roches ignées et métamorphiques datant du Néoarchéen (-2,73 et -2,68 Ga) (Chandler, 1988; Eaton et Darbyshire, 2010), affleurant au sud-est de la vallée Tasiapik. L'ouest de la vallée est composé d'une séquence de roche volcano-sédimentaire datant du paléoprotérozoïque : des coulées basaltiques appartenant au groupe de Nastapoka et des grès grossiers du groupe de Richmond Gulf (Chandler, 1988; Eaton et Darbyshire, 2010; Lemieux et al., 2016). Cette séquence crée un relief asymétrique monoclinale appelé cuesta (Lavoie et al., 2012), formée par un front abrupt orienté vers l'est et d'un revers avec une pente plus progressive vers l'ouest, en direction de la baie d'Hudson. La colline d'Umiujaq, située au nord-est de la vallée, fait aussi partie de cette séquence géologique.

Suite au retrait de l'inlandsis Laurentidien, qui a débuté vers 8200 ans BP, la région d'Umiujaq fut submergée par la mer de Tyrrell dont la limite a atteint 271 m a.s.l. (Lavoie et al., 2012). La succession d'événements postglaciaires engendrée par la transgression marine et le relèvement glacio-isostatique a mis en place une séquence de dépôt quaternaire dans la vallée. Au contact des cuestas dans la partie amont de la vallée, des sédiments fluvioglaciaires déposés durant la déglaciation, entre 8200 et 8000 ans BP, forment des moraines frontales ainsi qu'un fan de contact sous-glaciaire (Fortier et al., 2020). Le fond de la vallée est composé de sédiments fins d'eau profonde (silt et argile), qui se sont déposés en eau calme à partir de 7500 ans BP, et de sédiments littoral et pré littoral, déposés suite à l'émersion progressive des terres entre 6875 et 2000 ans BP (Lajeunesse et Allard, 2003; Lemieux et al., 2016; Fortier et al., 2020). Lors du relèvement glacio-isostatique, des périodes de forte activité marine ont favorisé la formation de nombreuses crêtes de plages soulevées, caractérisant la topographie de la vallée (Fraser et al., 2005). Le relèvement glacio-isostatique fut initialement très rapide, avec un taux de 60 mm/an, et est encore aujourd'hui considéré comme un des plus rapides au monde avec un taux de 10 mm/an (Lavoie et al., 2012).

Climat et végétation

La région d'Umiujaq est soumise à un climat subarctique caractérisé par des étés frais et humides et des hivers froids et secs, avec une période sans gel de 60 à 80 jours (Environnement Canada, 2004). La station environnementale du réseau SILA (VDTSILA) du Centre d'études nordiques (CEN), située dans la vallée Tasiapik, a enregistré une température moyenne annuelle de -3,1 °C entre 2004 et 2018; le mois de février étant le plus froid avec une température moyenne de -21 °C et le mois d'août le plus

chaud avec une température moyenne de 11,9 °C (Centre d'études nordiques, 2018). Entre 2013 et 2017, les précipitations annuelles moyennes dans la région ont été de 645 mm, dont environ 50% sous forme de neige (Lemieux et al., 2020).

La région se situe en zone de pergélisol discontinu. Le pergélisol se trouve principalement dans les parties amont et médiane de la vallée, dans des dépôts épais de silts marins (Lemieux et al., 2016; Fortier et al., 2020) et où le sol est couvert de végétation basse (Ménard et al., 1998). Dans la vallée, le pergélisol se présente abondamment sous forme de buttes pergélisolées, aussi appelées lithalses, qui sont des formes de terrains périglaciaires formées dans des dépôts minéraux. Dans la vallée Tasiapik, les lithalses ont un diamètre moyen de 50 m et une hauteur d'environ 3 m (Ménard et al., 1998), mais peuvent atteindre jusqu'à 100 m de diamètre et 25 m de hauteur (Lemieux et al., 2016). Le pergélisol dans cette région est soumis à une forte pression due aux effets des changements climatiques : entre 1957 et 2005, la proportion de surface occupée par les lithalses a diminué de 40% (Fortier et Aube-Maurice, 2008). Beck et al. (2015) ont observé une diminution de 6% de la proportion de surface occupée par les lithalses entre 2004 et 2009. La dégradation du pergélisol entre 1957 et 2005 a entraîné une augmentation de 175% de la proportion de terrain occupé par des lacs thermokarstiques (Fortier et Aube-Maurice, 2008). Toutefois, une diminution de la quantité de mares de thermokarst a été observée ces dernières années, alors que 22% d'entre elles ont été colonisées par la végétation entre 1994 et 2010 (Provencher-Nolet et al., 2014).

Le village d'Umiujaq se situe à la limite des arbres, limite qui se prolonge vers le sud à cet endroit en raison de l'influence de la baie d'Hudson sur le climat de la région. La végétation est caractérisée par une délimitation d'orientation est-ouest, alors qu'on retrouve la toundra arbustive à l'est et la toundra forestière à l'ouest (Payette, 1983). Dans la vallée, la strate arborescente est dominée par l'épinette noire (*Picea mariana*), que l'on retrouve sous forme de krummholz à certains endroits (Provencher-Nolet et al., 2014). Des lichens recouvrent majoritairement les lithalses; entre celles-ci on observe des arbustes bas, principalement le bouleau glanduleux (*Betula glandulosa*) et le thé du labrador (*Rhododendron groenlandicum*), ainsi que quelques espèces d'éricacées (*Vaccinium angustifolium*, *Empetrum nigrum* et *Vaccinium vitis-idaea*). Les rives des cours d'eau et l'aval de la vallée sont couverts d'arbustes hauts et denses (*Salix sp.* et *Alnus sp.*), atteignant 2 m de hauteur par endroits. Des herbacées sont aussi présentes dans les milieux humides (Provencher-Nolet et al., 2014). Selon Beck et al. (2015), la couverture végétale est devenue plus importante dans la vallée depuis 1986,

alors que la végétation haute a augmenté de 21% entre 2004 et 2009. Entre 1994 et 2010, Provencher-Nolet et al. (2014) ont observé une augmentation de 12% de la végétation arbustive et une diminution de 8% de la couverture lichénique. Cette même étude a conclu que le changement majeur observé dans le couvert végétal de la vallée était une transition vers une strate arbustive, qui est de plus en plus présente (Provencher-Nolet et al., 2014).

Sites d'étude

La rivière Tasiapik a été choisie pour cette étude pour plusieurs raisons. Tout d'abord, la vallée est très bien instrumentée; de vastes jeux de données météorologiques sont disponibles depuis plusieurs années. De nombreuses recherches s'y déroulent et les interactions entre celles-ci sont importantes pour mieux comprendre les relations qui existent entre les différents processus et changements environnementaux observés dans les environnements nordiques. Ensuite, la proximité du village d'Umiujaq et de la station de recherche du CEN, situé à une dizaine de kilomètres de la vallée, font du site d'étude un endroit relativement accessible, ce qui facilite les travaux terrains. De plus, d'un point de vue géomorphologique, la vallée Tasiapik est très intéressante en raison de la diversité des processus qu'on y observe et du fait que la rivière s'écoule en zone de pergélisol.

Les données de turbidité ont été collectées sur une distance d'environ 1,5 km dans la partie médiane de la rivière principale et d'un de ses affluents, s'écoulant depuis le nord du bassin versant. L'absence d'écoulement en été dans la partie amont de la rivière et le taux de sédimentation élevé dans la partie aval n'ont pas permis d'étendre la zone de collecte de données à toute la rivière.

Chapitre 2. Méthodologie

Instrumentation terrain

Quatre campagnes de terrain ont eu lieu, en juin 2018 et 2019 ainsi qu'en octobre 2018 et 2019. Les travaux de juin ont permis l'installation des turbidimètres ainsi que le prélèvement d'échantillons d'eau et de sédiments fluviaux pour analyses en laboratoire. Les campagnes de terrain d'octobre avaient lieu principalement pour retirer les turbidimètres de la rivière. La caractérisation des sites à l'étude ainsi que l'installation d'une caméra automatisée se sont déroulées lors des travaux d'octobre 2018. Les photos de la caméra ont été récupérées en octobre 2018 et en octobre 2019.

Turbidimètres

Lors de l'été 2018, trois turbidimètres ont été installés à différents endroits dans le cours d'eau principal de la vallée Tasiapik. Ces sites ont été choisis en raison de leurs caractéristiques géomorphologiques distinctes. Deux turbidimètres ont été installés dans la zone de transfert : un à proximité d'une berge présentant des processus d'érosion et l'autre à la confluence de deux affluents. Le troisième turbidimètre a été installé dans la zone de stockage, à environ 100 m en amont de l'embouchure de la rivière. Lors de l'analyse des données récoltées par ces turbidimètres à l'automne 2018, plusieurs signes indiquant des imprécisions dans les enregistrements ont été observés. La présence de matières organiques ainsi que l'influence du rayonnement solaire sur les capteurs auraient faussé les données des turbidimètres. La sédimentation dans la zone de stockage étant plus importante qu'anticipée, le turbidimètre situé à cet endroit fut enseveli sous les sédiments après seulement quelques jours. Les données de 2018 n'ont donc pas été retenues dans le cadre de cette étude.

Les turbidimètres utilisés pour ce projet sont de modèle *RBRsolo³ Tu* de la compagnie RBR Ltd (Figure 4). Ces instruments utilisent une méthode de capteurs à rétrodiffusion optique. Le capteur consiste en une diode qui émet des infrarouges à haute densité et un détecteur mesure la quantité d'infrarouges diffusée par les particules en suspensions présentes dans l'eau. Les capteurs OBS enregistrent des données en unité de turbidité néphélométrique (UTN), qui dépendent principalement de la concentration de matière en suspension dans l'eau, mais aussi la taille des particules, du type de sédiment et de sa forme.

La méthode d'installation des turbidimètres fut modifiée lors du second déploiement des instruments en juin 2019 (Figure 5). L'installation d'un grillage en amont du turbidimètre dans le but de retenir la matière organique et d'une palette de plastique sur le turbidimètre pour bloquer le rayonnement solaire a permis d'obtenir des données fiables et valides. Sur les sept turbidimètres installés en 2019, six ont bien fonctionné. Pour une raison inconnue, les valeurs enregistrées par le 7^e (T3) étaient incohérentes. Les sept turbidimètres ont été installés dans la zone de transport, dans des sites présentant des caractéristiques géomorphologiques différentes. Les emplacements des turbidimètres T1 et T2 de 2018 ont été conservés en 2019. Chaque instrument a été stabilisé au sein d'un bloc de béton et déposé dans la rivière, à une hauteur d'environ 15 cm au-dessus du lit de la rivière, le capteur orienté vers l'aval (Figure 6). Ils ont été programmés pour récolter une mesure toutes les 15 minutes lors de la période sans gel de la rivière, soit de juin à octobre. Le traitement des données fut réalisé à l'aide du logiciel *Ruskin* fourni par RBR.



Figure 4. Exemple d'un turbidimètre RBR Solo³ Tu utilisé dans le cadre de ce projet. Source : RBR Ltd. (2018).



Figure 5. Configuration pour l'installation des turbidimètres lors de l'été 2019. Le grillage en noir limite l'accumulation de matières organiques provenant de l'amont et le plastique blanc limite l'influence que peut occasionner le rayonnement solaire direct.



Figure 6. Configuration pour l'installation des turbidimètres lors de l'été 2019. Les turbidimètres étaient installés sur des blocs de béton et déposés sur le lit de la rivière.

Bien que l'étude ait été réalisée à l'intérieur d'un même bassin versant, il était nécessaire d'identifier différents sites puisque la morphologie et la topographie diffèrent considérablement d'un endroit à l'autre, affectant la disponibilité en sédiments et la capacité de transport sédimentaire. Dans chacun des sites, un turbidimètre fut installé et un transect perpendiculaire à la vallée fut effectué pour réaliser des relevés topographiques. La Figure 7 indique l'emplacement des turbidimètres et des relevés topographiques effectués. Selon Schumm (1977), un cours d'eau d'ordre moyen à élevé est formé de trois zones distinctes. De l'amont vers l'aval, on retrouve la zone de production (ou zone d'alimentation), la zone de transfert et la zone de stockage (Figure 8). Le transect C et l'installation des turbidimètres 5 et 3 (T5, T3) ont été faits dans la partie amont de la zone de transfert de la rivière. La zone de transfert, située dans la partie médiane d'un système fluvial, correspond à l'environnement où les sédiments sont transportés à travers le réseau hydrographique. Dans un système en équilibre, la quantité de sédiments entrant est similaire à la quantité qui en sort (Schumm, 1977). Les données de ce dernier turbidimètre (T3) ne furent pas retenues dans le cadre de cette étude puisque les enregistrements ont été vraisemblablement influencés par l'accumulation de feuilles et de racicules ainsi que de matière organique sur le capteur du turbidimètre, empêchant le capteur de fonctionner adéquatement. L'installation du turbidimètre 4 (T4) ainsi que le transect B ont été faits dans un affluent du cours d'eau principal, provenant du nord de la vallée. Le turbidimètre 1 (T1) a été installé à la confluence du cours d'eau principal et de l'affluent mentionné précédemment. Légèrement en aval de

celui-ci, le transect D a été réalisé à l'endroit où le turbidimètre 2 (T2) fut installé. Dans la partie aval de la zone de transfert, les turbidimètres 6 et 7 (T6, T7) ont été disposés dans la rivière; les transects E et F croisent respectivement ces deux turbidimètres. Tous ces sites se situent dans la zone de transfert de la rivière. Deux autres transects furent aussi effectués : un dans la zone de production (transect A), l'autre dans la zone de stockage (transect G). La zone de production est considérée comme étant la source d'un système fluvial, soit la zone d'origine d'où proviennent l'eau et les sédiments s'écoulant dans le réseau hydrographique. Dans cette zone, les processus d'érosion sont intenses. La zone de stockage est la partie aval d'un cours d'eau; elle inclut l'embouchure d'un système fluvial et correspond à la zone de dépôts des sédiments. Dans cette partie d'une rivière, la pente est faible, la granulométrie des sédiments du lit est plus fine (sable moyen, sable fin, silt) et la plaine alluviale est très large (Schumm, 1977).

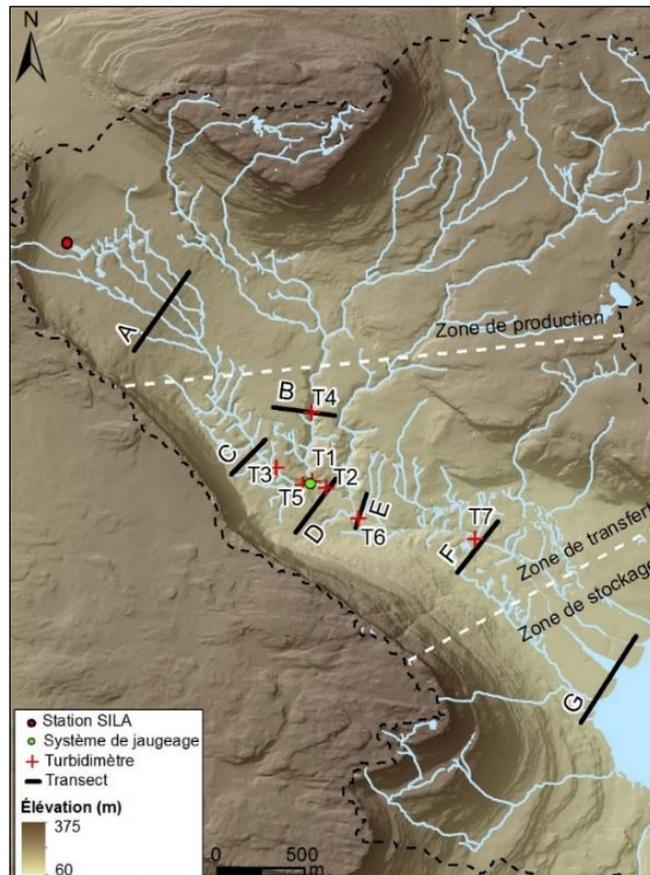


Figure 7. Délimitation du bassin versant de la vallée Tasiapik et les différentes zones du cours d'eau (zone de production, de transfert et de stockage) ainsi que la localisation des sites d'études avec l'emplacement des turbidimètres installés dans la rivière, des transects effectués, de la station météorologique SILA et du système de jaugeage. Source : Ministère des Ressources naturelles et de la Faune.

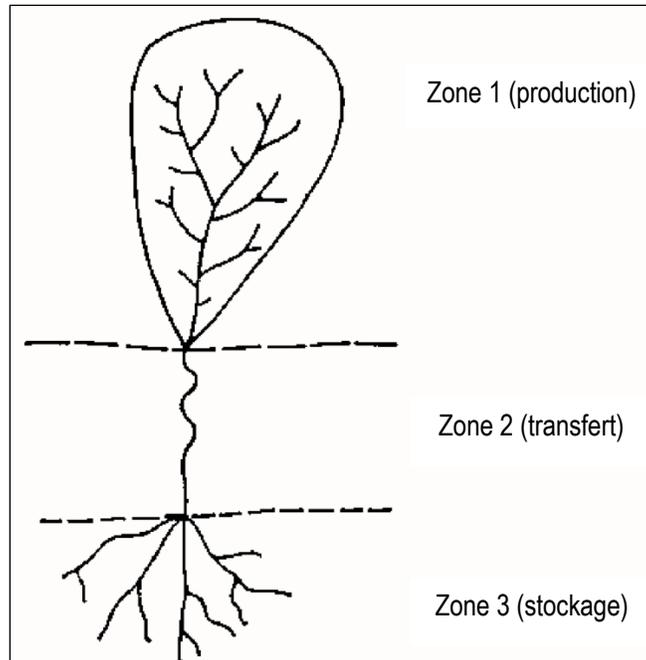


Figure 8. Identification des différentes zones d'une rivière. Adaptation de : Schumm, S. A. (1977). *The fluvial system*. New York: John Wiley & Sons, Ltd..

Données météorologiques et débit

Les données des turbidimètres ont été analysées en lien avec les données météorologiques de la station environnementale VDTSILA du CEN située en amont de la vallée Tasiapik (Figure 7). La station mesure différents paramètres météorologiques tels que les températures atmosphériques, les précipitations, la direction et la vitesse du vent ainsi que l'humidité de l'air. Dans le cadre de cette étude, on s'intéresse aux températures atmosphériques moyennes horaires ($^{\circ}\text{C}$) et aux précipitations totales horaires (mm/h).

Les données météorologiques sont complétées par des mesures du débit de la rivière, récoltées par une station de jaugeage automatisée installée et entretenue par l'équipe d'hydrogéologue du CEN. Ce système est utilisé dans le cadre de plusieurs études sur le suivi des ressources en eau dans la vallée (Lemieux et al., 2016; Cochand et al., 2019; Fortier et al., 2020; Lemieux et al., 2020). La station est située à l'exutoire d'un des affluents, légèrement en amont du T1 (Figure 7). Le système enregistre des données horaires sur le niveau de l'eau (m), le débit de la rivière (l/s), la température de l'eau ($^{\circ}\text{C}$) et la conductivité électrique de l'eau ($\mu\text{S/cm}$) (Lemieux et al., 2020). Dans le cas de cette étude, seules les données sur le débit de la rivière ont été utilisées.

Relevés topographiques

Une caractérisation de la vallée et du cours d'eau a été produite en y délimitant les différentes zones hydrographiques : zone de production, zone de transfert et zone de stockage. Par la suite, des profils topographiques ont été réalisés le long de transects perpendiculaires à la rivière avec l'aide d'un *Differential Global Positioning System* (DGPS). Une distance de 5 m a été appliquée entre chaque prise de coordonnées. Des observations ont été faites le long de ces transects pour décrire la végétation et les formes de terrain associées aux sites. Les coordonnées obtenues à l'aide du DGPS ont été converties et modifiées en couches linéaires à l'aide du logiciel ArcGIS pour être utilisées et représentées sous forme de cartes et de profils topographiques.

Caméra

Une caméra à déclenchement automatique a été installée sur la rive gauche de la rivière, à proximité du T2 (Figure 9). Elle a été programmée pour prendre une photo toutes les heures, entre 9h00 et 16h00 quotidiennement. Ces photos renseignent sur les changements dans la turbidité et le volume d'eau de la rivière ainsi que sur les événements de mouvements de masse qui peuvent se produire en bordure de la rivière. De plus, elles sont utiles pour déceler la source de problèmes si des anomalies sont observées dans les données de turbidité (p. ex., niveau d'eau peu profond). Les photos recueillies par la caméra ont été observées et mises en relation avec les données fournies par les turbidimètres et la station environnementale.



Figure 9. Caméra automatisée (flèche rouge) installée sur la rive gauche de la rivière Tasiapik, à proximité du T2.

Calibration

Les résultats obtenus par les turbidimètres étaient en UTN, une mesure qui dépend de plusieurs facteurs autres que la concentration totale en sédiments. Il était donc utile d'appliquer une calibration avec des sédiments *in situ* pour convertir cette mesure en concentration de matière en suspension (MES), afin d'obtenir une idée générale de la quantité de sédiments qui transitent dans la rivière.

Une calibration dans l'eau filtrée a été réalisée pour compenser l'imprécision de chacun des instruments. Des mesures ont été prélevées dans l'eau claire pendant 10 minutes et la moyenne des données obtenue pour chacun des turbidimètres fut soustraite à la turbidité réelle de l'eau utilisée pour cette calibration, qui était d'environ 1 UTN. Ce décalage, allant de -33 UTN pour le T1 à -1 UTN pour le T2, fut additionné aux données horaires récoltées par les turbidimètres pendant la période d'analyse.

Lors des travaux terrain de juin et octobre 2019, des échantillons d'eau de la rivière ont été prélevés à proximité des turbidimètres. Ces échantillons ont été analysés au Laboratoire de services communs du Centre Eau Terre Environnement de l'Institut National de la Recherche Scientifique (INRS) pour connaître la concentration de MES, selon la méthode gravimétrique du Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (2015). Une filtration par gravité a été réalisée avec un filtre Whatman 934 AH et les sédiments ont ensuite été séchés à l'étuve puis pesés pour connaître le poids des sédiments. La valeur de MES obtenue pour chacun des échantillons a été liée à la valeur UTN associée au moment du prélèvement de l'échantillon d'eau pour obtenir une régression linéaire, résultant en une relation UTN-MES (Figure 10) (Felix et al., 2018) :

$$MES = 1.5387 \times UTN + 9.1929 \quad (1)$$

En raison de l'éloignement géographique du site d'étude, rendant difficile un échantillonnage répétitif, seulement 19 échantillons ont pu être récoltés, dont cinq échantillons prélevés lors de périodes de turbidité relativement élevée (> 100 UTN). La turbidité de la rivière Tasiapik lors du prélèvement des échantillons variait entre 3 et 305 UTN. Le nombre d'échantillons étant faible, cette équation ne peut pas être utilisée pour obtenir une estimation très précise des valeurs de MES correspondantes à chaque valeur de UTN; les données ont été récoltées lors de seulement quatre journées différentes et ne représentent donc pas toute la période de temps de l'analyse. Par contre, cette relation fournit un aperçu global de la quantité de sédiments étant transportée dans la rivière Tasiapik pour la période

d'analyse, puisque la relation semble linéaire jusqu'à une concentration de sédiments de 6000 mg/l (Downing, 2006).

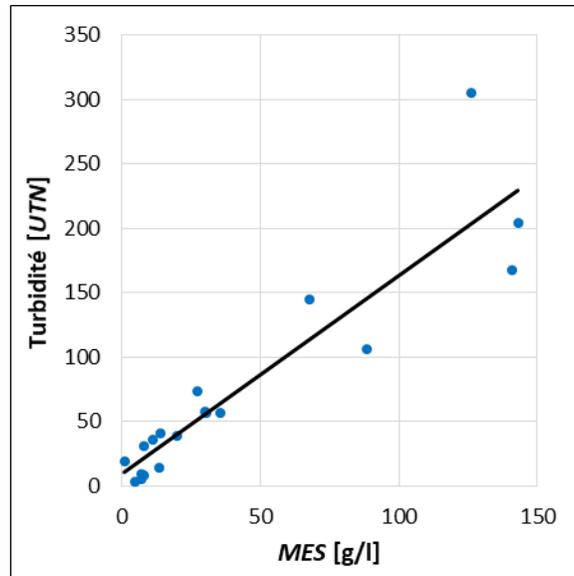


Figure 10. Relation UTN-MES obtenue suite à la calibration des turbidimètres :
 $MES = 1.5387 \times UTN + 9.1929$ ($r^2 = 0,84$, $n = 19$).

Analyses en laboratoire

Analyses granulométriques

Des analyses granulométriques réalisées au Laboratoire de géomorphologie et de sédimentologie du Département de géographie de l'Université Laval ont permis de connaître la concentration du silt et de l'argile dans les sédiments du lit de la rivière et des berges. Schumm (1960) a déterminé que la variable M est une bonne mesure pour déterminer le type de transport sédimentaire en rivière. Cette variable, représentant la moyenne pondérée du pourcentage du silt et de l'argile dans les sédiments des berges et du lit d'une rivière, est obtenue grâce à la formule :

$$M = \frac{(S_c \times W) + (S_b \times 2D)}{W + 2D} \quad (2)$$

où S_c = % du silt et de l'argile dans les sédiments du lit, S_b = % de limons et argiles dans les sédiments des berges, W = largeur de la rivière et D = profondeur de la rivière.

Selon les travaux de Schumm (1960), il s'agit d'une méthode appropriée pour déterminer le type de transport dominant dans une rivière, puisqu'elle mesure la résistance des berges à l'érosion et qu'elle

représente la forme de la coupe transversale de la rivière la plus efficace pour chacun des types de transport. Une coupe transversale large et peu profonde est plus efficace pour un transport en charge de fond alors qu'une coupe profonde et peu large est efficace pour le transport en suspension (Schumm, 1960).

Ainsi, des échantillons de sédiments ont été prélevés sur les berges et le lit de la rivière à l'emplacement de chacun des turbidimètres, dans le but de procéder à des analyses granulométriques. Les sédiments ont tout d'abord été séchés à l'étuve ventilée à 105 °C. Ils ont ensuite été mis à la perte au feu, selon la méthode de Heiri et al. (2001). Une série de 9 tamis (63 à 1000 µm) a été utilisée pour obtenir la distribution granulométrique de chacun des échantillons. Les résultats de ces analyses seront présentés dans le cadre d'un essai.

Analyses statistiques

Corrélations

Des tests de corrélations ont été réalisés afin de déterminer les relations entre la turbidité de la rivière Tasiapik et les différents paramètres météorologiques. Ces tests ont été faits à l'aide du logiciel statistique *R*. Le test de Pearson fut utilisé pour déterminer si les résultats sont significatifs ou non. Les résultats sont présentés sous forme de tableaux qui incluent la force du coefficient de corrélation ainsi que le résultat des tests d'hypothèse. Les analyses ont été réalisées sur la turbidité de l'ensemble de la rivière pour avoir un aspect global, ainsi que sur la turbidité prélevée à chaque site pour mieux comprendre comment chaque site réagit séparément. Plusieurs jeux de données ont été utilisés pour déterminer les relations entre les variables selon différentes résolutions de temps et lors d'événements météorologiques distincts. Ceux-ci incluent les mesures quotidiennes moyennes et les données horaires sur l'ensemble de la saison, ainsi que les données horaires lors de périodes chaudes et pendant des périodes de précipitations élevées. Dans les tests d'hypothèses effectués, l'hypothèse nulle signifie qu'il n'y a pas de relation entre les deux variables testées. On considère alors que le coefficient de corrélation n'est pas significatif et qu'il est semblable à 0 ($r = 0$). L'hypothèse alternative suppose qu'il existe une relation linéaire entre les deux variables, le coefficient de corrélation indique alors le sens de la relation ainsi que la force de celle-ci. L'échelle de Cohen (Cohen, 1988) a été utilisée pour caractériser la force de la corrélation : un coefficient de $\sim 0,10$ représente une corrélation faible,

un coefficient de $\sim 0,30$ représente un effet de taille moyenne et une valeur de plus de 0,50 représente une corrélation forte.

ANOVA

Des analyses de variance (ANOVA) à deux critères ont été réalisées avec l'aide du logiciel statistique R. Pour la réalisation de ces statistiques, les variables explicatives doivent être de nature catégorique; les paramètres utilisés (température atmosphérique, précipitation et débit) ont donc été divisés en classe de 1 à 3, 1 correspondant aux valeurs les plus faibles pour chaque variable et 3 aux valeurs les plus fortes. Les données de précipitations ont été divisées selon la classification faite par le Gouvernement du Canada (2019), où $< 2,5$ mm équivaut à des précipitations faibles, $2,6 - 7,5$ mm des précipitations d'intensité moyenne et $> 7,6$ mm des précipitations de forte intensité. Pour les températures atmosphériques et le débit de la rivière, les classes ont été déterminées selon l'écart-type de la moyenne. Pour la variable réponse (turbidité), les valeurs très faibles, c'est-à-dire plus basses que 5 UTN, n'ont pas été incluses dans l'analyse : certains de ces enregistrements peuvent être dus à une erreur de détection de la part du capteur, soit en raison d'un niveau d'eau trop faible ou par la présence de matières organiques obstruant le capteur. Les conditions d'application ont été vérifiées avant l'exécution des analyses. Le jeu de données ne respectant pas l'homogénéité des variances, une transformation Log+1 a été appliquée sur la variable réponse. La fonction *aov* de R a été utilisée pour procéder aux analyses statistiques : une première ANOVA a été réalisée sur les variables température atmosphérique et débit et une seconde sur les variables précipitation et débit. Des comparaisons multiples ont ensuite été faites avec un test de Tukey et la fonction *tukeyHSD* de R.

Sélection de modèles

Une sélection de modèles a été produite dans le but de déterminer quel paramètre ou combinaison de paramètres influence le plus la variabilité de la variable réponse turbidité. Il s'agit d'une étape importante lors de l'analyse statistique de données puisque cette méthode permet de choisir un modèle statistique, parmi une sélection de modèles candidats déterminés préalablement, qui approxime le mieux la réalité associée au jeu de données disponibles. La sélection de modèles a été réalisée sur le logiciel statistique R. La fonction *aictab* du package *AICcmodavg* a été utilisée pour produire le tableau des résultats. Comme pour les ANOVA, une transformation Log+1 a dû être appliquée sur la variable réponse turbidité puisque celle-ci ne respectait pas les conditions d'applications. Le tableau des

résultats présente, entre autres, les valeurs de Delta *AIC* (Δ_i) et les poids d'Akaike (w_i) pour chaque modèle. Les valeurs de Delta *AIC* représentent une classification des modèles par rapport au meilleur modèle. Un résultat de < 2 indique que le modèle est très plausible, alors qu'un résultat de > 10 indique que le modèle est improbable. Le poids d'Akaike est une mesure qui compare un modèle par rapport à l'ensemble de tous les modèles. Le résultat est normalisé sur une échelle de 1 et représente la probabilité qu'un modèle soit le meilleur par rapport aux modèles candidats et au jeu de donnée disponible.

Suite à cette analyse, une inférence multimodèle a été appliquée pour déterminer l'effet de chaque variable sur la turbidité. Cette méthode se base sur une moyenne pondérée des estimations de tous les modèles plutôt que de se baser seulement sur les estimations du modèle le plus probable. La fonction *modavgShrink* du package présentée précédemment a été utilisée pour produire ces analyses statistiques.

Boucles d'hystérésis

Les boucles d'hystérésis représentent la relation entre la concentration de sédiments en suspension (C) et le débit de la rivière (Q) lors d'un événement hydrologique distinct. Cette caractérisation du transport sédimentaire en rivière est représentée sous forme de graphiques : on utilise les mesures de C et Q du début de l'événement hydrologique lorsque le débit commence à augmenter, celles à la fin de l'événement lorsque le débit revient à son niveau de base ainsi que les mesures pendant l'événement. Les graphiques représentent donc les variations de C (axe des Y) et Q (axe des X) dans le temps, pondérée sur 1; 1 représentant le maximum de C ou de Q atteint lors de l'événement. Le graphique peut être séparé en deux zones de temps : la phase montante (*rising limb*), lorsque le débit augmente, et la phase descendante (*falling limb*), lorsque le débit a atteint son maximum et commence à diminuer. Les 12 événements où le débit fut le plus élevé lors de l'été 2019 ont été analysés dans le cadre de cette étude. Ces 12 événements ont été repris pour chacun des turbidimètres (6). Cinq classes de relation C - Q peuvent être identifiées, selon la forme et l'orientation de la boucle : sous forme de ligne à valeur unique (I), une boucle en sens horaire (II), une boucle en sens antihoraire (III), une valeur unique suivie d'une boucle (IV) ou une figure en huit (V) (Williams, 1989).

Chapitre 3. Résultats

Caractérisation de la vallée et portrait hydrologique

Les turbidimètres ont été installés dans des tronçons de la rivière, présentant des caractéristiques distinctes. Il était donc intéressant de procéder à une caractérisation complète des sites pour mieux comprendre comment le transport sédimentaire fluviale est affecté par la topographie, la nature des dépôts de surface, la végétation et les caractéristiques hydrogéomorphologiques intrinsèques à chaque site.

Zone de production

Le transect A a été réalisé dans la zone de production, sur une distance d'environ 400 m à partir de la route, dans une orientation sud-ouest nord-est (Figure 11a). Cette partie amont est caractérisée par des dépôts de sédiments littoraux et pré-littoraux, reposant sur des sédiments fins d'eau profonde. On observe le long de ce transect la présence de plusieurs ruisseaux intermittents, d'une profondeur variant d'un à cinq mètres, alimentés par des petits lacs de tête situés en amont du bassin versant. Lors de la campagne de terrain d'automne 2018, il n'y avait pas d'eau qui s'écoulait dans ces ruisseaux, à l'exception d'un ruisseau où une eau limpide s'écoulait lentement. Le couvert végétal est composé principalement de lichens, avec la présence d'arbustes bas (*Betula glandulosa* et *Salix sp.*) et de quelques îlots d'épinettes (*Picea mariana*). On observe des herbacés et des sphaignes dans les zones plus humides, principalement sur les rives des ruisseaux. Dans cette section, se retrouvent quelques buttes de pergélisol ainsi que de nombreux lacs de thermokarst.

Zone de transfert

Tous les turbidimètres utilisés à l'été 2019 ont été installés dans la zone de transfert du cours d'eau puisque la morphologie fluviale dans les autres zones ne permettait pas l'installation d'instruments dans le cours d'eau.

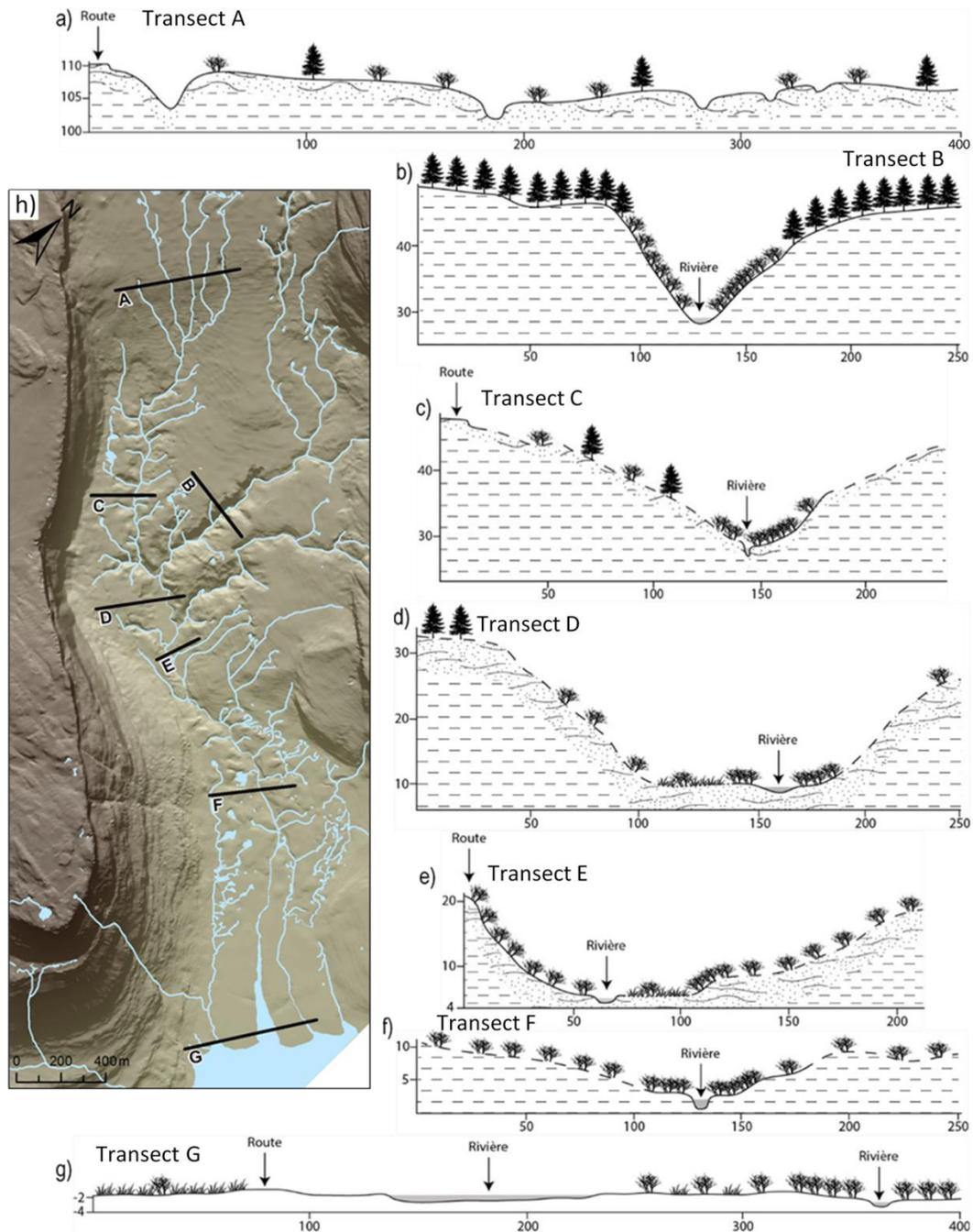


Figure 11. Représentation de la nature des dépôts de surface, de la végétation et de la topographie des sites obtenue par des transects réalisés perpendiculairement à la rivière. Les profils topographiques ont une exagération verticale de 3x. h) Carte de localisation des transects effectués dans la vallée Tasiapik. Source : Ministère des Ressources naturelles et de la Faune.

Le turbidimètre T4 a été installé dans un site difficilement accessible en raison de la présence d'une pessière dense, ce qui ne permettait pas l'utilisation du DGPS. En raison de cette difficulté d'accès, le transect B a été tracé à partir d'un modèle numérique d'élévation (MNE) et caractérisé à l'aide d'image

satellite (Figure 11b). Le T4 est le seul turbidimètre qui a été installé dans l'affluent qui provient du nord de la vallée; cet affluent rejoint le cours d'eau principal à environ 400 m en aval du turbidimètre. Il était intéressant d'installer un turbidimètre à cet endroit puisqu'il s'agit du seul site où l'on retrouve des sédiments fins d'eau profonde à la surface du sol, sans la couche de sédiments littoraux et pré-littoraux. De plus, il s'agit du seul site où l'eau ne s'écoule pas près des buttes de pergélisol. À cet emplacement le cours d'eau a une largeur de 3,50 m et une profondeur de 0,40 m. La rivière y est très encaissée et les rives sont abruptes, d'une hauteur de 1,20 m pour la rive droite et 2 m pour la rive gauche. Le lit de la rivière est composé de sable et de galets de 2 à 5 cm de diamètre ainsi que de blocs anguleux que l'on observe dans le cours d'eau et sur ses rives. La végétation du site est composée principalement de saules déracinés (*Salix sp.*) et déplacés dans la rivière et d'épinettes noires (*Picea mariana*) plus haut sur les versants. À environ 50 m en aval du turbidimètre, le déracinement d'épinettes causé par l'érosion des berges à cet endroit a provoqué une avulsion, forçant la rivière à s'écouler sur le roc (Figure 12).



Figure 12. Avulsion créée par le déracinement des arbres situés sur les berges de la rivière, où on observe des processus d'érosion importants.

Le transect C a été réalisé dans la partie amont de la zone de transfert (Figure 11c). En raison de la faible profondeur du cours d'eau et de l'écoulement intermittent en saison sèche, on ne pouvait pas installer de turbidimètre plus en amont que ce site. Le site se situe sur des sédiments littoraux et pré-littoraux, qui reposent sur des sédiments fins d'eau profonde. Le tracé de la rivière à l'emplacement du T5 méandre légèrement. Cette partie du cours d'eau est d'une largeur de 1,85 m et d'une profondeur

de 0,35 m. Les rives sont abruptes, d'une hauteur de 1,30 m pour la rive droite et de 2,10 m pour la rive gauche. Le lit de la rivière est composé principalement de cailloux ainsi que de quelques gros blocs. Les berges sont colonisées par des saules (*Salix sp.*) et des aulnes (*Alnus sp.*) déracinés. Plus haut sur les versants, des lichens ainsi que quelques îlots de bouleaux glanduleux (*Betula glandulosa*) et d'épinettes rabougries colonisent le sol. Ce site est important puisqu'il est le seul où la rivière est encaissée directement entre des buttes de pergélisol. Sur le sommet et les versants des lithalses, des formes de terrain associées à la dégradation du pergélisol sont bien visibles; on observe, entre autres, des irrégularités de la surface provoquée par le tassement du sol (Figure 13).



Figure 13. Tassement du sol observé à proximité du T5.

Le turbidimètre T1 a été installé à 60 m en aval du T5, à la confluence d'un affluent gauche et de la rivière. Lors des travaux terrain de juin 2019, on observait le mélange des eaux des deux ruisseaux ainsi qu'une différence de turbidité : l'affluent gauche, provenant du nord de la vallée où est installé le T4, est beaucoup plus turbide que le cours d'eau principal (Figure 14). La largeur du cours d'eau à cet endroit est de 2 à 5 m et la profondeur de 0,35 m. Les berges sont d'une faible hauteur, d'environ 0,65 m, et possèdent une faible pente jusqu'aux buttes de pergélisol à environ 80 m de la rivière. Le lit du cours d'eau est composé de galets de 1 à 10 cm de diamètre et d'un banc de sable végétalisé à la confluence. Les rives sont colonisées par des saules et des aulnes denses d'une hauteur d'environ 2 m, jusqu'au pied des buttes de pergélisol dont la surface est colonisée principalement par des lichens et des îlots d'arbustes bas.



Figure 14. Différence de turbidité entre les eaux provenant de l'affluent nord à droite, et les eaux provenant du cours d'eau principal (rivière Tasiapik), à gauche.

Le transect D a été effectué à environ 100 m en aval du site T1. Ce transect croise l'emplacement où le turbidimètre T2 a été installé (Figure 11d). Dans cette partie de la vallée, on retrouve les mêmes dépôts de surface que ceux retrouvés dans les sites amont, soit des sédiments littoraux et pré-littoraux reposant sur une couche de sédiments fins d'eau profonde. Le tracé du cours d'eau dans ce tronçon de la rivière méandre légèrement et est bordé par peu de végétation. La profondeur de la rivière à l'emplacement du T2 est de 0,25 à 0,50 m, avec une largeur d'environ 3 m. Le lit de la rivière, composé de sable et de quelques galets, est soumis à une forte sédimentation. On observe sur le lit des rides de courant asymétriques d'environ 10 cm de longueur. Les berges de ce site ne sont hautes que de 0,50 m. La rive droite consiste en une plaine alluviale d'une largeur d'environ 70 m jusqu'au pied des buttes de pergélisol. La pente sur la rive gauche est plus abrupte en raison de la présence d'une lithaise à proximité de la rivière. Les berges sont colonisées par des aulnes et des saules denses d'environ 2 m de hauteur. Sur les buttes de pergélisol, on observe la même végétation que dans les sites précédents, soit des lichens ainsi que quelques îlots d'arbustes et d'épinettes rabougries.

Légèrement en amont du T2, dans la partie concave du méandre, on observe une lithaise dénudée de végétation d'environ 10 m de hauteur (Figure 15-17). Cette butte de pergélisol est formée de sédiments

meubles en érosion. On y observe la présence de rigoles et de cicatrices de mouvements de masse. Des photos prises à différents moments sur deux années permettent de constater que le site fait face à des processus d'érosion importants; une partie de la berge s'est effondrée en juin 2019 (Figure 16) puis la berge a été complètement rompue en octobre 2019 (Figure 17). On a aussi pu observer un recul considérable de la partie inférieure centrale de la butte entre juin 2018 (Figure 15) et juin 2019 (Figure 16) en raison d'événements de mouvements de masse. Ces sédiments, rendus disponibles suite à l'érosion sur la lithalse, ont formé un banc de sable au pied de la butte, sur le lit de la rivière. Une différence entre juin 2018 et 2019 dans la granulométrie du lit de la rivière, où est installé le turbidimètre T2, a aussi été observée : en juin 2019, le lit de la rivière était composé principalement de sable, alors qu'on observait principalement des galets et des blocs en juin 2018.



Figure 15. Lithalse en amont du T2, juin 2018.



Figure 16. Lithaise en amont du T2, juin 2019. Une partie de la berge s'est effondrée (flèche rouge).



Figure 17. Lithaise en amont du T2, octobre 2019. L'effondrement du sol a causé la rupture complète d'une partie de la berge (flèche rouge).

Le transect E, passant près du turbidimètre T6, a été réalisé sur 200 m selon une orientation nord-sud à partir de la route (Figure 11e). Le secteur est caractérisé par des sédiments fins d'eau profonde, surmontés de sédiments littoraux et pré littoraux. Le cours d'eau à cet endroit est typique de la partie aval de la zone de transfert : la pente et la vitesse diminuent alors que la largeur augmente, quelques plantes aquatiques sont présentes (présence d'algues sur les roches dans ce cas-ci) et différentes formes sédimentaires sont observables dans la rivière (Schumm, 1977). Ainsi, on remarque une

transition entre deux milieux distincts : en amont, le tracé du cours d'eau est méandré, le lit de la rivière est composé principalement de sable avec la présence de bancs sableux végétalisés (anastomoses) et non végétalisés (tresses), de rides de courants d'environ 10 cm de longueur ainsi que des bancs d'accumulation sur les rives convexes des méandres (Figure 18). En aval, la largeur de la rivière augmente et on observe une alternance de seuil et de mouille avec une présence de gros blocs anguleux sur le lit de la rivière. À l'endroit où le T6 a été installé, la profondeur du cours d'eau est de 0,70 m et la largeur est de 4,50 m. Le lit de la rivière est composé de sables grossiers au milieu du cours d'eau et de sables fins sur les côtés. Les berges sont d'une hauteur de 0,40 (rive droite) et 0,60 m (rive gauche). La pente sur la rive gauche est faible sur environ 40 m, jusqu'au versant des lithalses. Les buttes de pergélisol dans cette partie de la vallée sont en très forte dégradation (Figure 19). Des lithalses montrant des signes de dégradation sont aussi présentes sur la rive gauche de la rivière; au pied de la butte, on observe une zone saturée en eau provenant de la fonte de la glace de pergélisol. Sur les lithalses, des ostioles d'environ 20 cm de diamètre ont été observés (Figure 20). La végétation est composée de saules de 2 m de hauteur sur la rive droite ainsi que d'aulnes, de mousses et d'herbacées sur la rive gauche, dû à la présence de la plaine alluviale.



Figure 18. Tronçon de la rivière en amont du T6; on observe des bancs de sable végétalisés et d'autres non végétalisés ainsi que des rides de courants asymétriques sur ces derniers.



Figure 19. Buttes de pergélisol en dégradation à proximité du T6.



Figure 20. Ostiole d'environ 20 cm de diamètres sur une lithalse à proximité du T6.

Le transect F a été effectué dans la partie aval de la zone de transfert (Figure 11f). Il s'agit de l'emplacement le plus près de l'embouchure de la rivière où un turbidimètre pouvait être installé, puisqu'en aval de ce site l'accumulation sédimentaire est trop importante. Dans cette partie de la rivière, le tronçon est rectiligne avec une alternance de seuils et de mouilles. La largeur du cours d'eau à l'emplacement du T7 est de 4,30 m et la profondeur de 0,60 m. Le lit de la rivière est composé de plaques de silt discontinues surmontées de galets et de blocs. Sur les berges, on observe la présence

de silt, surmonté d'une mince couche de sable. La topographie est moins accentuée que dans les sites précédents avec une pente faible sur les rives de la rivière. Les saules colonisent la rive droite et se densifient à l'approche de la rivière. Sur la rive gauche, la végétation est composée d'aulnes et de quelques saules. Le sol dans ce secteur est végétalisé principalement par des lichens et du bouleau glanduleux sur les lithales. De chaque côté de la rivière, on observe quelques lacs de thermokarst de 5 à 60 m de diamètre. Ces lacs sont connectés à la rivière par de petits ruisseaux et forment, à leur embouchure, des petits bancs d'accumulation sableux (Figure 21).



Figure 21. Banc d'accumulation sur les berges de la rivière Tasiapik formé par l'apport sédimentaire provenant de petits ruisseaux qui s'écoulent perpendiculairement à la rivière.

Zone de stockage

Bien qu'aucun turbidimètre n'ait été installé dans la zone de stockage en raison de son important taux de sédimentation, il était pertinent d'y faire un transect pour caractériser le site et le cours d'eau à cet endroit. Le transect G a été réalisé à l'embouchure de la rivière, quelques mètres en amont du lac Tasiujaq (Figure 11g). Le chenal est à sa largeur maximale à cet endroit, avec une largeur de 75 m. Le lit est composé de sable moyen à fin, avec la présence d'un banc sableux au centre de la rivière. Dans la partie sud du transect, avant la route, la végétation est composée d'herbacées hautes et de quelques arbustes. À cet endroit, on observe quelques petits chenaux s'écoulant parallèlement à la vallée, qui se drainent dans le lac. Sur la rive gauche de la rivière, la végétation est principalement composée d'arbustes de 0,50 à 1 m de hauteur ainsi que de quelques îlots d'herbacées.

Conditions météorologiques et débit

Températures atmosphériques

La région d'Umiujaq est soumise à un climat subarctique; les températures atmosphériques en été demeurent fraîches, avec des maximums ne dépassant rarement les 20 °C. En 2019, la station environnementale (VDTSILA) a enregistré une moyenne quotidienne maximale de 20,8 °C le 27 juin et un maximum horaire de 25,9 °C le 27 août. La température moyenne durant la période d'étude était de 9,2 °C. Quelques périodes où les températures sont demeurées élevées pendant plusieurs jours ont été enregistrées à l'été 2019. Plus précisément, au début de la période d'étude, soit les 25, 26 et 27 juin, la station a enregistré des températures atmosphériques moyennes quotidiennes de 19,2, 17,9 et 17,8 °C respectivement. Il s'agit ici de trois journées parmi les cinq plus chaudes de l'été 2019. Du 5 au 9 août, les températures atmosphériques ont varié autour de 15 °C pendant cinq jours consécutifs. Une autre période relativement chaude a été enregistrée entre le 25 et le 28 août, alors que les moyennes quotidiennes sont demeurées au-dessus de 15 °C.

La température atmosphérique horaire minimale enregistrée à l'été 2019 a été de -0,7 °C le 21 juillet. Le 1er octobre a été la journée la plus froide de la période d'analyse, avec une moyenne quotidienne de 1,2 °C. Deux périodes de températures atmosphériques basses ont été enregistrées au milieu de l'été; du 20 au 25 juillet ainsi que du 10 au 16 août, les températures sont demeurées en dessous de 9 °C. La plus longue période fraîche enregistrée à l'été 2019 fut entre le 31 août et le 13 septembre, alors que les températures atmosphériques ont descendu sous les 7 °C pendant 14 jours consécutifs, dont 12 journées à moins de 5 °C. Les températures fraîches automnales se sont installées à partir de fin septembre.

En résumé, trois périodes très chaudes ont été enregistrées à l'été 2019, soit du 25 au 27 juin, du 5 au 9 août ainsi que du 25 au 28 août. La période du 25 au 27 juin fut la plus chaude de l'été 2019, avec des moyennes quotidiennes d'environ 20 °C sur trois jours. Au contraire, trois périodes de températures très basses ont été enregistrées : du 20 au 25 juillet, du 10 au 16 août ainsi que du 31 août au 13 septembre.

Précipitations liquides

Lors de la période d'analyse, le 16 juillet et le 21 septembre ont été les journées les plus pluvieuses avec des précipitations totales de 46,3 et 45,1 mm respectivement. Le 22 septembre, la station

environnementale a enregistré 16,3 mm de précipitation en seulement une heure, ce qui correspond au maximum horaire atteint à l'été 2019. Quelques périodes de précipitations élevées pendant plusieurs jours ont été observées; du 3 au 7 juillet et du 14 au 21 juillet, la station a enregistré des précipitations dans la vallée à tous les jours, avec des maximums de 9,3 mm le 4 juillet et de 46,3 mm le 16 juillet. Du 4 au 20 août, une autre période de précipitations élevées a été enregistrée; à l'exception du 13 août, il y a eu des précipitations tous les jours durant cette période, dont deux épisodes où les précipitations ont atteint plus de 10 mm pendant deux jours consécutifs, soit les 15 et 16 août ainsi que les 19 et 20 août. Les 10 derniers jours de septembre ont aussi connu une période de précipitations élevée, alors qu'on a enregistré plus de 10 mm lors de quatre journées différentes. Le mois de juillet étant assez pluvieux, il n'y a pas eu beaucoup de périodes sèches pendant l'été 2019. Quatre périodes d'au moins trois jours sans précipitations ont été enregistrées : du 27 juin au 2 juillet, du 26 au 29 juillet, du 21 au 26 août ainsi que du 13 au 17 septembre.

Débit

Selon les données sur le débit de la rivière ainsi que les photos capturées par la caméra automatisée, la rivière Tasiapik a été libre de glace au début du mois de mai 2019. Il s'agit d'une date assez hâtive comparativement à l'année 2018, où la rivière fut libre de glace un mois plus tard, vers le 2 juin. Puisque la rivière fut dégagée plus tôt qu'anticipé, les instruments ont été installés après la période de haut niveau d'eau engendrée par la fonte de la neige. En 2019, la période de fort débit printanier s'est produite entre le 13 mai et le 22 juin, comparativement à l'année 2018 où cela s'est produit entre le 3 juin et le 6 juillet.

Le plus haut débit observé dans la rivière Tasiapik lors de l'été 2019 fut de 453 l/s le 16 juillet. Le 22 septembre, la rivière a aussi connu un événement de débit très élevé avec un maximum de 351 l/s. D'autres données de débit élevé furent enregistrées par la station de jaugeage durant la période d'analyse : une augmentation considérable du débit fut observée le 20 juillet, quelques jours après le plus haut débit enregistré à l'été 2019. Entre le 15 et le 21 août, il y a eu plusieurs augmentations abruptes, empêchant la rivière de redescendre à son niveau de base pendant plusieurs jours. Le 31 août, le système de jaugeage a enregistré une forte augmentation du débit de la rivière, après plusieurs jours à un niveau d'étiage. Les dernières hausses observées durant la période d'analyse se sont produites les 26 et 28 septembre.

Entre les périodes de crues, la rivière Tasiapik atteignait un niveau de basse eau saisonnière d'environ 10 l/s. Quelques épisodes de débit faible pendant plusieurs jours ont été observés : du 27 juin au 16 juillet, le débit est demeuré relativement bas avec une légère augmentation le 11 juillet. Le niveau de la rivière fut aussi faible du 23 juillet au 9 août, avec une légère augmentation le 31 juillet. De plus, le débit de la rivière fut faible du 23 au 30 août et du 1^{er} au 19 septembre, ce dernier épisode étant la plus longue période sans hausse enregistrée pendant la période d'analyse.

Dynamique du transport sédimentaire

Observations globales

Lors de l'installation des instruments en 2019, il ne fut pas possible de récolter des mesures de turbidité pour la période de fonte nivale du début du mois de mai. En raison de la faible profondeur de la rivière Tasiapik, les turbidimètres ont été installés directement sur le lit de la rivière au lieu d'être suspendus dans la colonne d'eau, tel qu'observé dans d'autres études (p. ex., Göransson et al., 2013; Jolivel et Allard, 2017). Lors de l'été 2018, les instruments avaient été installés plus tôt dans la saison et, lors du dégel de la rivière, des plaques de glaces ont heurté et déplacé les turbidimètres, entraînant des erreurs lors de la collecte de données. Ces enregistrements n'avaient donc pas été retenus pour analyse dans le cadre de cette étude. Pour que cela ne se reproduise pas en 2019, les instruments ont été installés plus tard dans la saison, mais cela a causé une perte d'informations par rapport à la turbidité de la rivière pendant la saison de fonte nivale, une période importante dans les processus de transport sédimentaire.

Dans le but de mieux représenter les tendances globales de turbidité durant toute la saison, les données horaires furent transformées en moyennes quotidiennes. Les figures 22 à 27 présentent, sur une base quotidienne, les données de chacun des turbidimètres (moyennes quotidiennes), les températures atmosphériques moyennes, les précipitations totales ainsi que le débit moyen. La turbidité moyenne enregistrée durant la période d'analyse pour chacun des sites est indiquée dans le Tableau 1; on observe que le T6 a enregistré la plus faible turbidité avec une moyenne de 20,18 UTN, tandis que le T4 a enregistré la turbidité la plus élevée, avec une moyenne de 31,94 UTN.

Au début de la période d'analyse, la turbidité est demeurée élevée pendant quelques jours, telle qu'enregistrée par tous les turbidimètres, excepté T4 et T5. Durant cette période, le 25 juin fut la journée où la rivière a transporté le plus de sédiments, avec une turbidité moyenne variant entre 99

UTN pour le T7 et 118 UTN pour le T1. Suite à cet événement, la turbidité est demeurée relativement élevée jusqu'au 16 juillet, comparativement aux moyennes enregistrées plus tard dans la saison. Durant cette période, le débit a atteint un niveau de base similaire à celui observé au milieu de l'été. De plus, il n'y a pas eu de périodes de précipitations intenses; en effet elles ont atteint à peine 2 mm lors de quatre journées pendant cette période. En même temps, le débit était bas et les précipitations faibles alors que les températures atmosphériques quotidiennes étaient élevées.

Tableau 1. Turbidité moyenne (UTN) des six stations de la rivière Tasiapik en 2019. Les données furent récoltées entre le 25 juin et le 4 octobre.

Turbidimètre	Turbidité moyenne (UTN)
T1	20,2
T2	28,09
T4	31,94
T5	28,38
T6	20,18
T7	29,88

La turbidité maximale quotidienne lors de l'été 2019 a été enregistrée le 16 juillet. Lors de cette journée, on a observé le plus haut total de précipitations de la saison, avec 48,2 mm de pluie, ainsi que le 3^e plus haut débit de la saison, avec une moyenne quotidienne de 103 l/s. Le débit de la rivière est demeuré relativement élevé pendant quelques jours à la suite de cet événement, entraînant une turbidité élevée jusqu'au 22 juillet. Suite à cet événement, la turbidité est demeurée stable et relativement basse jusqu'au milieu du mois d'août. À partir du 15 août, il y a eu augmentation graduelle de la turbidité pendant sept jours; une augmentation marquée a été enregistrée par tous les turbidimètres (à l'exception du T4), simultanément à une augmentation du débit quotidien de la rivière.

Suite à un événement de turbidité élevée survenu le 31 août, la quantité de matière en suspension transportée dans la rivière est redevenue faible, et ce, jusqu'au 22 septembre. Durant cette période, il y a eu plusieurs journées pluvieuses; des précipitations quotidiennes de 2,1 à 4,4 mm du 2 au 5 septembre ainsi qu'un total de 5,5 mm le 12 septembre. Ces événements n'ont pas entraîné une hausse significative du débit quotidien ni de la turbidité de la rivière. Le 19 septembre, la station météorologique a enregistré 4,3 mm de précipitations en seulement une heure. Cet événement a généré une légère hausse du débit de la rivière, mais pas d'augmentation significative de la turbidité. La première moitié du mois de septembre fut caractérisée par une période de températures

atmosphériques très basses, avec 16 journées sous la moyenne de saison, dont 10 journées en dessous de 5 °C.

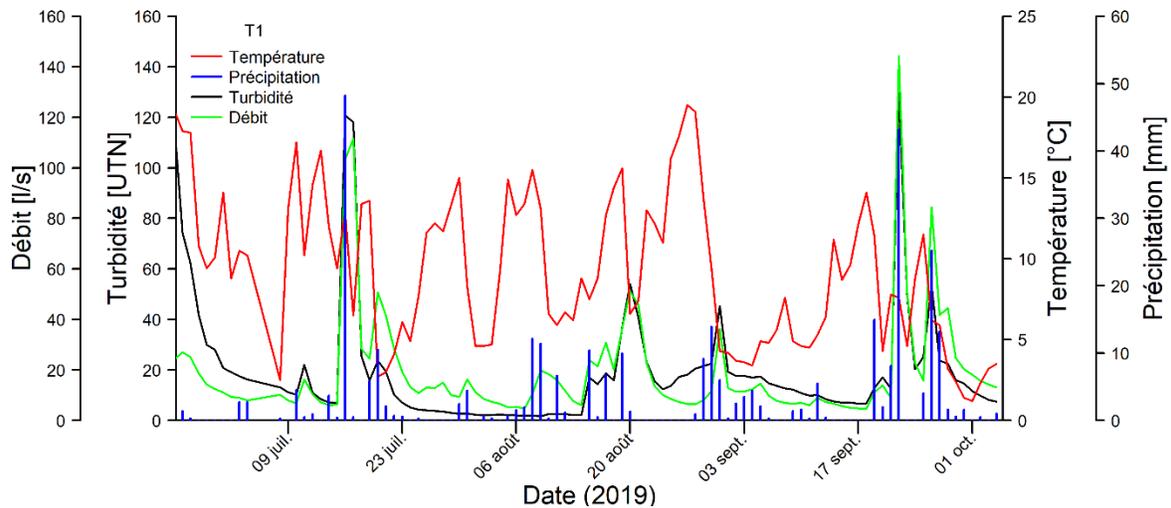


Figure 22. Moyennes quotidiennes de la turbidité de la rivière Tasiapik à la station T1 (UTN), des températures atmosphériques moyennes (°C), des précipitations totales (mm) et du débit moyen de la rivière (l/s) entre le 25 juin et le 4 octobre 2019. Source : Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques.

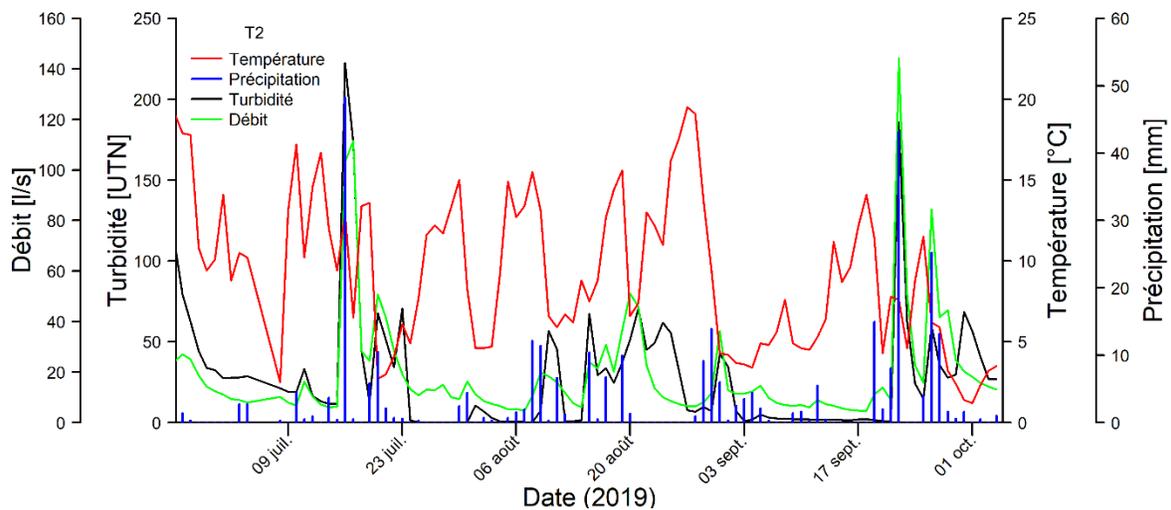


Figure 23. Moyennes quotidiennes de la turbidité de la rivière Tasiapik à la station T2 (UTN), des températures atmosphériques moyennes (°C), des précipitations totales (mm) et du débit moyen de la rivière (l/s) entre le 25 juin et le 4 octobre 2019. Source : Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques.

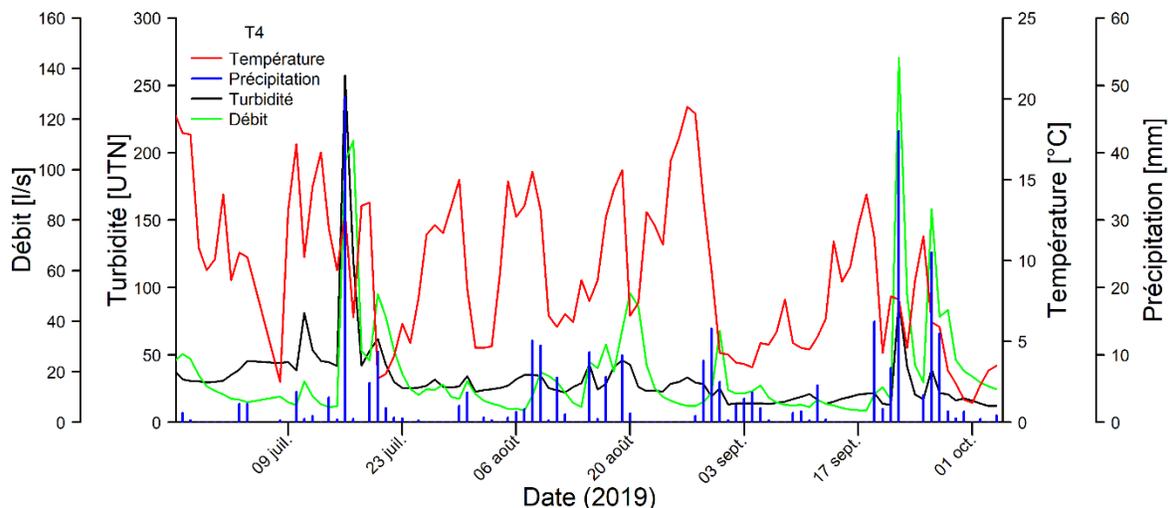


Figure 24. Moyennes quotidiennes de la turbidité de la rivière Tasiapik à la station T4 (UTN), des températures atmosphériques moyennes (°C), des précipitations totales (mm) et du débit moyen de la rivière (l/s) entre le 25 juin et le 4 octobre 2019. Source : Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques.

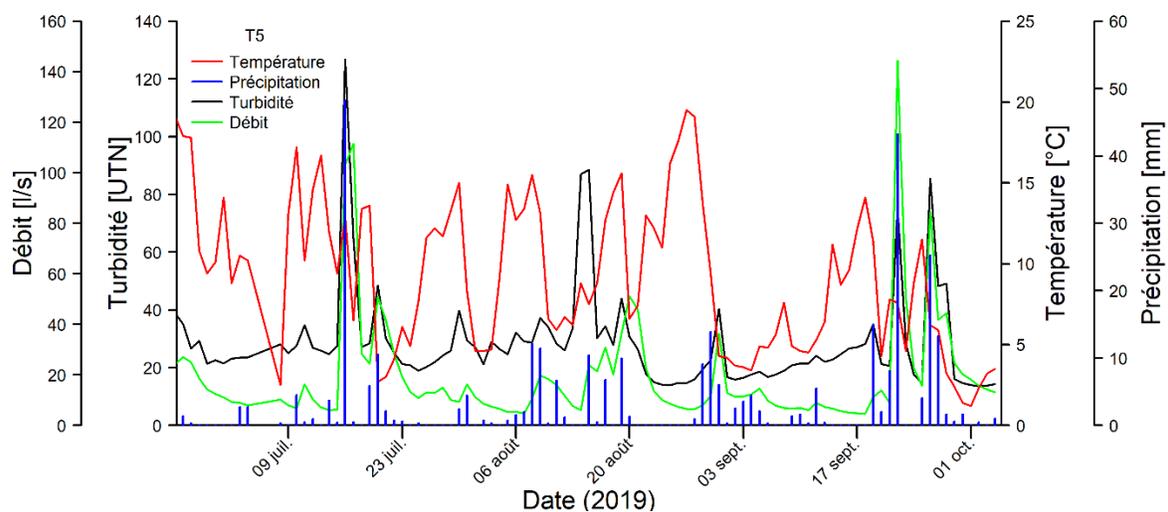


Figure 25. Moyennes quotidiennes de la turbidité de la rivière Tasiapik à la station T5 (UTN), des températures atmosphériques moyennes (°C), des précipitations totales (mm) et du débit moyen de la rivière (l/s) entre le 25 juin et le 4 octobre 2019. Source : Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques.

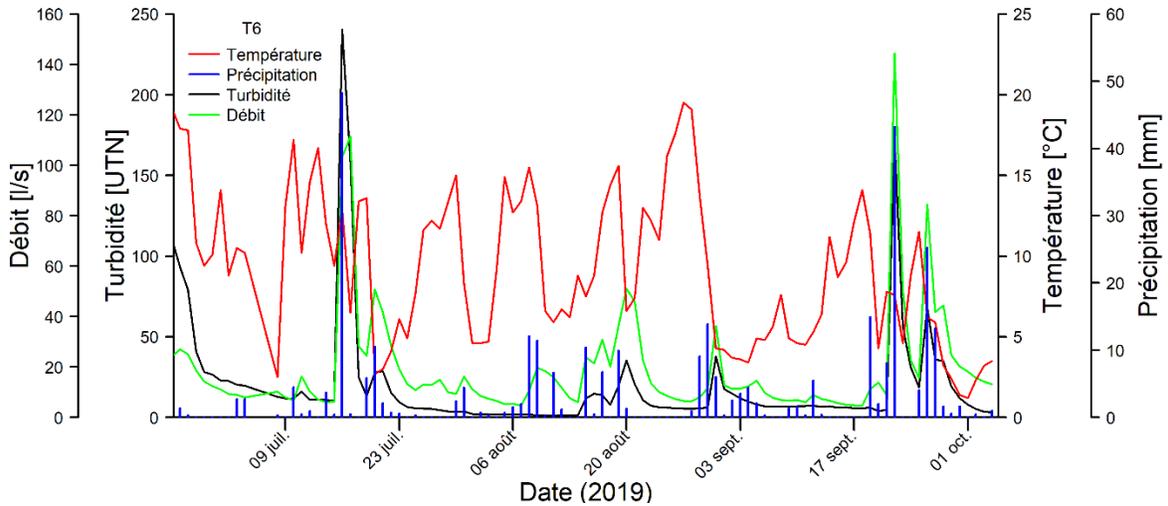


Figure 26. Moyennes quotidiennes de la turbidité de la rivière Tasiapik à la station T6 (UTN), des températures atmosphériques moyennes (°C), des précipitations totales (mm) et du débit moyen de la rivière (l/s) entre le 25 juin et le 4 octobre 2019. Source : Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques.

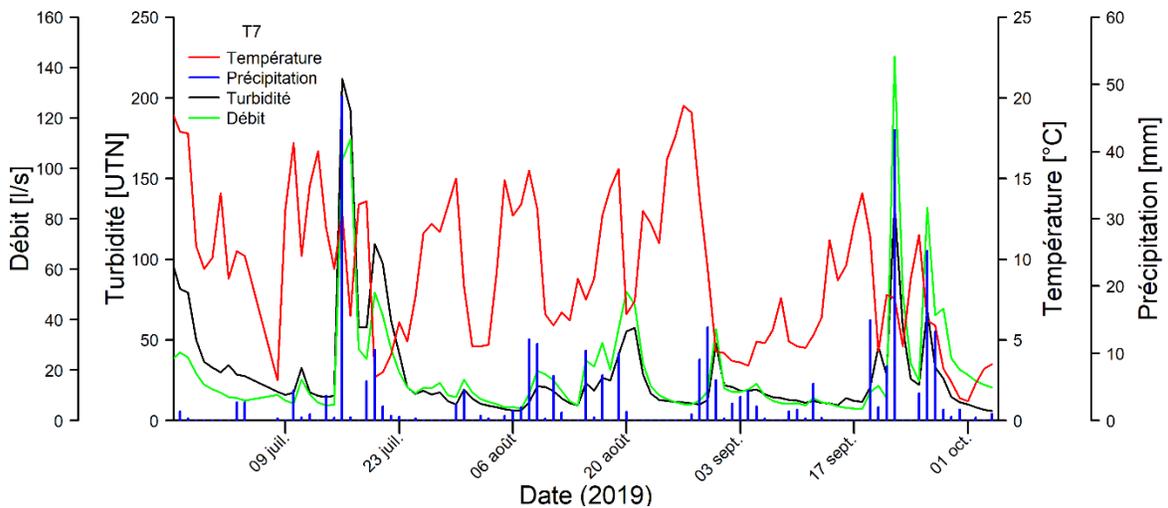


Figure 27. Moyennes quotidiennes de la turbidité de la rivière Tasiapik à la station T7 (UTN), des températures atmosphériques moyennes (°C), des précipitations totales (mm) et du débit moyen de la rivière (l/s) entre le 25 juin et le 4 octobre 2019. Source : Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques.

Événements ponctuels

Dans le but de mieux comprendre les causes des hausses significatives et ponctuelles de turbidité de la rivière Tasiapik, ces données ont été analysées en lien avec les conditions de températures atmosphériques, de précipitations et d'écoulement (Figure 28).

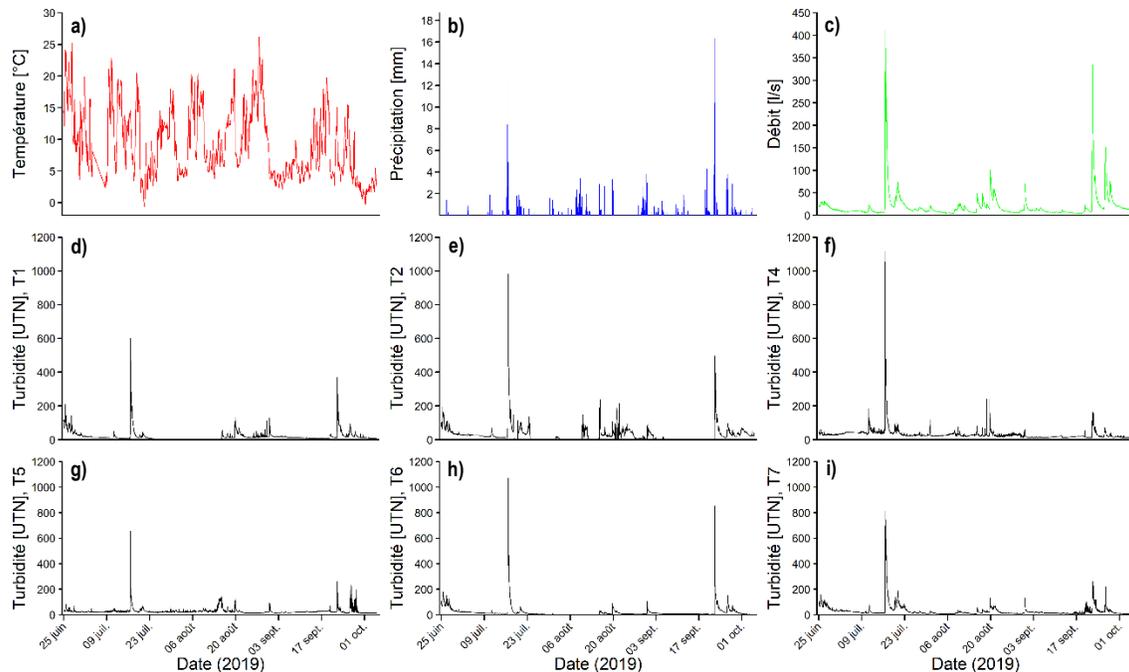


Figure 28. Données horaires récoltées entre le 24 juin et le 4 octobre 2019 dans la vallée Tasiapik : a) les températures atmosphériques moyennes, b) les précipitations totales, c) le débit de la rivière et sa turbidité aux sites d) T1, e) T2, f) T4, g) T5, h) T6, i) T7. Source : Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques.

La période du 25 au 27 juin fut caractérisée par des hausses quotidiennes de la turbidité, et ce, pour tous les sites à l'exception du T4. Le maximum de turbidité atteint lors de cette période a été observé le 25 juin, suivi d'une diminution progressive les journées suivantes. Le site T1 a enregistré la plus haute turbidité lors de cette période avec un maximum de 211 UTN. Le site T4, qui est le site où la turbidité a été la plus élevée lors de l'été 2019, n'a pas connu de hausses significatives similaires aux autres sites; le maximum de turbidité enregistré par T4 le 25 juin fut seulement de 61 UTN. Entre les 25 et 27 juin, les précipitations dans la vallée Tasiapik furent presque nulles, avec seulement 1,4 mm le 26 juin ainsi que 0,3 mm le 27 juin. Ces deux événements de précipitations se sont chacun produits dans un intervalle de temps de seulement une heure. Le débit de la rivière lors de cette période est demeuré relativement stable, variant entre 20 et 30 l/s. Cette période fut caractérisée par des températures atmosphériques très élevées comparativement aux moyennes de saison. En effet, ces trois journées furent parmi les cinq plus chaudes de la période d'analyse, avec des moyennes quotidiennes variant entre 17,8 et 19,2 °C. La station environnementale VDTSILA a enregistré un maximum horaire de plus de 25 °C le 27 juin. En observant la Figure 29, qui montre la variation de la turbidité au site T2 en lien avec les paramètres météorologiques lors de la période du 25 au 27 juin, on remarque que la turbidité ne varie pas en fonction du débit de la rivière ni des précipitations. Ce

graphique montre que la turbidité, lors d'une des périodes les plus chaudes de l'été, varie de façon similaire à l'augmentation des températures atmosphériques quotidiennes et à l'augmentation du débit de la rivière. L'événement du 25 juin étant plus marqué que les journées suivantes, on observe que l'augmentation de la turbidité débute quelques heures seulement après la hausse des températures atmosphériques et débute avant l'augmentation du débit de la rivière. Le maximum de turbidité atteint pendant cet événement se produit au même moment que le début de la hausse du débit. Lorsque le débit augmente abruptement, on n'observe pas de hausse dans la turbidité de la rivière. Les journées avant cet événement furent caractérisées par un temps très sec, avec seulement 0,6 mm de pluie dans les cinq jours précédents. Cette période fut aussi relativement fraîche, avec des températures atmosphériques moyennes variant entre 1,7 et 8,2 °C entre les 16 et 23 juin.

Le 11 juillet, une augmentation de la turbidité fut enregistrée par T4, avec un maximum atteignant 187 UTN. Il s'agit d'une augmentation plus marquée pour ce site que pour les autres pour cette même date, où un maximum entre 85 et 39 UTN ont été atteints dans les sites T7 et T6 respectivement. Cette hausse de la turbidité s'est produite simultanément à l'augmentation du débit de la rivière, six heures après un événement de précipitations de moyenne intensité (4 mm). Les journées précédentes, les températures atmosphériques quotidiennes étaient au-dessus de la moyenne avec 17,2 °C la journée précédente ainsi que 13,1 °C le 9 juillet.

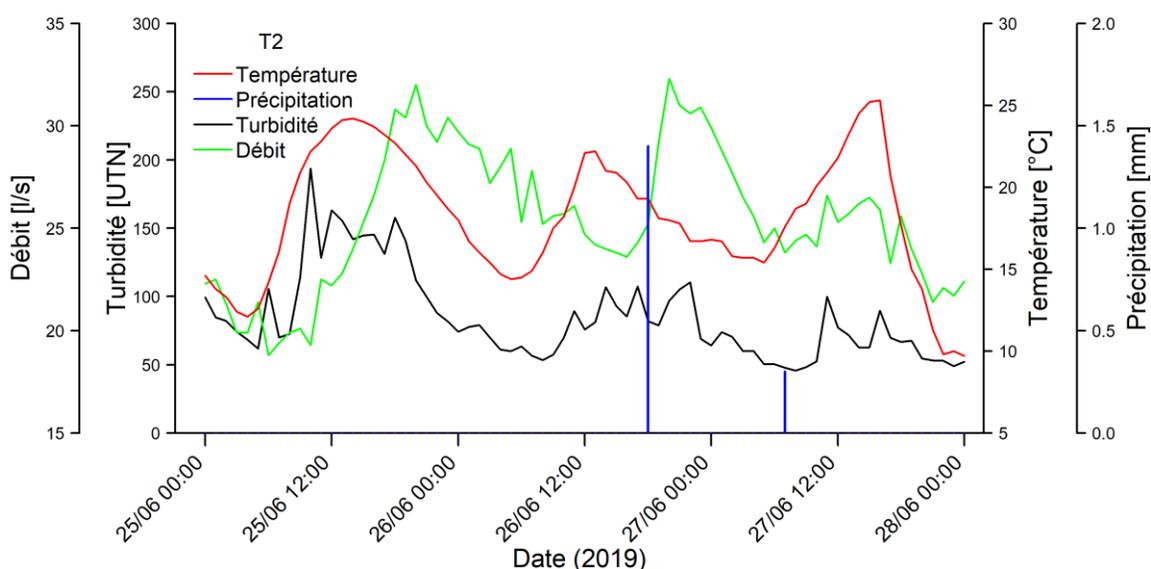


Figure 29. Données sur la turbidité de la rivière Tasiapik au site T2, les températures atmosphériques, les précipitations et le débit de la rivière lors de la période du 25 au 27 juin 2019. Source : Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques.

La turbidité maximale observée lors de l'été 2019 s'est produite simultanément dans tous les sites le 16 juillet, variant entre 1118 UTN, pour le site T4, et 601 UTN, pour le site T1. Le débit maximal horaire atteint à l'été 2019 fut aussi observé cette journée-là; le système de jaugeage a enregistré une pointe atteignant 413 l/s, soit près de 25% de plus que le 2^e plus haut débit atteint à l'été 2019. Cet événement d'écoulement extrême fut vraisemblablement engendré par des précipitations intenses survenues quelques heures auparavant. En effet, le 16 juillet fut la journée la plus pluvieuse de la période d'analyse, avec un total quotidien de 48,2 mm, ce qui correspond à environ 15% du total de précipitations de la saison. La station environnementale VDTSILA a enregistré près de 30 mm de pluie dans un intervalle de temps de seulement 3 heures précédant la pointe maximale de turbidité. Alors que les précipitations et le débit de la rivière furent très élevés pendant cette période, les températures atmosphériques étaient légèrement au-dessus de la moyenne de l'été avec des moyennes quotidiennes variant entre 9,3 et 12,5 °C du 14 au 16 juillet. La Figure 30 met en évidence le rôle important que joue le débit d'une rivière sur la dynamique de transport sédimentaire lors d'un événement d'écoulement extrême. L'événement de précipitations intenses, qui a débuté vers 14h00 le 16 juillet, a engendré une hausse abrupte du débit de la rivière qui, à son tour, a généré une augmentation marquée de la turbidité de la rivière. La turbidité et le débit de la rivière varient de façon similaire avant, pendant et après l'événement : leur augmentation débute simultanément, ils atteignent leur maximum au même moment et diminuent lentement jusqu'à atteindre leur niveau de base, environ 36 heures plus tard.

Suite au plus important événement de turbidité observé à l'été 2019 (survenu le 16 juillet), de légères hausses ont été enregistrées les 19 et 20 juillet, avec une amplitude plus marquée pour les T2, T4 et T7. La turbidité enregistrée par T2 a atteint 114 UTN le 19 juillet et 104 UTN le 20 juillet. Pour le T4, on a observé une turbidité de 111 UTN et 101 UTN pour ces mêmes dates et de 136 UTN et 187 UTN pour le T7. La hausse de turbidité du 19 juillet s'est produite simultanément à une augmentation du débit de la rivière ainsi qu'une hausse de la température atmosphérique, qui a atteint un maximum de 18,5 °C cette journée-là. Une légère période de précipitations (moyenne de 1,2 mm sur trois heures) a été enregistrée cinq heures avant la pointe de turbidité. Lors de l'événement du 20 juillet, le débit de la rivière était en augmentation alors que de légères précipitations (moyenne de 0,9 mm sur 11 heures) furent observées quelques heures avant la hausse de turbidité. Les températures atmosphériques étaient faibles cette journée-là avec une moyenne quotidienne de 2,7 °C. Les 18 et 23 juillet, une augmentation marquée de la turbidité fut observée seulement pour le T2. Ces épisodes se sont

produits alors qu'il n'y avait pas eu de précipitations depuis plus de 24 heures et que le débit de la rivière était stable. Les températures atmosphériques étaient élevées le 18 juillet avec un maximum de 20,5 °C, alors qu'elles étaient basses le 23 juillet avec une moyenne de 6,1 °C.

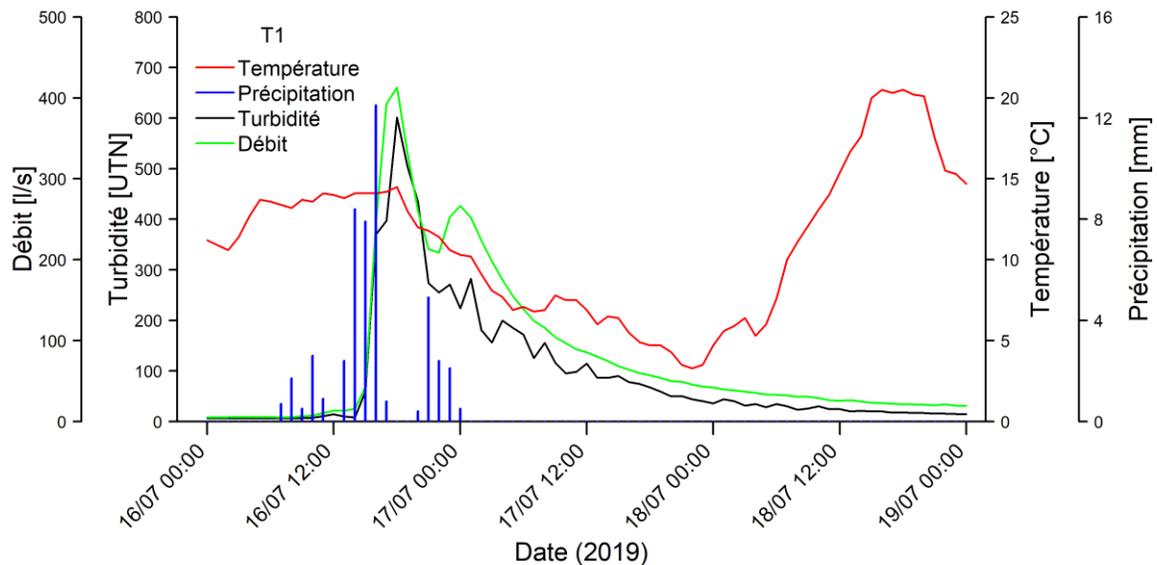


Figure 30. Enregistrements sur la turbidité de la rivière Tasiapik au site T1, les températures atmosphériques, les précipitations et le débit de la rivière lors de la période du 16 au 18 juillet 2019. Source : Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques.

Suite à ces événements, la turbidité de la rivière est demeurée basse jusqu'à la mi-août, à l'exception du site T4, où on a observé une hausse le 31 juillet. En effet, la turbidité a augmenté abruptement pour atteindre un maximum de 120 UTN, avant de diminuer rapidement pour revenir à son niveau de base cinq heures plus tard. La station environnementale VDTSILA a enregistré au même moment des précipitations de 1 mm/h, de même qu'une légère augmentation du débit de la rivière. Les températures atmosphériques des jours précédents étaient plus élevées que la moyenne, avec une moyenne de 15 °C le 30 juillet et de 13,3 °C le 29 juillet. Cet événement a seulement été observé au site T4, les autres instruments ont enregistré une turbidité qui variait entre 7 UTN, pour le T6, et 37 UTN, pour le T5.

Au milieu du mois d'août, plusieurs hausses ponctuelles de turbidité furent observées, particulièrement au site T2. Le 9 août, la turbidité de la rivière à ce site a augmenté jusqu'à 169 UTN, alors que les sites T4 et T7 n'ont connu que de légères hausses et qu'aucune variation n'a été observée pour les sites T1, T5 et T6. Avant cet événement, les températures atmosphériques quotidiennes sont demeurées au-dessus de la moyenne de saison pendant 5 jours, avec un maximum de 15,5 °C enregistré le 8 août. Cette augmentation de la turbidité s'est produite pendant une hausse du débit et un épisode de

précipitations d'intensité moyenne (5,7 mm durant les huit heures précédant la hausse). La turbidité est demeurée relativement élevée pendant les deux jours suivants cet événement, avec des moyennes quotidiennes d'environ 50 UTN. Le 15 août, une hausse de turbidité a été observée au site T2, atteignant 238 UTN. Cette augmentation a aussi été observée au site T5, avec un maximum de 141 UTN, alors que les autres turbidimètres n'ont pas enregistré d'augmentation significative, variant entre 33 et 82 UTN. Les températures atmosphériques sont demeurées basses les jours précédents l'événement, alors que la quantité de précipitations a atteint 9,7 mm durant les cinq heures précédentes et le débit a augmenté jusqu'à 50 l/s. Le 19 août, la station environnementale VDTSILA a enregistré des précipitations légèrement plus faibles que l'événement précédent (7,1 mm en cinq heures), mais le débit a atteint le double de celui atteint lors de l'épisode du 15 août, avec un maximum de plus de 100 l/s. Les températures atmosphériques étaient plus élevées lors de cet événement, alors qu'elles variaient entre 12,7 et 15,6 °C depuis trois jours. Ces conditions météorologiques et d'écoulement ont engendré une hausse de la turbidité, qui a atteint des maximums de 88 à 133 UTN, au site T6 et T7 respectivement. Un autre épisode de turbidité élevée fut observé le 21 août au site T2 seulement alors que le turbidimètre a enregistré une augmentation jusqu'à 190 UTN. Cette hausse fut accompagnée d'une légère augmentation du débit de la rivière. Aucune précipitation n'a été enregistrée les 24 heures précédant cet événement et les températures atmosphériques étaient basses durant cette période.

Le 31 août, un épisode de turbidité d'ampleur similaire à celui du 19 août s'est produit, avec des maximums variant entre 67 et 136 UTN. Les précipitations totales observées cette journée-là furent supérieures à celle du 19 août : 14,8 mm de pluie dans les huit heures précédant l'événement. Toutefois, le débit de la rivière a moins augmenté lors de cet épisode, avec un maximum de 70 l/s, comparativement à 101 l/s le 19 août. Les températures atmosphériques étaient en dessous de la moyenne la veille et furent très basses la journée même, avec une moyenne quotidienne de 4,3 °C.

Le 22 septembre, la rivière Tasiapik a connu son 2^e plus important événement de turbidité de la saison. Durant cet événement, la turbidité maximale a atteint 185 et 854 UTN aux sites T4 et T6 respectivement. La station environnementale VDTSILA a enregistré le 2^e plus haut total de précipitations quotidiennes de la saison, avec 43,2 mm de pluie. D'ailleurs, le plus haut total horaire de la saison fut observé lors de cet événement, avec 16,3 mm de précipitations en seulement une heure. Il s'agit également du 2^e plus haut débit enregistré lors de l'été 2019, avec un maximum de 335 l/s. Les températures atmosphériques étaient en dessous de la moyenne depuis deux jours

Tableau 2. Cinq plus importants événements de turbidité pour chacun des sites lors de l'été 2019, indiquant le maximum atteint lors de chaque événement, la turbidité de la rivière avant l'événement ainsi que les contextes météorologiques et d'écoulement observé avant et pendant la hausse.

Date de l'événement	# Tu	Turbidité (avant / maximum / *)	Contexte pendant l'événement		
			Précipitation	Température	Débit
25 juin	T1	67 / 212 / 3	Nulle depuis + de 24h	Élevée	Stable
	T2	70 / 194 / 5			
	T6	70 / 178 / 3			
	T7	65 / 161 / 5			
26 juin	T6	70 / 154 / 5	Nulle depuis + de 24h	Élevée	Stable
27 juin	T1	37 / 144 / 4	Faible	Élevée	Stable
11 juillet	T4	38 / 187 / 5	Modérée	Moyenne	Augmentation
16 juillet	T1	8 / 601 / 1	Forte	Moyenne	Augmentation
	T2	21 / 983 / 1			
	T4	68 / 1118 / 1			
	T5	26 / 655 / 1			
	T6	20 / 1071 / 1			
	T7	21 / 811 / 1			
20 juillet	T7	87 / 187 / 4	Forte	Basse	Augmentation
14-15 août	T5	88 / 141 / 4	Nulle depuis + de 24h	Moyenne	Stable
15 août	T2	62 / 238 / 3	Forte	Moyenne	Augmentation
18 août	T4	27 / 242 / 3	Nulle depuis + de 24h	Élevée	Augmentation
19 août	T4	23 / 243 / 2	Modérée	Élevée	Augmentation
	T5	33 / 128 / 5			
21 août	T2	4 / 215 / 4	Nulle depuis + de 24h	Moyenne	Stable
30-31 août	T1	19 / 136 / 5	Forte	Basse	Augmentation
21-22 septembre	T1	11 / 370 / 2	Forte	Moyenne	Augmentation
	T2	2 / 496 / 2			
	T4	23 / 185 / 4			
	T5	25 / 261 / 2			
	T6	7 / 854 / 2			
	T7	22 / 296 / 2			
26 septembre	T5	56 / 236 / 3	Forte	Moyenne	Augmentation
	T6	64 / 151 / 4			
	T7	56 / 218 / 3			

Précipitation faible < 2,5 mm; modérée 2,5-7,5 mm; forte > 7,5 mm. Température atmosphérique basse < 6 °C; moyenne 6-15 °C; élevée > 15°C. * Indique le classement de l'événement en nombre d'importance : 1 étant le plus haut niveau de turbidité atteint par ce turbidimètre pendant la période d'analyse et 5 étant le cinquième plus élevé. # Tu indique le numéro du turbidimètre.

Le dernier événement de turbidité élevée enregistré avant que les instruments ne soient retirés s'est produit le 26 septembre, avec un maximum variant entre 69 et 236 UTN aux T4 et T5. Comparativement aux autres événements de transport sédimentaire importants de la saison, il ne s'agit pas d'une hausse très marquée, à l'exception de T5 et de T7 où la turbidité a dépassé 200 UTN. Pourtant, si on observe le débit maximal de la rivière cette journée-là, il s'agit du 3^e plus haut débit de la saison avec un maximum de 151 l/s. Ce fut aussi la 3^e journée la plus pluvieuse de l'été, avec un

total quotidien de 25,2 mm. Les températures atmosphériques étaient assez basses durant cette période; elles sont demeurées sous la moyenne de saison lors de six des sept journées précédant l'événement.

Corrélations

Les relations entre la turbidité et les paramètres météorologiques et hydrologiques (température atmosphérique, précipitations et débit de la rivière) ont tout d'abord été analysées à l'aide de tests de corrélations. Des tests d'hypothèse ont été produits avec la méthode du coefficient de corrélation de Pearson pour déterminer la présence ou l'absence de relation linéaire significative entre les variables ainsi que la force et le sens de cette relation. Ces tests ont été réalisés sur plusieurs jeux de données représentant différentes périodes de temps ou événements météorologiques distincts. Les résultats des tests d'hypothèses doivent être interprétés avec précautions. En effet, avec un grand nombre d'observations, comme c'est le cas dans cette étude ($n = 10375$), les résultats tendent plus facilement vers une relation significative. Il est donc intéressant de se fier davantage à la force du coefficient de corrélation (r) que simplement aux résultats des tests d'hypothèse.

Les corrélations ont tout d'abord été effectuées sur les moyennes quotidiennes des données prélevées à l'été 2019. Les résultats présentés au Tableau 3 indiquent que la turbidité varie quotidiennement en fonction des précipitations totales quotidiennes et du débit moyen de la rivière. Ces relations s'observent dans tous les sites étudiés, mais la force de la corrélation diffère d'un site à l'autre. La force de la relation entre la turbidité et le débit de la rivière est plus grande au site T7 ($r = 0,85$), tandis que celle entre la turbidité et les précipitations est plus forte au site T5 ($r = 0,71$). Ce dernier site est d'ailleurs le seul où on observe une corrélation plus importante entre la turbidité et les précipitations ($r = 0,71$) qu'entre la turbidité et le débit ($r = 0,68$). Pour les autres sites, les résultats indiquent une plus forte corrélation entre la turbidité et le débit qu'entre la turbidité et les précipitations. Lorsque les données quotidiennes sont utilisées, il n'y a pas de relation entre la turbidité et les températures atmosphériques, et ce, pour l'ensemble des sites. Toutefois, lorsque ces tests sont réalisés sur la moyenne de température des 48 heures qui précédaient le moment où la mesure de turbidité a été enregistrée (*Temp 48h*), on observe une corrélation significative entre cette variable et la turbidité de la rivière Tasiapik ($r = 0,15$). Les résultats des tests effectués sur chacun des sites supposent qu'il existe une corrélation significative entre la moyenne de température des 48 heures précédentes et la

turbidité pour seulement deux des six sites échantillonnés à l'été 2019 : le site T1 ($r = 0,26$) et le site T4 ($r = 0,23$).

Tableau 3. Corrélations entre la turbidité et les températures atmosphériques, les précipitations et le débit pour l'ensemble de la rivière Tasiapik ainsi que pour les six stations installées à l'été 2019. Les données proviennent de moyennes quotidiennes récoltées entre le 25 juin et le 4 octobre 2019. Le tableau des résultats comprend le coefficient de corrélation de Pearson pour chacune des relations ainsi que les tests d'hypothèse : les valeurs en gras indiquent une corrélation significative ($p = 0$ **** 0.001 *** 0.01 ** 0.05). Source : Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques.

Turbidité [UTN]	Temp [°C]	Temp 48h [°C]	P [mm/h]	Q [l/s]
Tasiapik	0.08	0.15***	0.60***	0.75***
T1	0.18	0.26*	0.56***	0.81***
T2	-0.05	-0.05	0.60***	0.82***
T4	0.19	0.23*	0.64***	0.67***
T5	0.04	0.13	0.71***	0.68***
T6	0.09	0.16	0.67***	0.83***
T7	0.02	0.18	0.56***	0.85***

Dans le but de mieux représenter les relations entre les différents paramètres avec une résolution de temps plus grande, des tests de corrélation ont été effectués sur les données horaires (Tableau 4). Les résultats de ces analyses statistiques supposent qu'il existe une corrélation positive entre la turbidité et le débit de la rivière, et ce, pour l'ensemble des sites ($r = 0,77$). La force du coefficient de corrélation est similaire à celui obtenu pour les moyennes quotidiennes ($r = 0,75$). Bien que les corrélations soient significatives entre la turbidité de la rivière et les précipitations, la force du coefficient de Pearson est plus faible lorsqu'on utilise les données horaires ($r = 0,27$), comparativement aux données quotidiennes ($r = 0,60$). La force des coefficients de corrélation est similaire pour l'ensemble des sites, avec des relations de moyen effet variant entre 0,22 pour le site T7 et 0,36 pour le site T4. Les résultats supposent qu'il existe une très faible corrélation entre les températures atmosphériques et la turbidité de la rivière ($r = 0,06$). Ces résultats sont significatifs seulement pour les sites T1, T4 et T6. Toutefois, tel que mentionné précédemment, le très grand nombre d'observations ($n = 10375$) influence le résultat des tests d'hypothèse, alors que ceux-ci tendent plus facilement vers une corrélation significative lorsque le nombre d'observations augmente. Ainsi, on peut supposer que ces résultats sont statistiquement biaisés et que l'hypothèse nulle, indiquant qu'il n'y a pas de corrélation, doit être considérée. Tel qu'observé dans le Tableau 3, les relations entre les températures atmosphériques et la turbidité de la rivière sont plus fortes lorsque les tests sont effectués sur la

moyenne des températures des deux jours précédents (*Temp 48h*). Les résultats des analyses statistiques indiquent une corrélation de force faible ($r = 0,13$) entre ces variables, avec un indice plus fort pour le site T1 ($r = 0,20$) et plus faible pour le site T2 ($r = 0,06$).

Tableau 4. Corrélations entre la turbidité et les températures atmosphériques, les précipitations et le débit pour l'ensemble de la rivière Tasiapik ainsi que pour les six stations installées à l'été 2019. Les analyses ont été effectuées sur les données horaires récoltées entre le 25 juin et le 4 octobre 2019. Le tableau des résultats comprend le coefficient de corrélation de Pearson pour chacune des relations ainsi que les tests d'hypothèse : les indices en gras indiquent une corrélation significative ($p = 0$ **** 0.001 *** 0.01 ** 0.05). Source : Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques.

Turbidité [UTN]	<i>Temp</i> [°C]	<i>Temp 48h</i> [°C]	<i>P</i> [mm/h]	<i>Q</i> [l/s]
Tasiapik	0.06***	0.13***	0.27***	0.77***
T1	0.13***	0.20***	0.24***	0.84***
T2	0.02	0.06*	0.24***	0.84***
T4	0.11***	0.17***	0.36***	0.63***
T5	0.02	0.09***	0.32***	0.70***
T6	0.12***	0.15***	0.32***	0.83***
T7	0.01	0.13***	0.22***	0.86***

Les tests de corrélation ont été réalisés sur des séries de temps représentant des conditions météorologiques extrêmes dans le but de mieux comprendre comment les relations entre la turbidité et les autres variables évoluent lors de telles conditions. Deux types d'événements ont été analysés : 1) les périodes de températures chaudes (> 15 °C) et 2) les périodes de précipitations d'intensité modérées à fortes ($> 2,5$ mm/h).

Les résultats des analyses statistiques sur le premier type d'événement sont présentés dans le Tableau 5. Selon les mesures prélevées à l'été 2019, la turbidité de la rivière Tasiapik et les températures atmosphériques varient de façon similaire lors des périodes chaudes ($r = 0,26$). En appliquant ces analyses statistiques sur chacun des sites séparément, on remarque que cette relation est significative pour les sites T1, T2, T6 et T7. La force des corrélations est plus élevée pour les sites T2 et T6 ($r = 0,43$ et $r = 0,45$) que pour les sites T1 et T7 ($r = 0,36$ et $r = 0,26$). Ces résultats sont similaires à ceux obtenus lorsque les analyses sont effectuées avec la moyenne de température des jours précédents (*Temp 48h*), à l'exception du site T6 où on observe une corrélation beaucoup plus forte entre cette dernière variable et la turbidité ($r = 0,72$). Les résultats indiquent également que, globalement, il n'y a pas de corrélations entre les précipitations et la turbidité de la rivière lorsque les températures atmosphériques sont élevées. Le site T5 est le seul site où on observe une relation entre ces deux

variables lors de telles conditions, mais la force du coefficient est faible ($r = 0,21$). Tel qu'observé avec les résultats des analyses statistiques précédentes (Tableau 3 et Tableau 4), il existe une corrélation significative entre le débit de la rivière et sa turbidité pour ce jeu de données. Toutefois, la relation entre ces variables est plus faible lorsque les températures atmosphériques sont élevées ($r = 0,56$) que lorsqu'il n'y a pas de distinction faite quant aux températures ($r = 0,77$).

Tableau 5. Corrélations entre la turbidité et les températures atmosphériques, les précipitations et le débit pour l'ensemble de la rivière Tasiapik ainsi que pour les six stations installées à l'été 2019. Les analyses ont été effectuées sur les données horaires comprenant seulement les périodes de températures atmosphériques élevées ($> 15\text{ }^{\circ}\text{C}$), récoltées entre le 25 juin et le 4 octobre 2019. Le tableau des résultats comprend le coefficient de corrélation de Pearson pour chacune des relations ainsi que les tests d'hypothèse : les indices en gras indiquent une corrélation significative ($p = 0$ **** 0.001 *** 0.01 ** 0.05). Source : Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques.

Turbidité [UTN]	Temp [$^{\circ}\text{C}$]	Temp 48h [$^{\circ}\text{C}$]	P [mm/h]	Q [l/s]
Tasiapik	0.26***	0.30***	0.02	0.56***
T1	0.36***	0.33***	0.04	0.59***
T2	0.43***	0.47***	0.02	0.65***
T4	-0.01	-0.05	0.03	0.21***
T5	0.05	0.03	0.21***	0.56***
T6	0.45***	0.72***	-0.07	0.65***
T7	0.26***	0.34***	0.01	0.77***

Des tests de corrélations ont été produits pour une période de temps durant laquelle les températures atmosphériques sont demeurées élevées pendant plusieurs jours, soit du 25 au 27 juin (Tableau 6). Ainsi, des corrélations significatives ont été observées entre la turbidité et les températures atmosphériques. Le T6 est celui dont la relation fut la plus forte, avec un coefficient de corrélation de 0,59. Le site T4 est le seul site où les températures atmosphériques et la turbidité ne varient pas de façon similaire lors de cet événement. La Figure 28 démontre qu'il n'y a pas eu de hausse de la turbidité entre les 25 et 27 juin pour ce site, expliquant l'absence de corrélation entre la turbidité et les trois variables (*Temp*, *P* et *Q*). Lors de cette période, les résultats des tests supposent qu'il n'y a pas eu de corrélations entre les précipitations et la turbidité de la rivière, ce qui peut être expliqué par la faible occurrence des précipitations durant cette période. Ces derniers résultats sont représentatifs des résultats obtenus pour l'ensemble de la période d'analyse lors de périodes chaudes (Tableau 5). Contrairement aux résultats obtenus précédemment, on n'observe pas de relation globale entre le débit de la rivière et la turbidité. Les sites T5 et T7 sont les seuls sites où une corrélation a été observée entre ces variables lors de cette période ($r = 0,47$ et $r = 0,33$). La Figure 31 présente les relations entre

la turbidité au site T1 et les différentes variables lors de cet événement. Pour ce site, les résultats suggèrent qu'il existe une corrélation significative seulement entre la turbidité et les températures atmosphériques ($r = 0,50$) : la turbidité au site T1 ne varie pas de façon similaire au débit ainsi qu'aux précipitations pendant cet événement. Par ailleurs, une augmentation presque simultanée est visible entre les températures et la turbidité lors des trois journées, particulièrement le 25 juin. Ces hausses quotidiennes de matières en suspension dans la rivière n'ont pas été enclenchées par l'augmentation du débit de la rivière, puisque cette augmentation débute seulement après les pointes de turbidité. L'absence de précipitation le 25 juin et les journées précédentes indiquent également que la turbidité n'a pas été engendrée par la pluie.

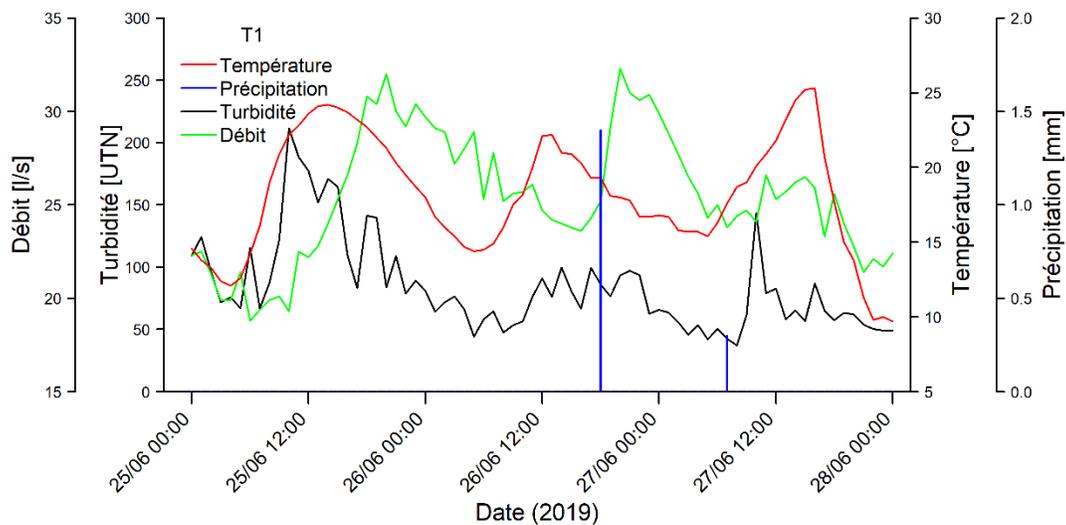


Figure 31. Enregistrements horaires sur la turbidité de la rivière Tasiapik au site T1, les températures atmosphériques, les précipitations et le débit de la rivière lors de la période chaude du 25 au 27 juin 2019. Source : Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques.

Les périodes de précipitations d'intensité modérée et forte ont aussi été investiguées dans le but de mieux comprendre comment la turbidité varie dans de telles circonstances. Les résultats des corrélations réalisées avec ce jeu de données sont présentés au Tableau 7. Les relations entre la turbidité et les paramètres sont très différentes pour ce type d'événement que pour celui présenté précédemment. En effet, lors des périodes de précipitations élevées à l'été 2019, il n'existe pas de corrélation entre la turbidité de la rivière Tasiapik et les températures atmosphériques. L'utilisation des données sur la moyenne des températures des jours précédents n'influence pas le résultat des analyses dans ce cas-ci.

Tableau 6. Corrélations entre la turbidité et les températures atmosphériques, les précipitations et le débit pour les six stations installées à l'été 2019 dans la rivière Tasiapik. Les données proviennent d'enregistrements horaires récoltés entre les 25 et 27 juin 2019, alors que les températures atmosphériques sont demeurées relativement élevées. Le tableau des résultats comprend le coefficient de corrélation de Pearson pour chacune des relations ainsi que les tests d'hypothèse : les indices en gras indiquent une corrélation significative ($p = 0$ **** 0.001 *** 0.01 ** 0.05). Source : Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques.

Turbidité [UTN]	Temp [°C]	P [mm/h]	Q [l/s]
T1	0.50***	-0.02	-0.16
T2	0.58***	-0.04	0.03
T4	0.02	-0.09	0.08
T5	0.29*	-0.03	0.47***
T6	0.59***	-0.05	0.21
T7	0.50***	0.01	0.33**

Tableau 7. Corrélations entre la turbidité et les températures atmosphériques, les précipitations et le débit pour l'ensemble de la rivière Tasiapik ainsi que pour les six stations installées à l'été 2019. Les analyses ont été effectuées sur les données horaires comprenant seulement les périodes de précipitations d'intensité modérée ou forte (> 2,5 mm/h), récoltées entre le 25 juin et le 4 octobre 2019. Le tableau des résultats comprend le coefficient de corrélation de Pearson pour chacune des relations ainsi que les tests d'hypothèse : les indices en gras indiquent une corrélation significative ($p = 0$ **** 0.001 *** 0.01 ** 0.05). Source : Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques.

Turbidité [UTN]	Temp [°C]	Temp 48h [°C]	P [mm/h]	P 24h [mm]	Q [l/s]
Tasiapik	0.17	0.03	0.50***	0.66***	0.74***
T1	0.14	0.14	0.50*	0.80***	0.92***
T2	0.18	-0.04	0.68**	0.88***	0.94***
T4	0.19	0.06	0.46**	0.61**	0.58**
T5	0.16	-0.04	0.58**	0.67***	0.78***
T6	0.29	-0.02	0.75**	0.73**	0.86***
T7	0.11	0.03	0.46*	0.77***	0.93***

Les résultats démontrent qu'il existe des relations positives entre la turbidité et les précipitations, et ce, pour tous les sites à l'étude. Ces relations sont plus importantes lorsque les données incluent seulement les précipitations d'intensité modérée ou forte ($r = 0,50$), comparativement aux analyses réalisées sur le jeu de données incluant tous les enregistrements (Tableau 4; $r = 0,27$). La force des coefficients de corrélation varie entre 0,46 pour les sites T4 et T7 et 0,75 pour le site T6. Dans le cas de l'événement survenu entre le 10 et le 12 juillet 2019 (Figure 32), la hausse de la turbidité et du débit est survenue huit heures après la fin de l'événement de précipitations. Il était donc intéressant d'analyser la relation entre la turbidité de la rivière et le total des précipitations survenues dans les heures avant l'enregistrement de turbidité, indiqué dans le Tableau 7 par la variable P 24h. En

procédant aux analyses sur ces données, on observe une augmentation importante de la force du coefficient de corrélation ($r = 0,66$), et ce, pour la majorité des sites. Par exemple, pour T2 le coefficient de corrélation de Pearson est de 0,68 pour la variable P , alors qu'il est de 0,88 pour la variable $P\ 24h$. Ainsi, lors des périodes de précipitations d'intensité modérée ou forte, la turbidité de la rivière et les précipitations totales des heures précédentes possèdent une très forte corrélation positive; la turbidité augmente en fonction de la hausse des précipitations totales.

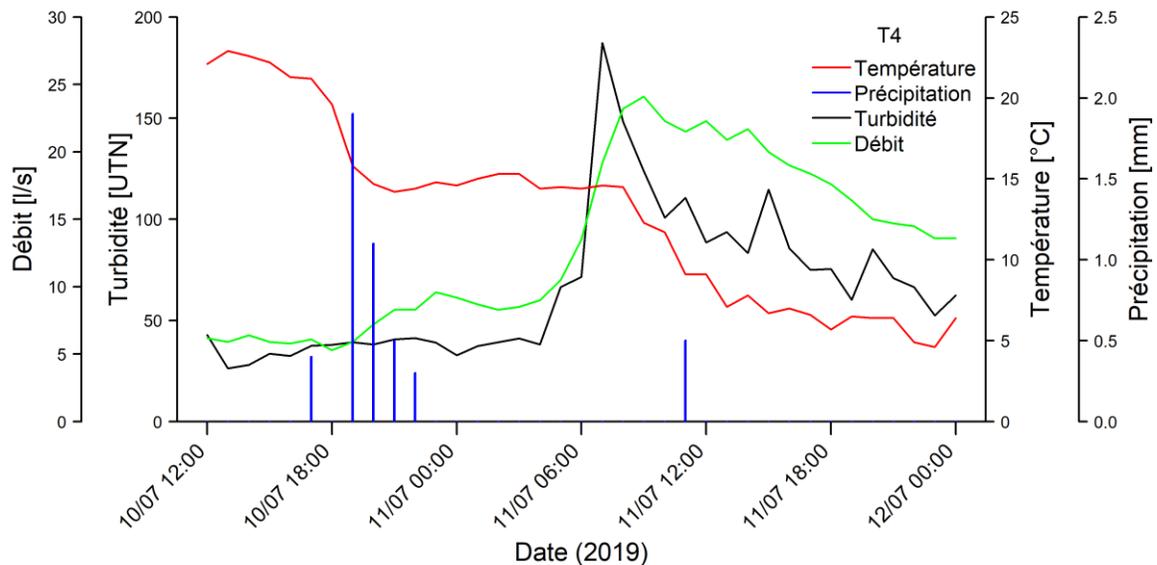


Figure 32. Enregistrements horaires sur la turbidité de la rivière Tasiapik au site T4, les températures atmosphériques, les précipitations et le débit de la rivière entre les 10 et 12 juillet 2019. Source : Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques.

ANOVA

Des analyses de variances à deux critères ont été réalisées dans le but d'analyser l'effet de deux variables catégoriques sur la variable réponse turbidité (Tu). Les ANOVA ont été produites avec les données horaires et sur deux combinaisons de variables explicatives : 1) température atmosphérique (T) et débit (Q) ainsi que 2) précipitation (P) et débit (Q). Les tests ont été appliqués sur l'ensemble de la rivière Tasiapik dans le but d'obtenir des résultats globaux, ainsi que sur chacune des six stations. Les conditions d'applications ont été vérifiées avant de procéder aux analyses; une transformation Log+1 a dû être appliquée sur la variable réponse pour respecter l'homoscédasticité des variances. Pour la réalisation de ce type d'analyse statistique, les variables explicatives doivent être sous forme de variables catégoriques. Elles ont donc chacune été divisées en trois classes : pour les températures atmosphériques, la classe 1 représente les températures froides ($< 6\text{ }^{\circ}\text{C}$), la classe 2 celles moyennes

(6-15 °C) et la classe 3 celles élevées (> 15 °C). Pour les classes de débit, des conditions de débit faible (< 10 l/s) de la rivière correspondent à la classe 1, un débit moyen (10-40 l/s) à la classe 2 et un débit élevé (> 40 l/s) à la classe 3. Les valeurs de précipitations ont aussi été séparées en trois classes : la classe 1 inclut les périodes sans précipitation (0 mm/h), la classe 2 les périodes de précipitations d'intensité faible (0,1-2,5 mm/h) et la classe 3 les périodes de précipitations d'intensités modérée et forte (> 2,5 mm/h).

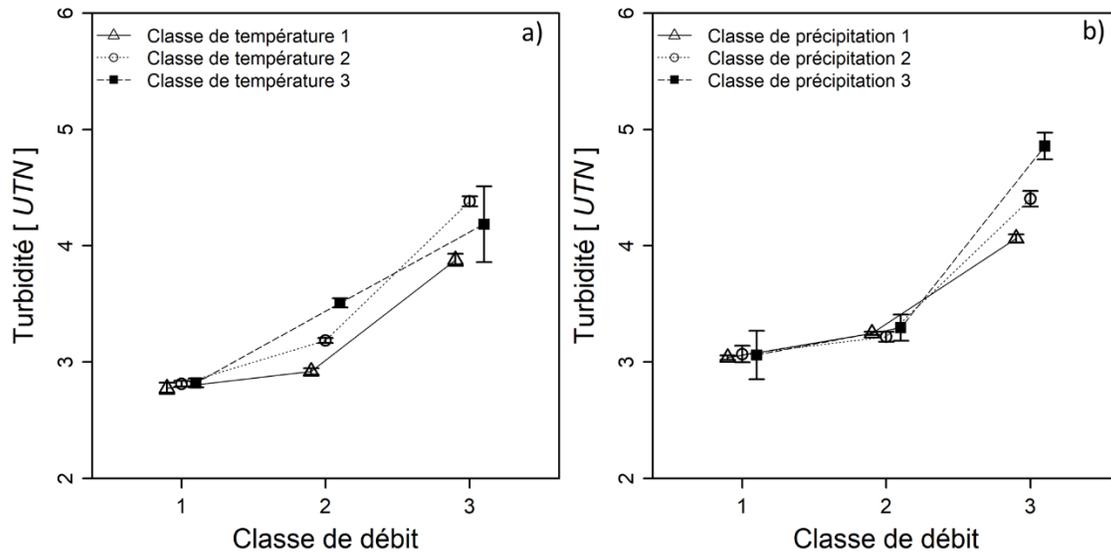


Figure 33. Résultats de l'ANOVA sur les effets a) des températures atmosphériques et du débit sur la turbidité et b) des précipitations sous forme de pluie et du débit sur la turbidité. Les analyses ont été effectuées sur les mesures horaires de l'ensemble de la rivière. Les données sur les températures atmosphériques, les précipitations et le débit de la rivière ont été séparées en trois classes : < 6 °C correspond à la classe T 1; 6–15 °C à la classe T 2; > 15 °C à la classe T 3. L'absence de précipitations correspond à la classe P 1; 0,1-2,5 mm/h à la classe P 2; > 2,5 mm/h à la classe P 3. Un débit de <10 l/s correspond à la classe Q 1; 10-40 l/s à la classe Q 2; > 40 l/s à la classe Q 3. Source : Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques.

Pour les premières analyses effectuées, on s'intéresse à l'effet de la température atmosphérique et du débit de la rivière Tasiapik sur le niveau de turbidité de l'eau de la rivière. Les résultats de l'ANOVA rejettent l'hypothèse nulle dans les deux cas : il y a une différence significative dans la turbidité selon les températures atmosphériques ($p < 2e-16$) et selon le débit de la rivière ($p < 2e-16$). Une comparaison multiple a été produite pour identifier quelles classes de température et de débit diffèrent entre elles. Les résultats de ce test supposent que les trois classes de températures atmosphériques sont significativement différentes entre elles (classe 1-2 : $p < 2e-16$; classe 1-3 : $p < 2e-16$; classe 2-3 : $p = 0,002$), indiquant que l'effet qu'exercent les températures sur la turbidité de la rivière est différent selon la classe. Les résultats de la comparaison multiples sont similaires pour les classes de débit ($p < 2e-16$).

La Figure 33a présente les résultats de l'ANOVA avec les moyennes de chacune des classes ainsi que les intervalles de confiance à 95%. Les valeurs moyennes de turbidité sont présentées avec la transformation Log+1 appliquée préalablement. Le graphique permet d'observer les effets combinés du débit et de la température atmosphérique sur la turbidité de la rivière :

- la turbidité de la rivière est à son maximum lors des conditions d'écoulement rapide ($Q 3$), et de températures atmosphériques moyennes ($T 2$) ou élevées ($T 3$);
- les plus basses mesures de turbidité sont observées lors de conditions de débit faible ($Q 1$), peu importe la classe de température;
- les températures atmosphériques ont une plus grande influence sur la turbidité de la rivière lors de périodes de débit moyen ($Q 2$) : la différence entre les classes de températures est plus importante avec cette classe de débit. Lors de telles conditions, la turbidité est plus haute lorsque les températures sont élevées ($T 3$) et plus faible lorsque les températures sont basses ($T 1$);
- lorsque le débit de la rivière est élevé ($Q 3$), on observe une différence significative entre les classes $T 1$ et $T 2$. Il n'y a toutefois pas de différence entre la classe $T 3$ et les deux autres ($T 3$ et $T 1$ ainsi que $T 3$ et $T 2$);
- les effets sur la turbidité sont plus marqués par la différence entre les classes de débit que par la différence entre les classes de température, indiquant qu'une augmentation ou diminution du débit de la rivière exerce une plus grande influence sur le niveau de turbidité qu'une variation des températures atmosphériques.

Ainsi, l'influence qu'exercent les différentes classes de température dans le transport sédimentaire de la rivière Tasiapik dépend du débit de la rivière. Lors d'un écoulement faible, la température atmosphérique n'a pas d'impact sur la turbidité de la rivière. Avec des conditions de débit moyen, des températures atmosphériques chaudes généreront une plus grande turbidité dans la rivière Tasiapik. Lors d'un débit rapide, la turbidité est plus importante lorsque les températures atmosphériques sont moyennes ou élevées. Le grand intervalle de confiance associé au groupe $T 3 - Q 3$ est expliqué par son faible nombre d'observations ($n = 12$). Cela peut aussi expliquer l'absence de différence entre les classes de températures basses et élevées lors de conditions de débit élevé.

En analysant chacun des sites séparément (Figure 34), on observe que les résultats diffèrent légèrement d'un site à l'autre, mais que, globalement, ils sont semblables aux résultats obtenus pour l'ensemble de la rivière (Figure 33). Ces analyses permettent d'observer que dans les sites T1 (Figure 34a), T6 (Figure 34e) et T7 (Figure 34f), lors de condition de débit moyen il y a une grande différence dans la moyenne de turbidité entre les classes de température 3 et les classes 1 et 2, ce qu'on n'observe pas dans les autres sites (T2, T4 et T5). De plus, le site T4 (Figure 34c) est le seul site pour lequel les températures atmosphériques élevées génèrent une plus grande turbidité, et ce, peu importe la classe de débit.

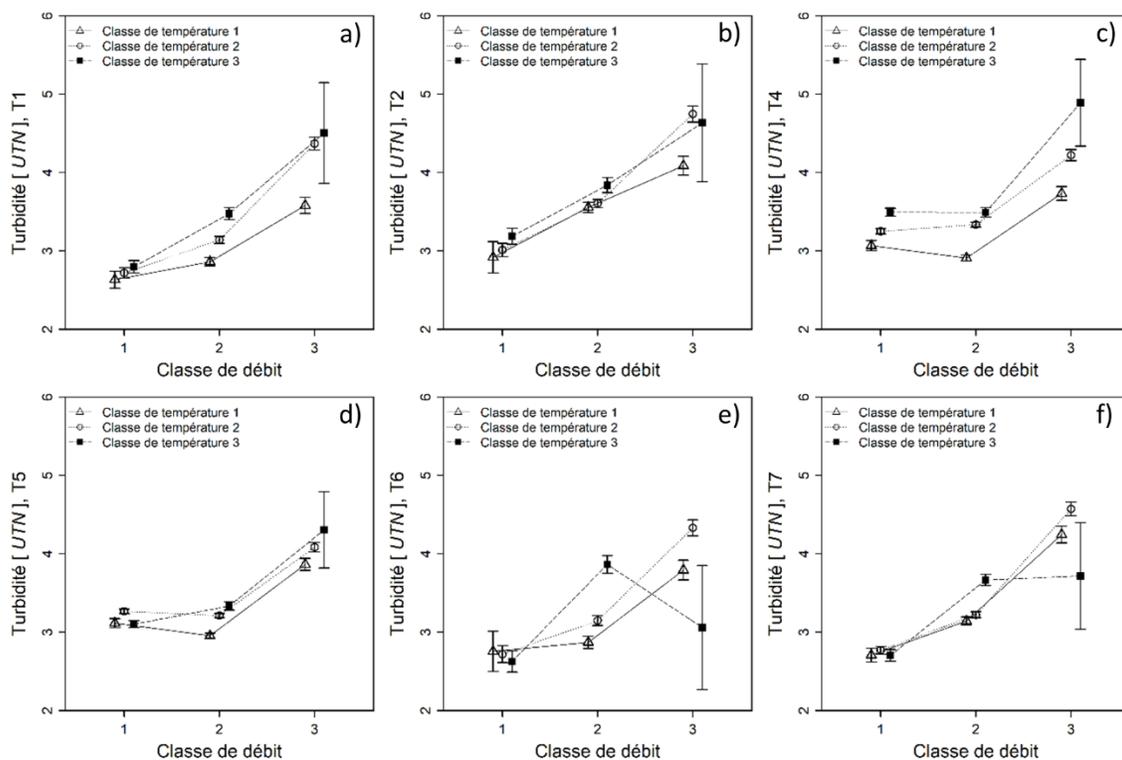


Figure 34. Résultats de l'ANOVA quant aux effets des températures atmosphériques et du débit de la rivière sur la turbidité pour chacun des sites; a) T1, b) T2, c) T4, d) T5, e) T6 et f) T7. Les analyses ont été effectuées sur les mesures horaires. Les données sur les températures atmosphériques et le débit de la rivière ont été séparées en trois classes : < 6 °C correspond à la classe T 1; 6-15 °C à la classe T 2; > 15 °C à la classe T 3. Un débit de <10 l/s correspond à la classe Q 1; 10-40 l/s à la classe Q 2; >40 l/s à la classe Q 3.

Source : Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques.

Une ANOVA à deux critères a été produite pour les variables explicatives, précipitations et débit, afin de mettre en évidence l'effet qu'exercent ces paramètres sur la turbidité de la rivière Tasiapik. Les résultats de cette analyse démontrent que les précipitations ($p < 2e-16$) ainsi que le débit ($p < 2e-16$) ont une influence significative sur la turbidité de la rivière. Une comparaison multiple a permis de déterminer que les moyennes de chacune des classes sont toutes significativement différentes entre

elles ($p < 2e-16$), tant pour les précipitations que pour le débit. L'analyse de variance effectuée sur ces paramètres est illustrée à la Figure 33b et inclut les moyennes de chacune des classes ainsi que les intervalles de confiance à 95%. Le graphique permet de formuler les constats suivants :

- la turbidité de la rivière est à son maximum lors de conditions de précipitations élevées ($P 3$) et de débit élevé ($Q 3$);
- la turbidité de la rivière est à son plus faible lors de conditions de débit faible ($Q 1$), peu importe la quantité de précipitations;
- les précipitations n'ont pas d'impact significatif sur la turbidité de la rivière lorsque le débit est faible ($Q 1$) et moyen ($Q 2$);
- on observe une augmentation marquée de la turbidité pendant des conditions d'écoulement rapide ($Q 3$), comparativement aux classes $Q 1$ et $Q 2$;
- lors de conditions d'écoulement rapide, les précipitations intenses entraînent une plus grande turbidité dans la rivière que les précipitations faible ou nulle. Dans de pareilles conditions, les précipitations faibles engendrent une plus grande turbidité que l'absence de précipitation;
- les précipitations ont une plus forte influence sur la turbidité de la rivière lorsque le débit de la rivière est élevé : la différence entre les classes de précipitations est plus importante avec cette classe de débit.

Ces résultats permettent de mettre en évidence le rôle important que jouent les précipitations dans le transport sédimentaire de la rivière Tasiapik. Par contre, les précipitations ont une plus grande influence sur la turbidité de la rivière lors de conditions de débit élevé; à débit faible ou moyen, les précipitations ont peu d'effet sur la turbidité.

Des analyses de variances ont aussi été réalisées sur chacun des sites (Figure 35). Les résultats obtenus sont sensiblement similaires à ceux de l'ANOVA effectuée sur l'ensemble de la rivière. On remarque que dans chacun des sites les précipitations ont plus d'influence sur la turbidité de la rivière lors de conditions de débit élevé. On n'observe pas de différence significative lors de conditions de débit faible, et ce, pour l'ensemble des sites. Les sites T4 (Figure 35c) et T5 (Figure 35d) diffèrent légèrement des autres; la différence entre les classes de précipitations est plus élevée, indiquant que

les précipitations exercent une plus grande influence sur la turbidité dans ces sites. Ce sont d'ailleurs les seuls sites qui, lors de conditions de débit moyen, des précipitations d'intensité modérée ou forte (P 3) engendrent une plus grande turbidité que l'absence de précipitations (P 1).

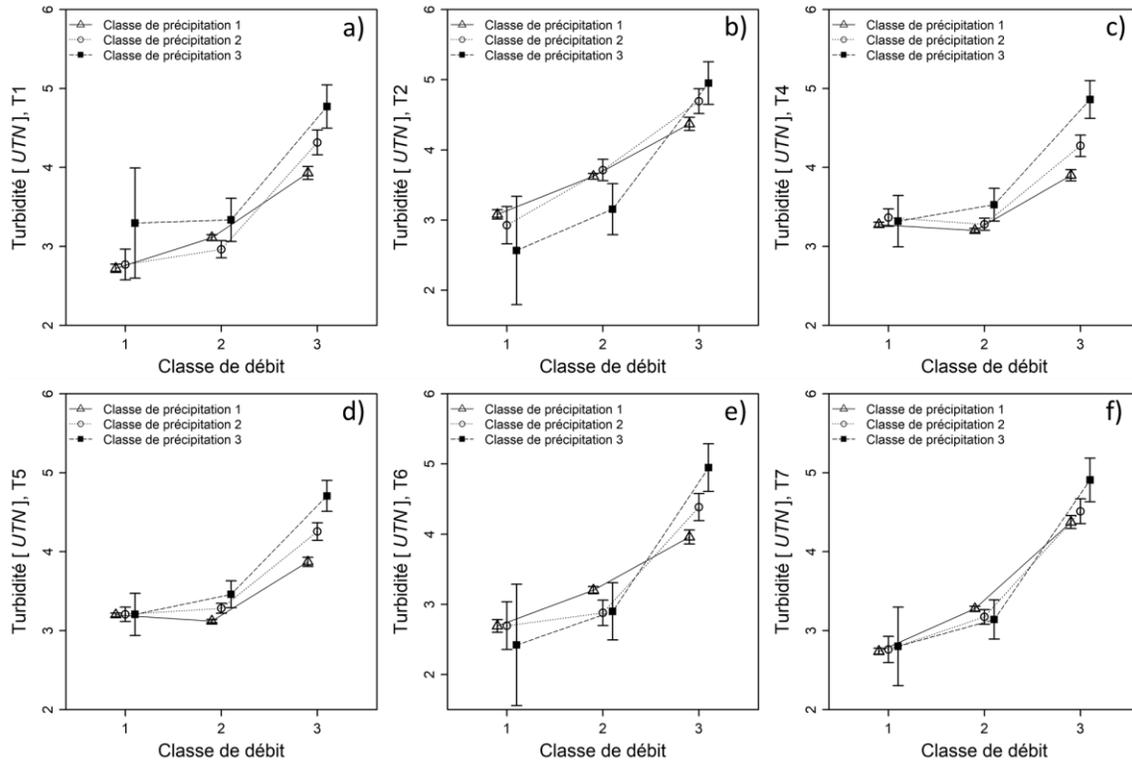


Figure 35. Résultats de l'ANOVA sur les effets des précipitations sous forme de pluie et du débit de la rivière sur la turbidité pour chacun des sites; a) T1, b) T2, c) T4, d) T5, e) T6 et f) T7. Les analyses ont été effectuées sur les données horaires. Les données sur les précipitations et le débit de la rivière ont été séparées en trois classes : l'absence de précipitations correspond à la classe P 1; 0.1-2,5 mm/h à la classe P 2; > 2,6 mm/h à la classe P 3, un débit de <10 l/s correspond à la classe Q 1; 10-40 l/s à la classe Q 2; >40 l/s à la classe Q 3. Source : Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques.

Sélection de modèles

Une sélection de modèles a été effectuée pour déterminer quels paramètres ou combinaison de paramètres influencent le plus la variabilité de la turbidité. 14 modèles candidats ont été élaborés avec les paramètres utilisés préalablement; 1) températures atmosphériques, 2) précipitations, 3) débit de la rivière, 4) site d'étude, 5) moyenne des températures atmosphériques des 48 heures précédentes l'enregistrement de turbidité et 6) total des précipitations des 24 heures précédentes l'enregistrement de turbidité. Les données horaires de ces paramètres sont utilisées pour cette analyse statistique. Les 14 modèles candidats utilisés pour la sélection de modèles sont présentés dans le Tableau 8. Les variables précipitations 24h et débit ne pouvaient pas être incluses dans un même modèle puisque ces variables étaient corrélées entre elles ($r = 0,78$). En ce sens, les paramètres température et

température 48h ainsi que précipitation et précipitations 24h ne pouvaient également pas être inclus dans un même modèle.

Le tableau AIC_c (Tableau 9) présente sommairement les résultats de la sélection de modèles suite aux analyses réalisées sur le logiciel statistique *R*. Les résultats démontrent que deux modèles possèdent un Delta AIC_c (Δ_i) de moins de 2, indiquant que ces modèles sont très plausibles. Ces modèles sont les modèles 10 ($AIC_c = 17648$; $\Delta_i = 0$), qui inclut les paramètres débit, température 48h et site, et 6 ($AIC_c = 17649$; $\Delta_i = 1,70$), qui inclut les paramètres précipitation, débit, température 48h et site. Les autres modèles candidats ont un delta AIC_c variant entre 531, pour le modèle 2, et 6768, pour le modèle 5. Selon la méthode utilisée, ces modèles sont donc improbables et ne seront pas retenus pour les prochaines analyses.

Tableau 8. Présentation des paramètres inclus dans chacun des modèles candidats utilisés dans la sélection de modèles.

Modèle	Variables explicatives utilisées
Mod1	Température + Débit + Précipitation + Site
Mod2	Température + Débit + Site
Mod3	Température + Précipitation + Site
Mod4	Température + Précipitation 24h + Site
Mod5	Température + Site
Mod6	Précipitation + Débit + Température 48h + Site
Mod7	Précipitation + Température 48h + Site
Mod8	Précipitation + Débit + Site
Mod9	Précipitation + Site
Mod10	Débit + Température 48h + Site
Mod11	Débit + Site
Mod12	Température 48h + Précipitation 24h + Site
Mod13	Température 48h + Site
Mod14	Précipitation 24h + Site

Il est aussi intéressant de considérer les poids d'Akaike (w_i) dans le tableau des résultats; cette valeur compare un modèle par rapport à l'ensemble des modèles candidats. Il s'agit d'une variable normalisée sur une échelle de 1 qui représente la probabilité qu'un modèle soit le meilleur parmi tous les modèles utilisés et avec le jeu de données disponible. Le modèle 10, qui est le modèle le plus probable, possède un poids d'Akaike de 0,70 comparativement à 0,30 pour le modèle 6. Ainsi, le premier modèle a 70% de probabilité d'être le meilleur modèle parmi ceux utilisés. En observant le sommaire des résultats

pour ces deux modèles (Annexe C - Résultats des sélections de modèles), on observe que ces deux modèles possèdent un R^2 de 0,50, indiquant qu'ils expliquent 50% de la variabilité de la variable réponse turbidité.

Il est aussi intéressant de considérer les poids d'Akaike (w_i) dans le tableau des résultats; cette valeur compare un modèle par rapport à l'ensemble des modèles candidats. Il s'agit d'une variable normalisée sur une échelle de 1 qui représente la probabilité qu'un modèle soit le meilleur parmi tous les modèles utilisés et avec le jeu de données disponibles. Le modèle 10, qui est le modèle le plus probable, possède un poids d'Akaike de 0,70 comparativement à 0,30 pour le modèle 6. Ainsi, le premier modèle a 70% de probabilité d'être le meilleur modèle parmi ceux utilisés. En observant le sommaire des résultats pour ces deux modèles (Annexe C - Résultats des sélections de modèles), on observe que ces deux modèles possèdent un R^2 de 0,50, indiquant qu'ils expliquent 50% de la variabilité de la variable réponse turbidité.

Tableau 9. Tableau d'AIC_c classé du modèle le plus probable au moins probable.

Modèle	Log-L	AIC _c	Δ_i	w_i
Mod10	-8814	17648	0	0.70
Mod6	-8814	17649	1.70	0.30
Mod2	-9086	18190	542	0
Mod1	-9085	18191	543	0
Mod8	-9170	18359	711	0
Mod11	-9172	18360	712	0
Mod12	-10102	20222	2574	0
Mod4	-10232	20483	2835	0
Mod14	-10343	20703	3055	0
Mod7	-11891	23801	6153	0
Mod13	-12045	24107	6459	0
Mod3	-12090	24199	6551	0
Mod9	-12091	24199	6551	0
Mod5	-12253	24522	6874	0

Les résultats démontrent ainsi que le débit de la rivière Tasiapik et les températures atmosphériques ont un impact important dans la variabilité de la turbidité de la rivière puisque les deux modèles les plus efficaces incluent ces variables. Tel qu'observé avec les résultats des analyses de corrélation, la sélection de modèles démontre que la moyenne des températures des 48 heures précédant le

prélèvement de turbidité explique mieux la variabilité de la turbidité que la température prise simultanément à la mesure de turbidité.

Puisque ces résultats ont déterminé que deux modèles étaient fort probables, une inférence multimodèle a été réalisée. On s'intéresse ici à l'effet de chaque variable incluse dans les modèles qui ont du poids, soit les variables *débit*, *température 48h*, *précipitation* et *site*.

La variable *débit* a un effet de $0,014 \pm 0,001$, avec un intervalle de confiance à 95% de $[0,013; 0,014]$. Ainsi, il y a un effet considérable du débit de la rivière sur la turbidité de l'eau. Celle-ci augmente avec l'augmentation du débit; pour chaque augmentation de 1 l/s du débit de la rivière, la turbidité augmente de $0,014 \pm 0,001$ UTN. La mesure associée à la turbidité dans ce cas-ci est présentée avec une transformation $\text{Log}+1$, telle qu'appliquée au début de la sélection de modèles. Pour ce qui est de la variable *température 48h*, on observe un effet de $0,028 \pm 0,001$, avec un intervalle de confiance à 95% de $[0,026; 0,03]$. La température moyenne des 48 heures qui précèdent la mesure de turbidité a donc un impact sur la turbidité de la rivière Tasiapik : on observe une augmentation de la turbidité de $0,028 \pm 0,001$ UTN pour chaque augmentation de 1 °C de la température atmosphérique moyenne. Une inférence multimodèle a aussi été produite avec la variable *précipitation* puisque celle-ci était incluse dans le modèle 6. Ce paramètre a un effet de $0,001 \pm 0,004$ avec un intervalle de confiance à 95% de $[-0,007; 0,009]$. Puisque l'intervalle de confiance inclut 0, ces résultats supposent que la turbidité de la rivière Tasiapik ne semble pas varier avec l'intensité des précipitations, selon le jeu de données récolté à l'été 2019.

Boucles d'hystérésis

Les boucles d'hystérésis sont utilisées dans le but de caractériser le transport sédimentaire en rivière; elles représentent la relation entre la concentration de sédiments en suspension et le débit de la rivière pour un événement hydrologique. Les analyses effectuées à partir des boucles d'hystérésis incluent, entre autres, la quantification du mode, de l'indice de dispersion et de l'indice d'asymétrie (Williams, 1989). Dans le cadre de cette recherche, les analyses se sont concentrées sur le type de boucle observé pour chacun des événements hydrologiques sélectionnés. Cette analyse qualitative informe sur la source des sédiments en suspension dans une rivière. La source sédimentaire peut changer dans le temps, selon les saisons et selon l'emplacement échantillonné sur la rivière. Ainsi, sur un même site, il est possible d'observer plusieurs types de boucles au cours d'une année. Tout dépendamment

de l'importance de l'événement hydrologique, les graphiques peuvent représenter un intervalle de temps différent : dans le cas de la rivière Tasiapik à l'été 2019, les événements sélectionnés sont d'une durée de 11 à 43h.

Cinq types de boucles peuvent être observées (Williams, 1989; Tananaev, 2015) :

- I. Le type 1 est représenté graphiquement par une ligne, où chaque ratio C/Q lors de la phase montante est égal au ratio C/Q de la phase descendante, pour une même mesure de débit. Il s'agit d'un type d'événement très rare et peu documenté.
- II. Le type 2 s'observe sous forme de boucle orientée en sens horaire, lorsque la valeur de C de la phase montante est plus élevée que la valeur de C associée au même débit lors de la phase descendante. Deux sous-types peuvent être identifiés : a) lorsque C_{max} est atteint avant Q_{max} et b) lorsque C_{max} et Q_{max} sont observés simultanément. Ce type d'événement se produit dans les rivières où la source de sédiments s'épuise rapidement lors de l'événement. On observe alors une augmentation rapide de C au début de l'événement, puis une diminution rapide pendant l'événement, avant que le maximum de débit soit atteint. Généralement, lorsque ce type d'événement est identifié, la source sédimentaire se situe près du site échantillonné et la quantité de sédiments disponibles est limitée. Quelques raisons peuvent expliquer cela : une source provenant de sédiments fluviaux bien triés, une diminution de l'intensité des précipitations et de l'érosion provenant de l'impact des gouttes de pluie (*droplet erosion*), la formation d'un pavage dans les sédiments du lit de la rivière ou le renforcement des berges par les racines à la suite d'un détachement.
- III. Observé relativement rarement, le type 3 est représenté par une boucle dans le sens antihoraire, lorsqu'il y a une augmentation de C après Q_{max} . Ce type d'événement peut être lié à un épisode rapide et localisé de mouvement de masse. Il est aussi relié à l'arrivée tardive d'eau chargée de sédiments provenant d'un tributaire ou lors de détachement du pavage dans le lit de la rivière.
- IV. Le type d'hystérésis 4, représenté graphiquement par une ligne suivie d'une boucle, combine le type 1 avec les types 2 ou 3. Lors d'un débit faible au début et à la fin de l'événement

hydrologique, la concentration de sédiments en suspension et le débit de la rivière varient de façon similaire, alors que lorsque le débit augmente, C et Q ne sont plus synchronisés.

- V. Le type 5 correspond à une figure en huit, combinant les types 2 et 3. On observe ce type de boucle d'hystérésis lorsqu'il y a un chevauchement de différentes sources sédimentaires. Elles sont générées par des vagues de sédiments provenant de la remise en suspension en chenal dans les tributaires. À la fin de l'événement hydrologique, l'érosion des ravins ou l'effondrement des berges peuvent aussi mener à l'observation de ce type d'hystérésis.

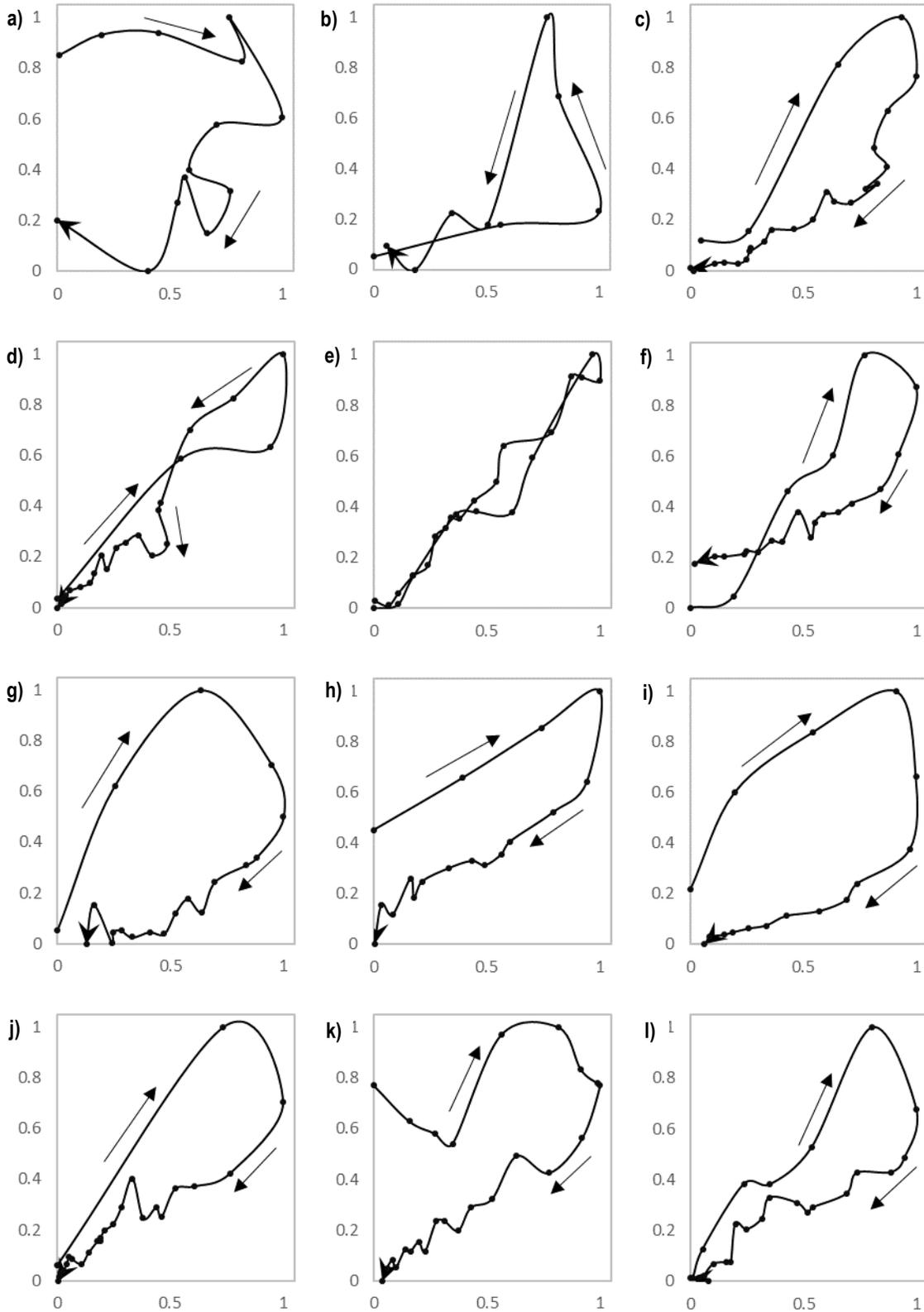


Figure 36. Représentation des boucles d'hystérésis de 12 événements hydrologiques observés dans la rivière Tasiapik à l'été 2019 au site T1 : a) 25-26 juin, b) 26-27 juin, c) 11-12 juillet, d) 16-17 juillet, e) 20-21 juillet, f) 15-16 août, g) 17 août, h) 19-20 août, i) 30-31 août, j) 22-23 septembre, k) 26-27 septembre et l) 27-28 septembre.

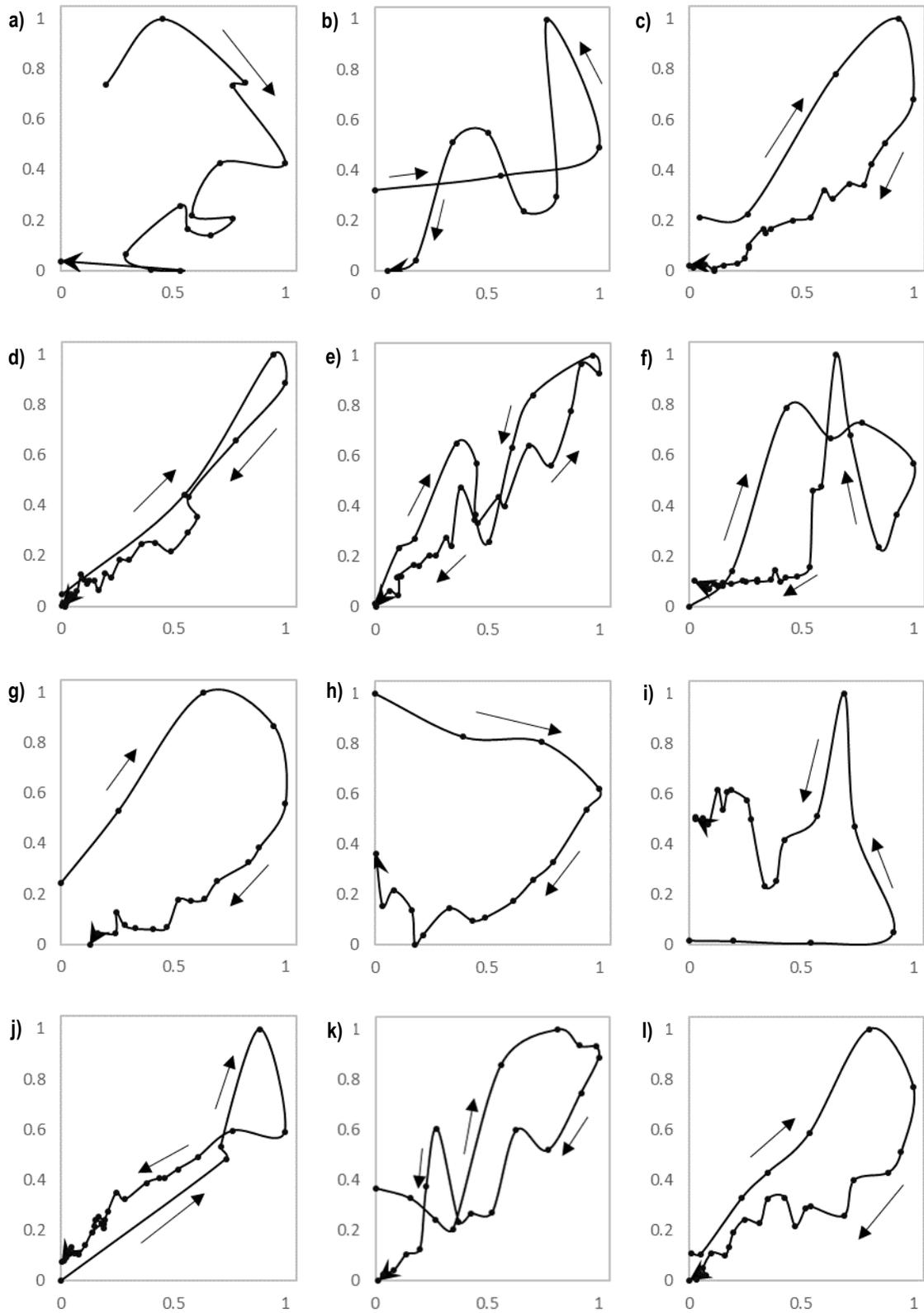


Figure 37. Représentation des boucles d'hystérésis de 12 événements hydrologiques observés dans la rivière Tasiapik à l'été 2019 au site T2 : a) 25-26 juin, b) 26-27 juin, c) 11-12 juillet, d) 16-17 juillet, e) 20-21 juillet, f) 15-16 août, g) 17 août, h) 19-20 août, i) 30-31 août, j) 22-23 septembre, k) 26-27 septembre et l) 27-28 septembre.

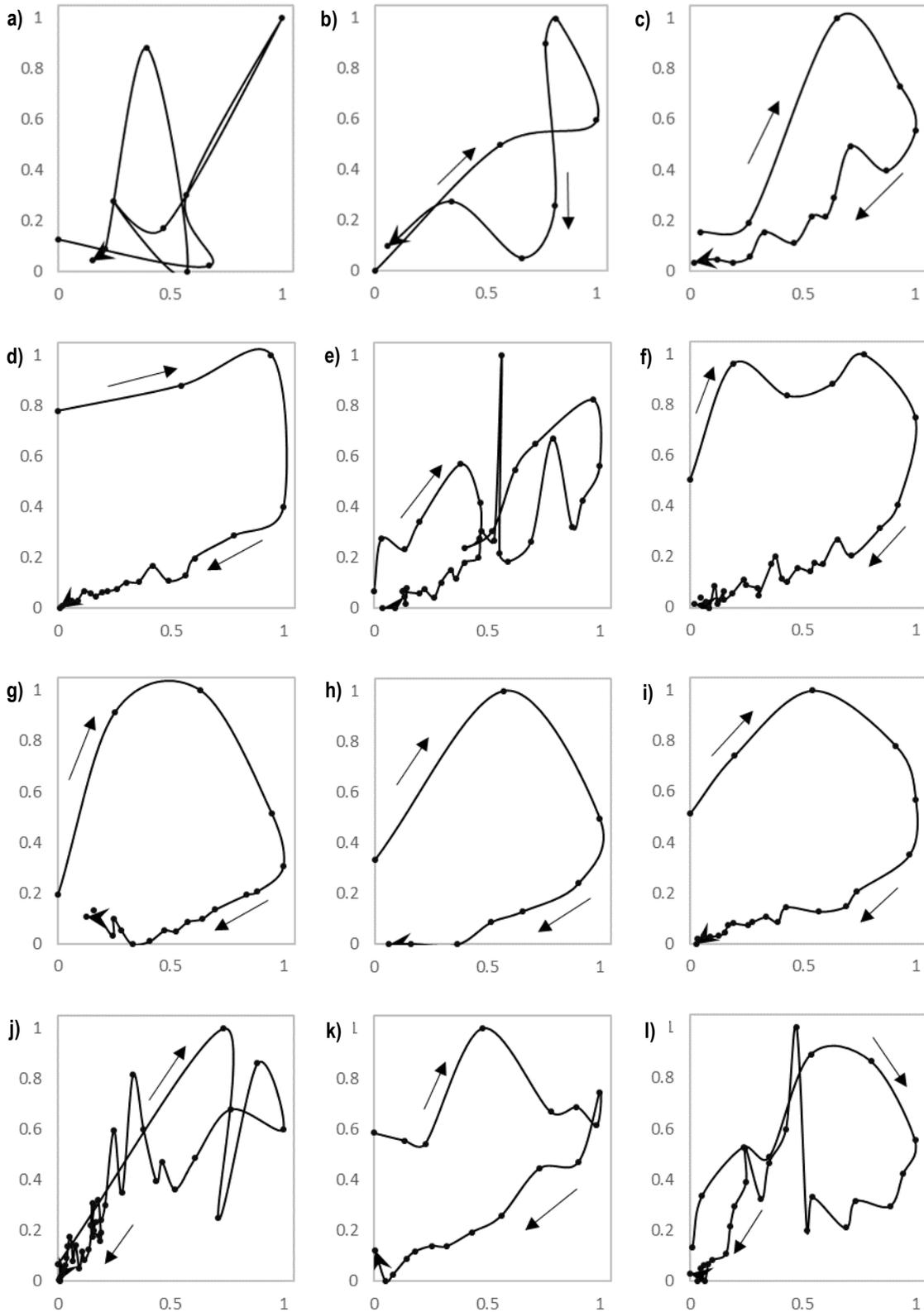


Figure 38. Représentation des boucles d'hystérésis de 12 événements hydrologiques observés dans la rivière Tasiapik à l'été 2019 au site T4 : a) 25-26 juin, b) 26-27 juin, c) 11-12 juillet, d) 16-17 juillet, e) 20-21 juillet, f) 15-16 août, g) 17 août, h) 19-20 août, i) 30-31 août, j) 22-23 septembre, k) 26-27 septembre et l) 27-28 septembre.

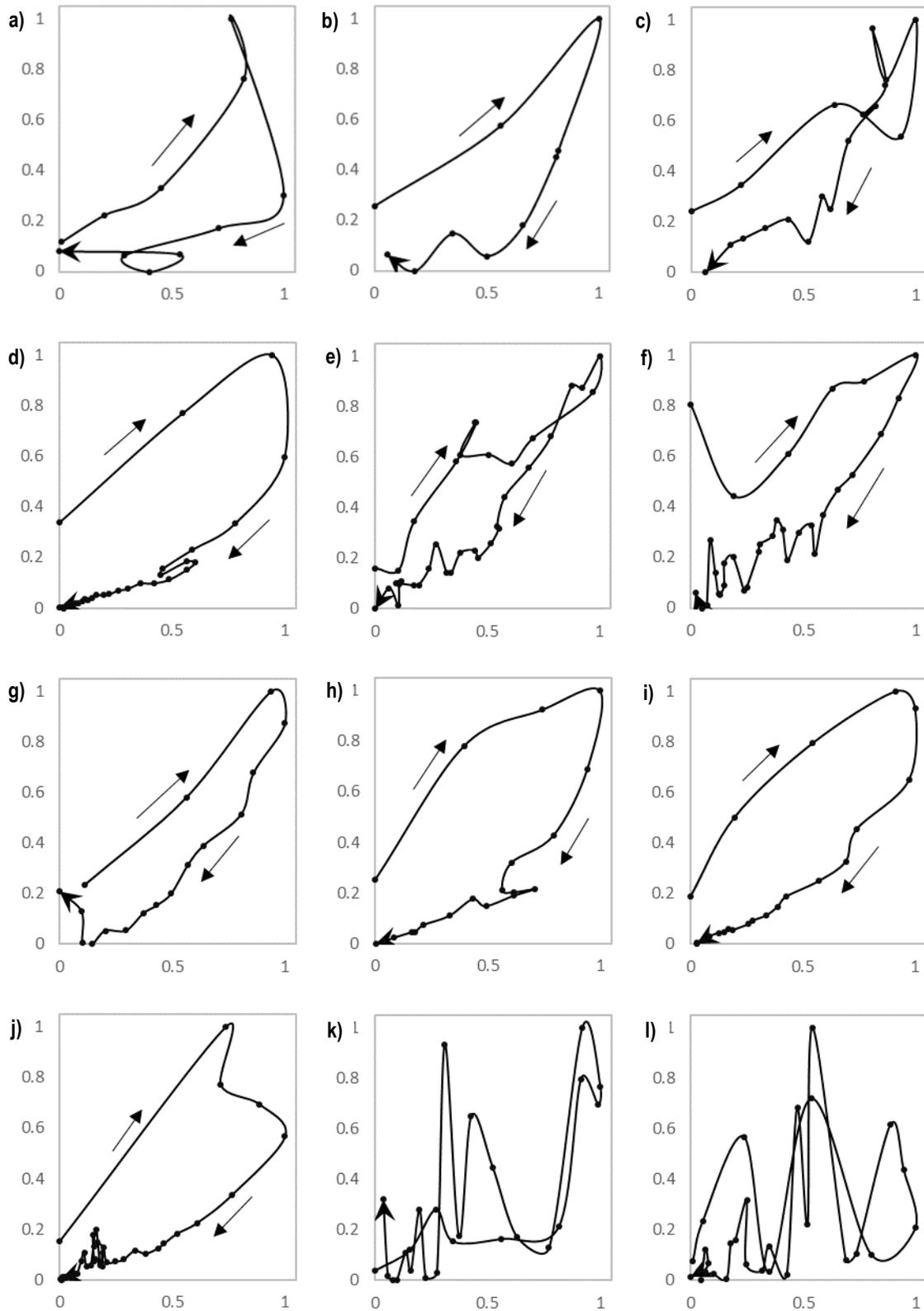


Figure 39. Représentation des boucles d'hystérésis de 12 événements hydrologiques observés dans la rivière Tasiapik à l'été 2019 au site T5 : a) 25-26 juin, b) 26-27 juin, c) 11-12 juillet, d) 16-17 juillet, e) 20-21 juillet, f) 15-16 août, g) 17 août, h) 19-20 août, i) 30-31 août, j) 22-23 septembre, k) 26-27 septembre et l) 27-28 septembre.

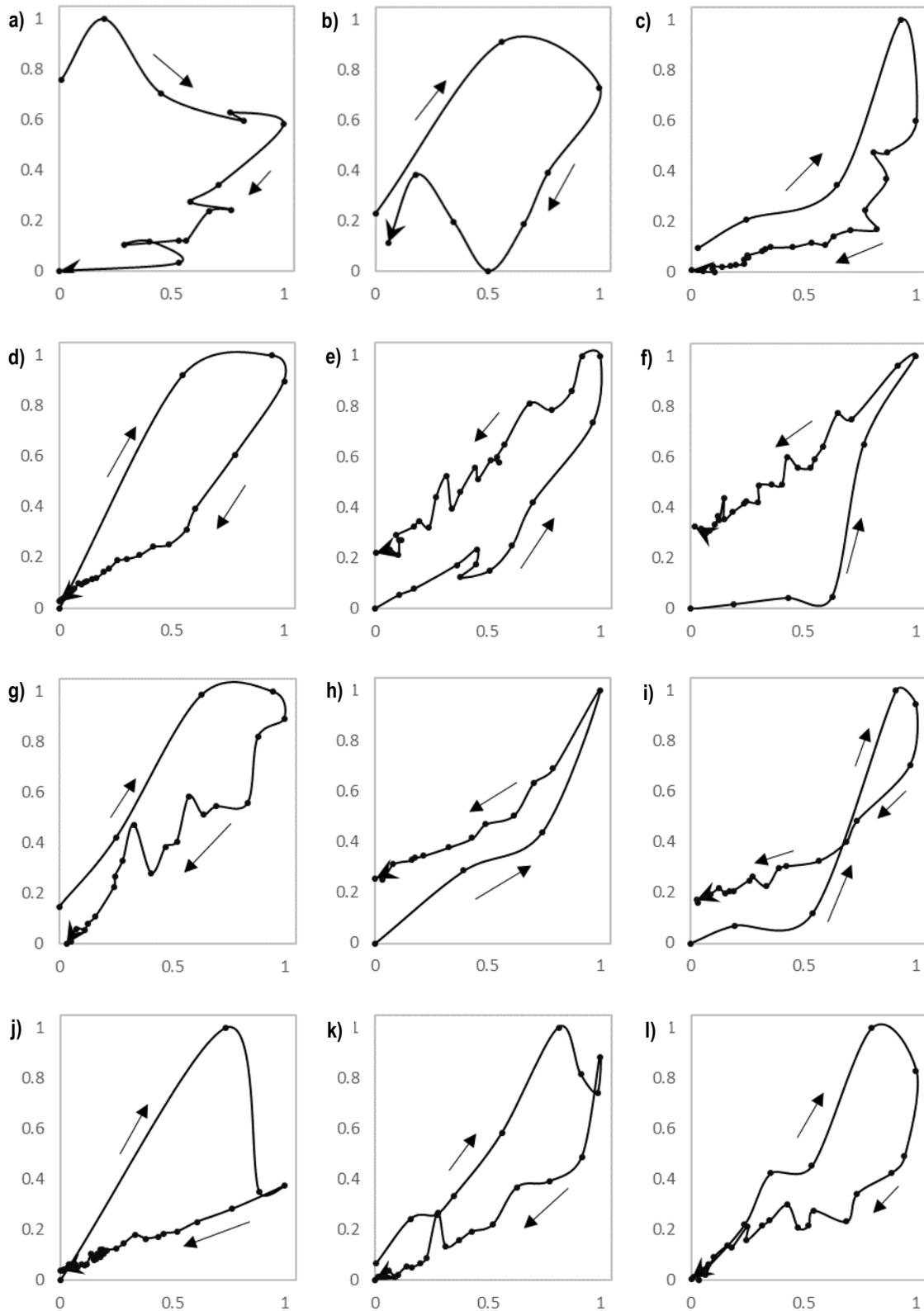


Figure 40. Représentation des boucles d'hystérésis de 12 événements hydrologiques observés dans la rivière Tasiapik à l'été 2019 au site T6 : a) 25-26 juin, b) 26-27 juin, c) 11-12 juillet, d) 16-17 juillet, e) 20-21 juillet, f) 15-16 août, g) 17 août, h) 19-20 août, i) 30-31 août, j) 22-23 septembre, k) 26-27 septembre et l) 27-28 septembre.

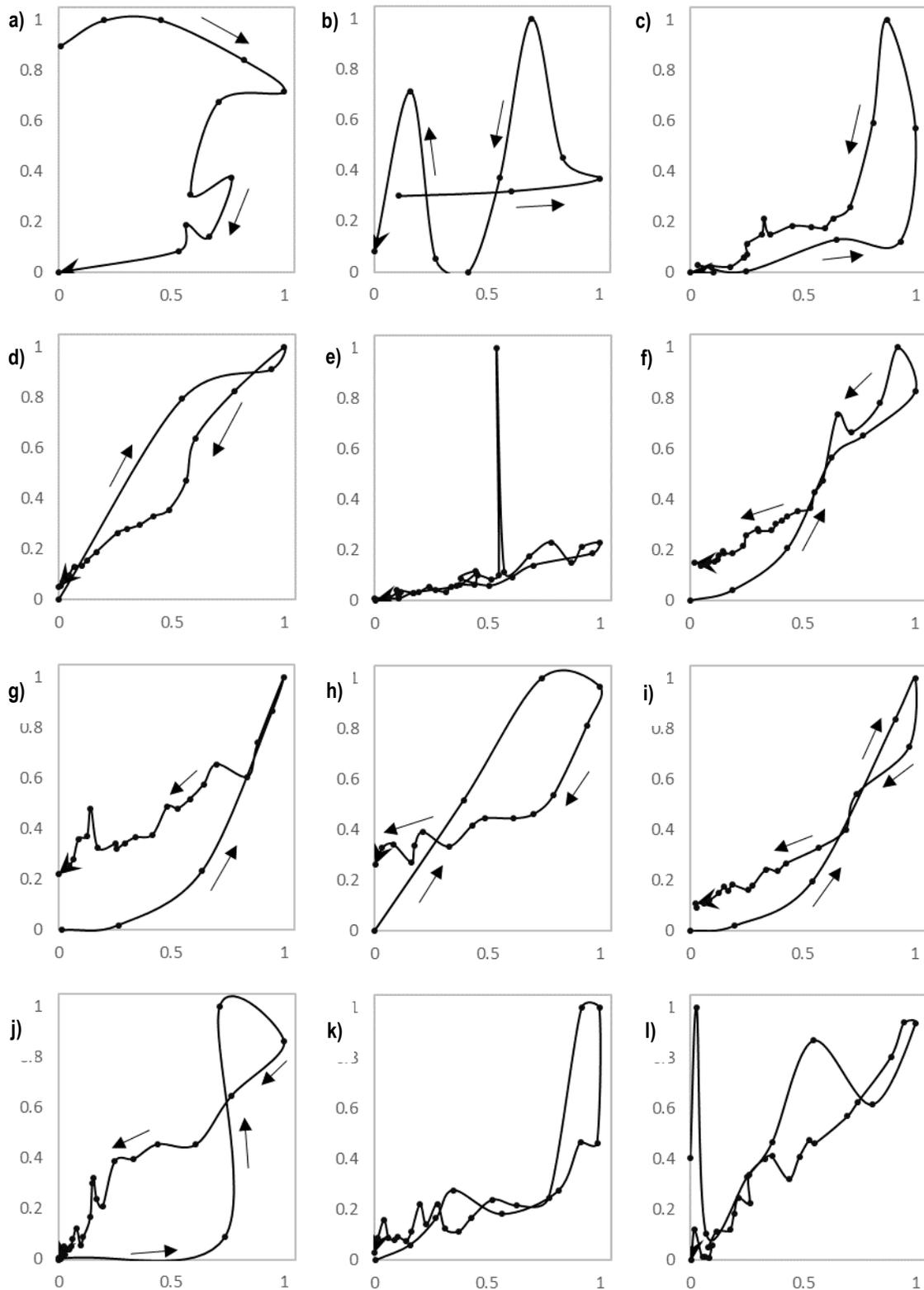


Figure 41. Représentation des boucles d'hystérésis de 12 événements hydrologiques observés dans la rivière Tasiapik à l'été 2019 au site T7 : a) 25-26 juin, b) 26-27 juin, c) 11-12 juillet, d) 16-17 juillet, e) 20-21 juillet, f) 15-16 août, g) 17 août, h) 19-20 août, i) 30-31 août, j) 22-23 septembre, k) 26-27 septembre et l) 27-28 septembre.

La synthèse des boucles d'hystérésis observées dans chacun des sites pour les 12 événements hydrologiques sélectionnés à l'été 2019 est présentée dans le Tableau 10. On observe que les boucles dans le sens horaire (type II) sont les plus fréquentes dans l'ensemble de la rivière lors de l'été 2019. Pour tous les sites, à l'exception du site T7, le type II est celui le plus fréquemment observé. Le sous-type IIa a été enregistré à 33 reprises, comparativement au sous-type IIb qui a été enregistré à quatre reprises. Ainsi, dans la rivière Tasiapik à l'été 2019, la majorité des événements hydrologiques sont caractérisés par une concentration de sédiments en suspension plus élevée lors de la phase montante que lors de la phase descendante, avec un C_{max} qui est atteint plus tôt que Q_{max} . Les résultats permettent également d'observer que le type de boucle d'hystérésis III s'est seulement produit dans trois sites : le T2 est les deux sites en aval de celui-ci, soit les sites T6 et T7. Les trois sites situés en amont du T2 n'ont pas enregistré de boucles d'hystérésis en sens antihoraire. Il est aussi intéressant de remarquer que le site T7 a enregistré beaucoup de boucles de type V, comparativement aux autres sites. Durant l'été 2019, ce type de boucle a été observé à neuf reprises dans ce site; les sites T2 et T4 ont quant à eux enregistré ce type d'hystérésis à cinq reprises. De plus, le site T7 est celui où le type de boucle II fut enregistré le moins souvent avec seulement une observation.

Tableau 10. Synthèse des boucles d'hystérésis observées dans la rivière Tasiapik à l'été 2019. Le tableau présente le nombre de boucles observées dans chacun des six sites, selon le type d'hystérésis.

Site	Type de boucle d'hystérésis			
	Nombre d'observations			
T1	IIa	IIb	IV	V
	7	1	1	3
T2	IIa	IIIa	V	
	6	1	5	
T4	IIa	V		
	7	5		
T5	IIa	IIb	V	
	5	3	4	
T6	IIa	IIIa	V	
	7	3	2	
T7	IIa	IIIa	V	
	1	2	9	

Chapitre 4. Discussion

Bien qu'elle soit de taille restreinte (12,25 km²), la vallée Tasiapik est formée d'un réseau hydrographique complexe dont les caractéristiques hydrogéomorphologiques sont très différentes à l'intérieur même du bassin versant. Par exemple, la source de la rivière est composée de cours d'eau de tête provenant de versants rocheux escarpés. L'eau s'écoule ensuite dans des ruisseaux éphémères encaissés dans des dépôts sableux littoraux. À certains endroits dans la partie médiane, la rivière s'écoule sur des sédiments fins d'eau profonde ainsi que le long de buttes de pergélisol en dégradation. Dans la partie aval de la zone de transfert, la rivière est alimentée par des ruisseaux provenant de mares thermokarstiques situées à proximité. Ainsi, ces différentes sources d'apports sédimentaires réagissent différemment en fonction des conditions météorologiques présentes ou antérieures. En plus de la composante spatiale, qui cause des variations de turbidité différentes à l'intérieur du réseau hydrographique, la turbidité varie fortement à travers les saisons (printemps, été, automne). Par exemple, pour trois événements d'augmentation de la turbidité qui se sont produits au même site (T4), mais à des dates différentes (15 août, 30-31 août et 26 septembre), la turbidité a atteint des pointes relativement semblables (83, 68 et 70 UTN). Toutefois, les conditions météorologiques associées à ces hausses de turbidité étaient différentes (Figure 42). Dans le cas du premier événement, le 15 août (Figure 42a), la turbidité a atteint un maximum de 83 UTN et le débit a atteint 40 l/s. Dans ce cas-ci, la turbidité a réagi rapidement aux précipitations, même si l'intensité de celles-ci était modérée, avec 9 mm de précipitations en cinq heures. Les conditions durant les journées antérieures à cet événement ont été très sèches, avec seulement 1,2 mm de pluie durant les 92 h précédentes. On peut donc supposer qu'une grande quantité de sédiments étaient disponibles à ce moment et qu'ils ont rapidement été pris en charge par l'eau de ruissellement sur les berges qui a convergé vers la rivière. Lors du deuxième événement ayant lieu les 30 et 31 août (Figure 42b), le maximum atteint par la turbidité a été légèrement plus faible (68 UTN). Pourtant, le débit de la rivière a atteint presque le double de celui de l'événement précédent, avec une pointe à 70 l/s, au même titre que l'intensité et la durée des précipitations avec près de 15 mm de pluie. L'écart est encore plus marqué lorsqu'on observe le troisième cas survenu le 26 septembre (Figure 42c), où le débit fut presque quatre fois plus élevé que celui du premier événement, et près du double de celui du deuxième événement, avec un maximum de 151 l/s. Cette hausse du débit, qui fut une des plus élevées de la saison, fut engendrée par des précipitations d'intensité moyenne sur une longue période de temps, soit près de 30 mm de pluie pendant 13 heures. Toutefois, malgré des conditions plus intenses que

les événements précédents, on observe que la turbidité a été semblable à celle des événements antérieurs avec un maximum à 70 UTN.

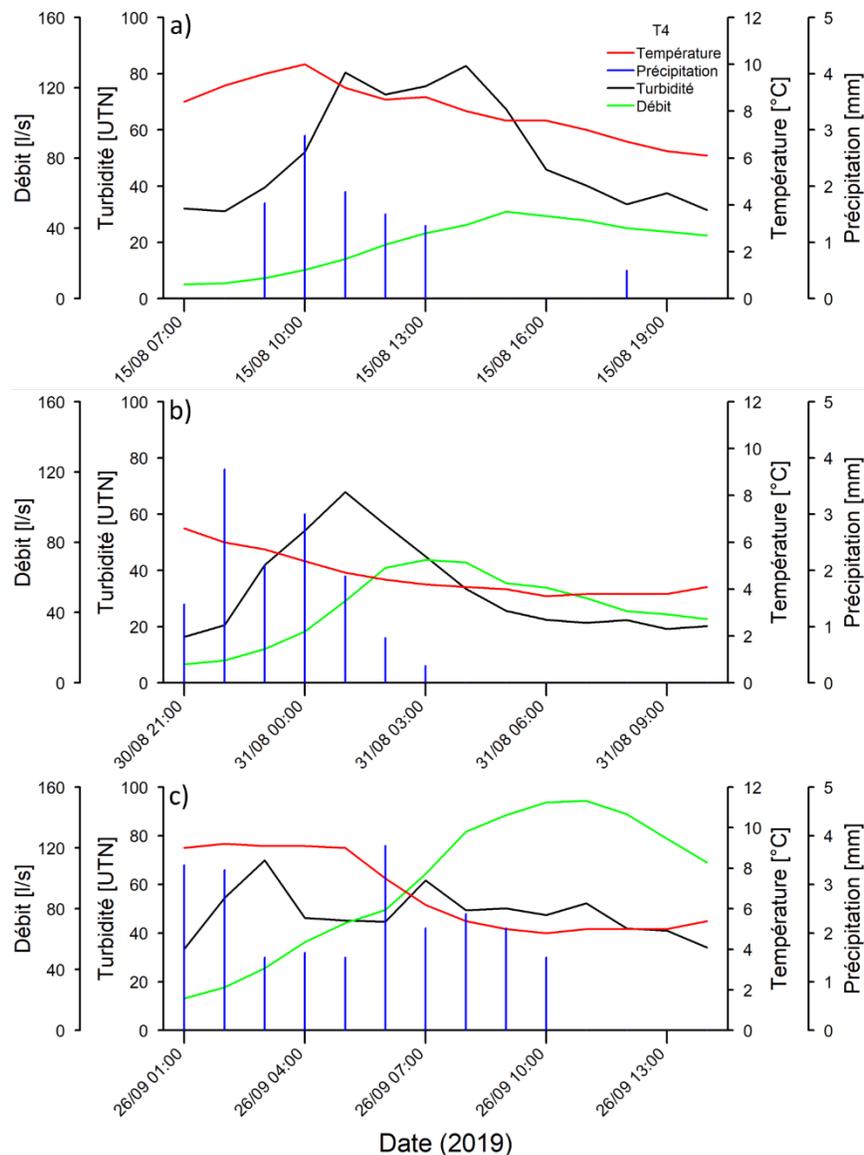


Figure 42. Enregistrements horaires sur les précipitations et les températures atmosphériques dans la vallée Tasiapik, ainsi que le débit et la turbidité de la rivière Tasiapik au site T4 lors de l'été 2019 : a) 15 août, b) 30-31 août et c) 26 septembre. Source : Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques.

Les résultats démontrent que les relations entre la turbidité et les différents paramètres météorologiques sont complexes. Le débit de la rivière et les conditions météorologiques analysées pendant l'événement ne peuvent pas expliquer à elles seules l'ampleur des événements de turbidité. La dynamique du transport sédimentaire est complexe, toutefois les conditions météorologiques ayant précédées l'événement de hausse de turbidité semblent déterminantes.

Que ce soit dans les environnements de basses latitudes ou dans les milieux arctiques, la dynamique du transport sédimentaire dans les rivières dépend principalement du débit et des précipitations. Toutefois, dans la rivière Tasiapik, certaines augmentations de turbidité n'ont pas été associées ni au débit ni aux précipitations, surtout au début de la saison estivale (juin). Au Nunavik, cela fut également observé par Jolivel et Allard (2017) dans la rivière Sheldrake, alors que plusieurs hausses de turbidité au printemps n'étaient pas corrélées avec le débit de la rivière, indiquant que le régime hydrologique ne jouait pas un rôle important dans la turbidité de l'eau de cette rivière. La turbidité dans la rivière Sheldrake lors des trois années de leur étude (2010, 2013 et 2014) fut semblable à celle observé dans certains sites de la rivière Tasiapik. Par exemple, le maximum quotidien qu'ils ont observé variait entre 140 et 160 UTN, ce qui est semblable à ce qui a été observé à l'été 2019 dans les sites T1 et T5 de la rivière Tasiapik (126 et 130 UTN).

Variations de la turbidité et facteurs déclencheurs

Le transport sédimentaire en rivière est fortement associé aux conditions locales. La géologie, les caractéristiques hydrogéomorphologiques, la végétation et la topographie sont des facteurs pouvant affecter la variation de la turbidité dans chacun des tronçons d'une rivière (Douglas, 1967; Wilson, 1973; Milliman et Syvitski, 1992; Syvitski, 2002).

Mouvements de masse

Certaines études ont mis en évidence que la charge sédimentaire des rivières de hautes latitudes est grandement liée à des processus géomorphologiques engendrés lors de périodes de températures atmosphériques élevées. Une des principales sources d'apport sédimentaire dans les rivières s'écoulant en milieux pergélisolés correspond aux processus de mouvement de masse en bordure de rivière (Lewis et al., 2005; Lewkowitz et Harris, 2005; Lamoureux et Lafrenière, 2009; Jolivel et Allard, 2017). Ces mouvements de masse rapides sont rencontrés principalement sous forme de « détachements de la couche active » du pergélisol (Lewkowitz, 1990), engendrés par l'augmentation de la profondeur de la couche active lors des périodes de températures atmosphériques élevées. Selon Lewis et al. (2005), un seul de ces événements pourrait contribuer à plus de 30% du transport sédimentaire totale dans une rivière lors de la saison estivale; cela a été noté lors d'un événement survenu sur l'île d'Ellesmere, où une concentration de sédiments en suspension maximale de plus de 83 000 mg/l fut enregistrée. De tels processus, mais de moindres envergures auraient lieu dans le bassin versant de la rivière Tasiapik. En effet, l'analyse des photos prises par la caméra automatisée

installée à proximité du site T2 (Figure 9) a permis d'observer des mouvements de masse en bordure de la rivière lors de l'été 2019. Ces processus se sont produits sur le versant d'une lithalse dépourvu de végétation et présentant des signes d'érosion (cicatrice de glissement et ravinement), bordant la rivière Tasiapik. L'analyse des photos indique que ces mouvements de masse se sont déclenchés généralement lors de périodes de précipitations intenses. Les événements les plus importants se sont produits à la fin du printemps suite à la fonte des neiges, lorsque les températures atmosphériques des journées précédentes étaient élevées.

Deux événements (mouvement de masse) qui se sont produits au mois de juin 2019 ont majoritairement contribué à la dégradation du versant lors de l'été 2019. Les journées du 9 et du 10 juin 2019 ont été exceptionnellement chaudes dans la vallée Tasiapik, avec un maximum de 28,8 °C le 10 juin. Le 11 juin, un épisode de précipitations intenses (23,7 mm) a été enregistré par la station environnementale VDTSILA. La combinaison de ces deux événements extrêmes a engendré une très forte érosion du versant de la lithalse. Tel qu'observé sur les photos, les sédiments alors érodés ont été déposés sur le lit de la rivière, au pied de la butte cryogène, ainsi que sur la rive opposée (Figure 17). Pendant les jours et les semaines subséquents, ces sédiments ont été graduellement érodés et transportés vers l'aval par le cours d'eau. Le deuxième événement s'est produit le 16 juin, alors que près de 12 mm de précipitation ont été enregistrés cette journée-là. Au même titre que lors du premier événement, les températures atmosphériques étaient au-dessus de la moyenne les deux journées précédentes, avec des maximums de 16 °C. En comparant les photos datant du 7 juin à celles du 19 juin, on observe qu'énormément de sédiments se sont accumulés sur le lit de la rivière à proximité du site T2 (Figure 43b). Ces observations ne peuvent pas être confirmées par les données sur la turbidité de la rivière puisque les turbidimètres ont été installés dans le cours d'eau seulement le 25 juin; on ne possède donc pas les mesures de turbidité concernant les événements qui se sont produits le 11 et le 16 juin. À titre d'exemple, Jolivel et Allard (2017) ont déterminé qu'un mouvement de masse s'étant produit sur les berges de la rivière Sheldrake le 6 mai 2010 a mené à une augmentation considérable de la turbidité cette journée-là, passant de ~5 UTN à 22 UTN. L'accumulation sédimentaire au pied de la butte cryogène n'a pratiquement pas augmenté durant le reste de la saison, et ce, même après les périodes de précipitations intenses ou de débit élevé. En observant les photos, on remarque que de tels événements apportent beaucoup plus de sédiments au début de la saison, suite à la fonte des neiges, que lorsqu'ils se produisent au milieu ou à la fin de l'été. Cela peut être expliqué par le fait que la couche active fond beaucoup plus rapidement au printemps que durant l'été. En effet, selon French

(2007), environ 75% du dégel du sol dans les environnements périglaciaires se produit dans les cinq premières semaines après que la température atmosphérique augmente au-dessus de 0 °C. Les périodes chaudes augmentent la profondeur de la couche active du pergélisol, créant une instabilité sur les berges et facilitant l'érosion et le déclenchement de mouvement de masse. Ces sédiments rendus disponibles sont ensuite transportés vers la rivière lors de périodes de précipitations intenses ou lors de l'augmentation du débit de la rivière. En ce sens, Jolivel et Allard (2017) ont observé des augmentations de turbidité dans la rivière Sheldrake aux printemps 2010, 2013 et 2014, qui n'étaient pas reliées au débit de la rivière; ces événements étaient associés au dégel du sol ainsi qu'à des épisodes de mouvements de masse en bordure de rivière.

Puisque les mouvements de masse associés à la dégradation du pergélisol sont un des facteurs principaux de l'augmentation de la turbidité dans les environnements nordiques, il était intéressant d'installer un turbidimètre dans un tronçon de la rivière où on observe des processus d'érosion sur les berges, c'est-à-dire au site T2 (Figure 7). La turbidité dans cette partie de la rivière devrait donc être plus sensible aux changements de températures de l'air. Toutefois, les résultats démontrent qu'il n'y a pas de corrélation significative entre la turbidité de la rivière au site T2 et les températures atmosphériques lorsque les analyses statistiques sont appliquées sur les données de l'ensemble de la saison (Tableau 3). Par contre, lorsque les analyses statistiques sont réalisées seulement sur les périodes de températures atmosphériques élevées (Tableau 5), on remarque qu'il y a une corrélation entre la turbidité de la rivière et la température de l'air, avec un effet de taille moyenne à forte ($r = 0,43$). Il s'agit du deuxième site avec la plus forte corrélation lors de telles conditions; celui où la corrélation est la plus forte est le site T6 ($r = 0,45$), situé environ 200 m en aval de la lithalse en dégradation. Les coefficients de corrélation sont encore plus forts lorsqu'on utilise les données de l'événement qui s'est produit en début de saison, du 25 au 27 juin (une des périodes les plus chaudes de l'été 2019), avec $r = 0,58$ pour le site T2 et $r = 0,59$ pour le site T6 (Tableau 6). Ces résultats indiquent donc que lorsque les températures atmosphériques atteignent un certain seuil, la turbidité dans les sites impactés par des processus de mouvements de masse sur les berges varie de façon similaire à la variation des températures atmosphériques. Des travaux menés par Lewkowicz et Harris (2005) sur l'île d'Ellesmere (Nunavut, Canada) ont déterminé qu'il existe un seuil minimal d'ensoleillement quotidien et de température atmosphérique propice au déclenchement de mouvement de masse. Une augmentation globale des températures atmosphériques dans les environnements de hautes latitudes engendre une

augmentation de l'occurrence des mouvements de masse, menant à une augmentation de la turbidité dans les cours d'eau.

Processus thermokarstiques

Les mouvements de masse en bordure de rivière ne sont pas les seuls processus responsables de l'apport sédimentaire dans les rivières des environnements nordiques. Les processus thermokarstiques, engendrés par la dégradation de lithales ou de paises et menant à la formation de mares de thermokarst, contribuent fortement à la hausse de la turbidité dans les rivières (Bowden et al., 2008; Jolivel et Allard, 2013). Ces lacs, en plus d'être chargés en sédiments puisqu'ils servent de bassins aux eaux de fonte et de ruissellement, contribuent à la dégradation thermique du pergélisol (Seguin et Allard, 1984). L'augmentation de la taille et de la quantité des mares thermokarstiques forme un réseau de chenaux facilitant la connectivité entre les bassins (Seguin et Allard, 1984). Cette augmentation de la connectivité, qui accroît la densité du réseau de drainage sur la surface du sol, facilite le transport de sédiments vers les rivières à travers des ravins reliant les cours d'eau aux réseaux de mares thermokarstiques. Une telle augmentation de la connectivité entre les mares thermokarstiques fut vraisemblablement à l'origine d'une hausse de 160% de l'apport sédimentaire dans la rivière Sheldrake (Jolivel et Allard, 2013). De tels processus ont aussi été observés dans le bassin versant de la rivière Toolik, en Alaska. En effet, les travaux de Bowden et al., (2008) ont démontré que la concentration de sédiments en suspension dans cette rivière était deux fois plus élevée en aval des mares thermokarstiques, comparativement à la partie amont de celles-ci.

Dans la vallée Tasiapik, de nombreux lacs de thermokarst sont observés dans la partie aval de la zone de transfert. Plusieurs de ces lacs, qui sont connectés à la rivière Tasiapik par de petits chenaux, se situent en amont du site T7 (Figure 7). Les résultats obtenus par les boucles d'hystérésis laissent supposer que la dynamique du transport sédimentaire dans la partie aval de la rivière Tasiapik est largement influencée par les processus thermokarstiques. Le site T7 est celui qui a enregistré le plus d'observations de boucles de type V, indiquant un chevauchement de différentes sources sédimentaires générées soit par l'apport de tributaires ou l'effondrement de berges. Aucun mouvement de masse n'a été observé sur les rives en amont du site T7, le plus proche étant plus de 600 m en amont, à proximité du site T2. Ainsi, l'apport sédimentaire provenant des tributaires issus des lacs thermokarstiques demeure l'hypothèse principale de la cause du grand nombre d'événements de type V. De plus, la très faible quantité de boucles de type II dans ce site indique que la source sédimentaire

ne se situe pas près du site échantillonné. La contribution sédimentaire dans la rivière Tasiapik, engendrée par les lacs thermokarstiques, est démontrée par la présence de nombreux bancs d'accumulation sableux sur les berges de la rivière (Figure 43d-e). Ces bancs sont présents dans la rivière seulement à partir de quelques dizaines de mètres en amont du site T7 et sont reliés à des mares de thermokarst par de petits ravins. Pendant les périodes de précipitations intenses, l'augmentation du niveau d'eau de ces lacs expulse une eau chargée en sédiments vers la rivière Tasiapik. Lors des travaux terrain à l'été 2019, une eau chargée de sédiments s'écoulait dans certains de ces ravins. La turbidité maximale enregistrée à l'été 2019 lors de ces événements a atteint de 57 à 134 UTN. Ainsi, les lacs formés par la dégradation du pergélisol, dont la proportion fut amplifiée dans la vallée Tasiapik durant les dernières décennies (Fortier et Aube-Maurice, 2008), sont une source non négligeable d'apport sédimentaire dans le réseau hydrographique de la vallée Tasiapik.

Débit

Le débit d'une rivière est un des facteurs qui influencent le plus le transport sédimentaire, que ce soit dans les rivières de hautes latitudes ou dans celles des régions tempérées. Les résultats obtenus avec les analyses statiques (tests de corrélations et ANOVA) démontrent en effet que le débit est le paramètre qui contrôle le plus les variations de turbidité dans la rivière Tasiapik. Tous les tests effectués pour établir s'il existait une relation entre le débit et la turbidité étaient significatifs, que ce soit pour l'ensemble de la rivière ou pour chacun des sites. Ainsi, une augmentation du débit de la rivière Tasiapik engendre directement une augmentation de la turbidité.

Dans les environnements pergélisolés, le débit des rivières en période estivale est grandement contrôlé par le régime thermique du bassin versant (Michel et Van Everdingen, 1994; Syvitski, 2002; Forbes et Lamoureux, 2005). Une augmentation du débit, associée au réchauffement global des températures atmosphériques, a un impact majeur sur la dynamique du transport sédimentaire dans les environnements nordiques; une augmentation de 2 °C de la température atmosphérique d'un bassin versant combinée à une hausse de 20% du débit peut contribuer à une augmentation de 32% de la charge sédimentaire d'une rivière arctique (Syvitski, 2002). Des variations diurnes du débit ont aussi été observées dans les rivières situées en milieux pergélisolés (Kokelj et al., 2013). Ces variations du débit sont contrôlées par le dégel du sol ainsi que par la fonte de la neige et s'observent plus particulièrement lorsque les températures atmosphériques et les radiations solaires sont élevées (Kokelj et al., 2013). Dans la rivière Tasiapik, de telles variations quotidiennes du débit ont été notées,

plus particulièrement au début de l'été. Les 25 et 26 juin 2019, soit les premières journées où les turbidimètres ont été installés à l'été 2019, des hausses du débit de la rivière (± 10 l/s) furent enregistrées quotidiennement : le débit maximal fut atteint 2-3 heures après la température maximale enregistrée ces journées-là. Ces augmentations quotidiennes du débit, observées durant la période la plus chaude enregistrée à l'été 2019, ont mené à des hausses significatives de la turbidité de la rivière Tasiapik. Toutefois, les résultats supposent que ces événements de turbidité sont plutôt corrélés avec les températures atmosphériques et non avec le débit de la rivière (Tableau 6; Figure 31). En effet, dans tous les sites, à l'exception du site T4, on observe une corrélation significative et relativement forte entre la turbidité et les températures atmosphériques lors de périodes chaudes ($r = 0,29$, pour le site T5, à $r = 0,59$, pour le site T6). Au contraire, des corrélations significatives entre la turbidité et le débit sont seulement observées pour les sites T5 et T7 (respectivement $r = 0,47$ et $r = 0,33$).

Ainsi, durant les périodes chaudes en début d'été, les températures atmosphériques contribuent directement au fluage d'eau chargée en sédiments vers la rivière. Ceci est supporté par le fait que le T4, seul site n'étant pas situé à proximité des lithales, est le seul qui indique qu'il n'y a pas de corrélation significative entre les températures atmosphériques et la turbidité pour la période chaude du 25-27 juin 2019. De telles variations diurnes du débit et de la turbidité furent également observées dans les rivières Mackenzie et Peel (Territoires du Nord-Ouest) alors que la turbidité variait entre 200 UTN de 02:00 et 12:00, et 1200 UTN quelques heures après de rayonnement solaire maximal quotidien (Kokelj et al., 2013). Il s'agit d'un niveau de turbidité considérablement plus élevée que ce qui a été observé dans la rivière Tasiapik, alors que le maximum atteint lors de la période du 25 au 27 juin fut de 211 UTN. La turbidité moyenne des rivières de cette étude (Kokelj et al., 2013) était toutefois nettement supérieure à celle enregistrée dans la rivière Tasiapik lors de l'été 2019, variant entre 94 et 349 UTN comparativement à une turbidité moyenne de 20 à 32 UTN pour la rivière Tasiapik (Tableau 1).

Précipitations

Les travaux menés par Dugan et al. (2009) à Cap Bounty sur l'île de Melville (Nunavut) ont permis de mettre en évidence l'importance des températures atmosphériques estivales sur les conditions de ruissellement de surface dans les environnements pergélisolés. Les températures anormalement chaudes de juillet 2007 ont engendré une fonte hâtive, rapide et profonde de la glace contenue dans le pergélisol, menant à une augmentation de l'humidité du sol. La capacité du sol à capter l'eau

provenant des précipitations étant réduite, le ruissellement de surface vers la rivière a augmenté. Ces conditions ont engendré une charge totale de sédiments en suspension équivalents à 35% du total de la saison, en seulement deux jours de précipitations (Dugan et al., 2009).

Dans le bassin versant de la rivière Tasiapik, certains sites choisis dans le cadre de cette étude possèdent des caractéristiques topographiques favorisant l'efficacité du ruissellement de surface. Par exemple, les sites T4 et T5 sont les seuls sites où la rivière bordée de part et d'autre de versant abrupt. Ainsi, dans ces sites, l'eau chargée en sédiments provenant du ruissellement de surface s'écoule plus rapidement vers la rivière. Dans d'autres sites, comme les sites T7 et T2, on observe une pente faible sur les berges ou la présence d'une plaine alluviale; les sédiments se rendent plus difficilement à la rivière dans de tels cas. Les sites T4 et T5 révèlent donc d'une importance majeure pour mieux comprendre les liens entre ruissellement de surface et transport sédimentaire dans la vallée Tasiapik. Les résultats obtenus par les analyses statistiques démontrent en effet que ces sites sont plus réactifs aux précipitations. Les ANOVA réalisées avec les paramètres précipitations et débit, sur les sites T4 (Figure 35c) et T5 (Figure 35d), démontrent qu'il existe une grande différence entre ces deux sites et les autres sites échantillonnés dans la rivière Tasiapik. En effet, il s'agit des seuls sites où, lors de conditions de débit moyen, la turbidité est plus élevée avec des précipitations intenses qu'avec des précipitations faibles. De plus, lors de conditions de débit élevé, il existe une différence très marquée quant à la contribution à la turbidité générée par les différentes classes de précipitations, comparativement aux autres sites où la différence est relativement faible. Ces résultats peuvent être expliqués par la topographie de ces sites (pentes abruptes sur les berges et rivière encaissée) qui facilite le ruissellement de surface et accroît l'efficacité à transporter les sédiments directement vers la rivière. En analysant les résultats des tests de corrélations réalisés à partir des moyennes quotidiennes (Tableau 3), on remarque également que le site T5 est le seul où la force du coefficient de Pearson est plus élevée pour les précipitations ($r = 0,71$) que pour le débit ($r = 0,68$). Le transport sédimentaire dans la partie amont de la zone de transfert est donc fortement influencé par la topographie accidentée, qui accroît la capacité du ruissellement de surface et facilite la prise en charge de sédiments vers la rivière.

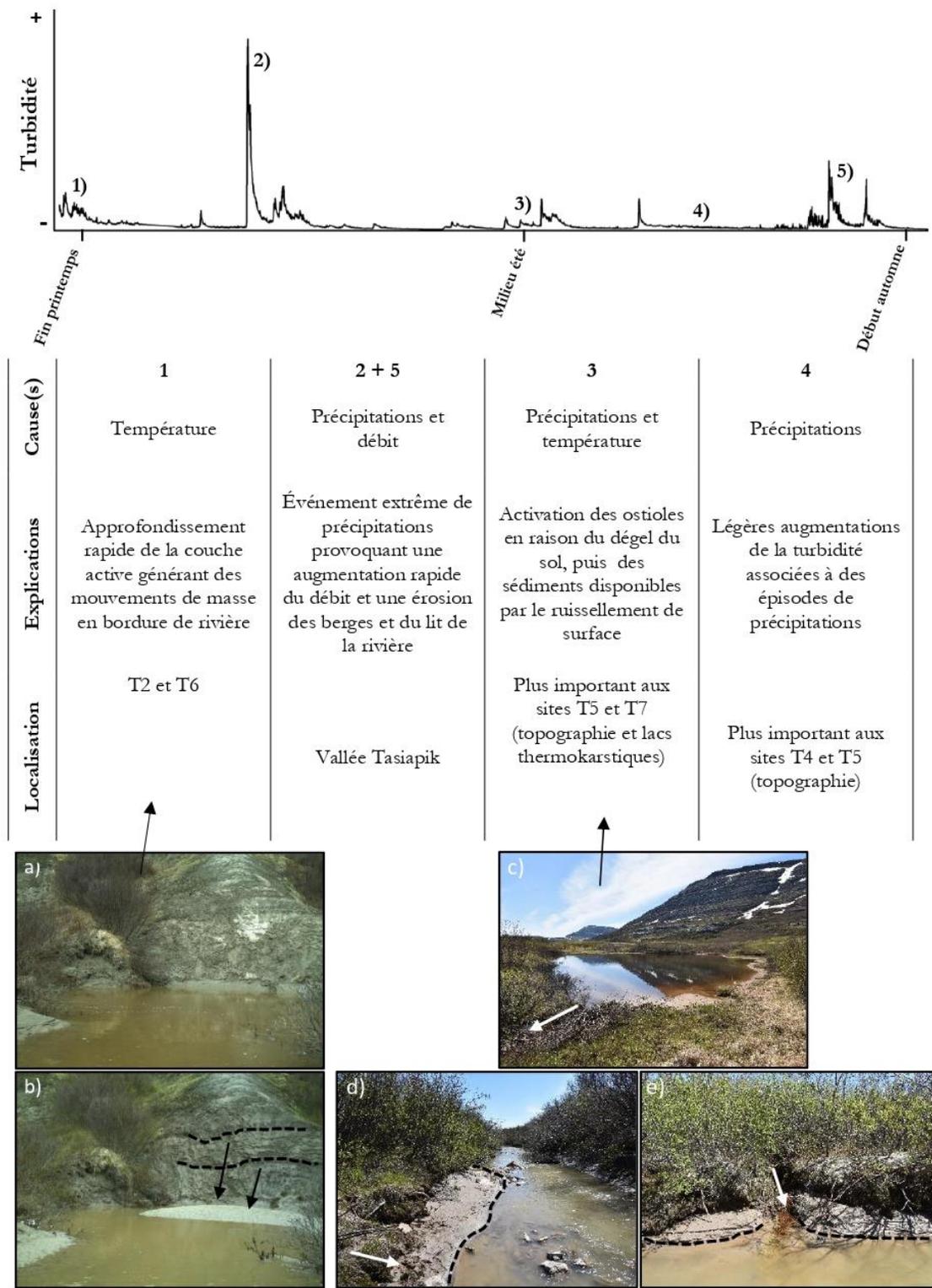


Figure 43. Modèle conceptuel représentant des exemples d'événements de hausse de la turbidité au cours de l'été ainsi que les causes engendrant ces augmentations. A) Photos prises par la caméra automatisée, à proximité du site T2, le 7 juin et b) le 19 juin 2019, lors d'un niveau d'eau semblable. Les épisodes de précipitations intenses durant cette période ont engendré des mouvements de masse, où les sédiments se sont accumulés au pied de la butte cryogène. C) Lors d'épisodes de précipitations intenses, une eau chargée en sédiments s'écoule des lacs de thermokarst vers la rivière, d-e) où les sédiments s'accumulent à l'embouchure des ravins.

Une différence majeure existe toutefois entre ces deux sites (T4 et T5); le tronçon où se situe T4, comparativement à T5, ne s'écoule pas entre les buttes cryogènes. Il était donc intéressant de comparer ces deux sites pour mieux comprendre comment les périodes de températures atmosphériques élevées, en favorisant la dégradation du pergélisol, contribuent à la turbidité dans la rivière Tasiapik. Les tests de corrélations réalisés sur les données incluant seulement les périodes de températures atmosphériques élevées (Tableau 5) indiquent que le site T5 est le seul site où, lors de telles conditions, la turbidité et les précipitations varient de façon similaire ($r = 0,21$). Lors du dégel du sol en été, des sédiments deviennent disponibles à la surface du sol par le tassement du sol (Figure 13), par l'activation d'ostioles (Figure 20) ou par de légers détachements de la couche active. Lors d'événements de précipitations, ces sédiments sont ensuite pris en charge par le ruissellement de surface et transportés vers la rivière, engendrant une hausse de la turbidité. Un événement s'étant produit au T5 le 31 août, où une turbidité maximale de ~100 UTN a été enregistrée, est vraisemblablement relié à ces processus, alors que les cinq journées précédant furent relativement chaudes avec des moyennes quotidiennes variant de 13 à 20 °C. À titre d'exemple, Dugan et al. (2009) ont observé une augmentation de la turbidité à plus de 60 UTN dans une rivière sur l'île de Melville (Nunavut); cet événement fut lié à un apport sédimentaire provenant de ruissellement de surface lors d'un événement de précipitation qui s'est produit lors d'une période de températures atmosphériques élevées.

En somme, les résultats obtenus démontrent qu'il existe une corrélation positive entre la turbidité et les précipitations pour l'ensemble de la rivière. Toutefois, la relation est plus importante lorsque les analyses sont réalisées sur un jeu de données qui inclut seulement les périodes de précipitations d'intensité modérée ou forte (Tableau 7). Ces résultats indiquent qu'une certaine quantité de précipitations est nécessaire pour que le ruissellement de surface soit assez important pour prendre en charge et transporter les sédiments vers la rivière et, ainsi, engendrer une hausse de la turbidité dans un court laps de temps. Tel qu'observé dans la péninsule Boothia, au Nunavut (Forbes et Lamoureux, 2005), lors de périodes de précipitations faibles, la quantité de pluie est suffisante pour atteindre la capacité d'infiltration du sol et engendrer un ruissellement de surface. Toutefois, de telles quantités de précipitations ne seront pas suffisantes pour augmenter le débit de la rivière à un niveau assez élevé pour provoquer l'érosion du matériel sur les berges et sur le lit de la rivière. En plus de l'intensité des précipitations, en utilisant les données de précipitations cumulatives sur une période de 24h, la force du coefficient de corrélation augmente significativement. Ainsi, des précipitations

d'intensité faible à moyenne pendant une longue période de temps peuvent être suffisantes pour générer une hausse du débit et ainsi engendrer une augmentation de la turbidité de la rivière. Tel que noté dans les travaux de Göransson et al. (2013) dans la rivière Göta Älv en Suède, il existe un décalage entre les épisodes de précipitations et l'augmentation de la turbidité et du débit de la rivière. Cela fut également observé par Hamilton et Luffman (2009) dans la rivière Little au Tennessee; ils ont noté une corrélation plus élevée entre les précipitations et la turbidité de la rivière lorsqu'un décalage de 24h est appliqué aux données de précipitations. Cet intervalle de temps peut être plus ou moins important en fonction de certaines caractéristiques géomorphologiques propres à la région telles que la superficie du bassin de drainage et la nature des sédiments de surface.

Conclusion

Cette étude a permis une meilleure compréhension de la dynamique du transport sédimentaire du cours d'eau principal de la vallée Tasiapik, ainsi que des causes engendrant une hausse de la turbidité dans cette rivière. Une meilleure compréhension de ces processus est nécessaire pour mieux prévoir les changements futurs dans les régions de hautes latitudes ainsi que les impacts à long terme sur les environnements aquatiques situés près des communautés nordiques, qui sont généralement dépendantes des eaux de surfaces.

Cette recherche a mis en évidence l'importance des conditions météorologiques ainsi que des caractéristiques hydrogéomorphologiques du bassin versant dans la variation de la turbidité de la rivière Tasiapik. Tel qu'observé dans les rivières de la plupart des régions du monde, le débit est la cause principale de la variation de la turbidité dans la rivière Tasiapik. Les résultats des analyses statistiques ont démontré que ces deux paramètres possèdent une très forte corrélation positive ($r = 0,77$, Tableau 4). En effet, lors d'une augmentation du débit de la rivière, il y a une augmentation presque simultanée de sa turbidité en raison de l'érosion des berges et de la remise en suspension des sédiments du lit de la rivière. Évidemment, les précipitations sous forme de pluie jouent un rôle majeur dans la turbidité de la rivière. La durée de l'événement de précipitations ou l'intensité de celles-ci sont des facteurs importants dans l'apport sédimentaire vers la rivière. Une certaine quantité de précipitation est nécessaire pour que le ruissellement de surface soit assez important pour prendre en charge les dépôts meubles et les transporter vers la rivière. Ainsi, les résultats des tests de corrélations entre la turbidité et les précipitations ont démontré une plus forte relation entre ces deux paramètres lorsque les analyses sont réalisées sur les données incluant seulement les périodes de précipitations d'intensité moyenne ou élevée ($r = 0,50$), comparativement aux données sur l'ensemble de la saison ($r = 0,27$).

Par ailleurs, cette recherche visait à vérifier si la variation de la turbidité dans le cours d'eau principal de la vallée Tasiapik est liée à la dégradation du pergélisol engendré généralement par une hausse des températures. Les résultats des analyses statistiques indiquent que la turbidité est influencée par les températures atmosphériques. Les tests de corrélations effectués sur les données horaires de l'ensemble de la période d'analyse révèlent une corrélation significative entre ces deux paramètres; toutefois, cette corrélation est très faible ($r = 0,06$, Tableau 4) et est vraisemblablement faussée en raison de la grande quantité de données utilisées. Il s'agit d'une corrélation plus faible que les résultats

obtenus dans les travaux de Jolivel et Allard (2017), qui ont déterminé qu'il existait une relation positive entre les températures atmosphériques et la turbidité de la rivière Sheldrake en 2010 ($r = 0,14$). Par contre, lorsque les analyses sont effectuées sur les données qui incluent seulement les périodes chaudes ($> 15\text{ °C}$), on obtient une corrélation significative de taille faible à moyenne ($r = 0,26$, Tableau 5). D'ailleurs, la force du coefficient de corrélation augmente de façon significative en effectuant les tests seulement sur la période la plus chaude de l'été 2019, soit du 25 au 27 juin ($r = 0,50$, Tableau 6). Ainsi, ces résultats indiquent qu'un certain seuil de température est nécessaire pour que la turbidité soit influencée par les températures atmosphériques. En ce sens, les résultats des analyses de variances indiquent qu'il y a une différence dans la turbidité selon les classes de températures atmosphériques (Figure 33a, Annexe A - Résultats des analyses de variances) et que chacune des classes sont différentes entre elles (Annexe B - Résultats des comparaisons multiples). Les résultats obtenus par la sélection de modèles supposent également que les températures atmosphériques ont une influence sur la turbidité de la rivière Tasiapik, alors que les deux modèles plausibles incluent la variable température (Tableau 9, Annexe C - Résultats des sélections de modèles). Selon l'inférence multimodèle effectué, il y a une augmentation du *log* de la turbidité de $0,028 \pm 0,001$ UTN pour chaque augmentation de 1 °C des températures atmosphériques moyennes (Annexe D - Résultats des inférence multimodèles).

Bien que les conditions météorologiques et le débit sont des facteurs importants dans le contrôle de la turbidité de la rivière Tasiapik, les réseaux hydrographiques des régions de hautes latitudes sont des systèmes complexes et certains processus de même que les caractéristiques géomorphologiques propres à chacun des sites influencent grandement la turbidité d'une rivière. Dans la vallée Tasiapik, la dégradation des buttes cryogènes menant à la formation de mares thermokarstiques crée des puits à sédiments; ces sédiments sont ensuite transportés vers la rivière à travers un réseau de ravins. La turbidité au T7, situé dans la section de la vallée qui comprend plusieurs lacs thermokarstiques, est grandement influencée par ces processus. De plus, l'efficacité du ruissellement de surface est favorisée par la topographie dans certains sites; une moins grande quantité de précipitation est nécessaire pour transporter les sédiments vers la rivière et engendrer une hausse de la turbidité. C'est le cas, entre autres, des sites T4 et T5 où la rivière est encaissée à travers des versants relativement abrupts. Qui plus est, les mouvements de masse en bordure de rivière, générés lors d'une instabilité créée par l'approfondissement de la couche active du pergélisol, contribuent directement à l'augmentation de la turbidité de la rivière Tasiapik en libérant des dépôts meubles qui seront

transportés par la rivière. Il serait d'ailleurs intéressant de procéder à des analyses géochimiques et minéralogiques pour obtenir une meilleure compréhension de la provenance des sédiments lors d'événement de turbidité élevée.

Les résultats de cette étude vont dans le sens de ceux obtenus par Syvitski (2002) ainsi que Jolivel et Allard (2017), qui ont fait mention dans leurs travaux d'une augmentation de la turbidité des rivières de hautes latitudes associée à la hausse des températures atmosphériques. Ces processus générant une hausse de la turbidité dans les rivières d'environnements pergélisolés seront amplifiés dans les prochaines décennies en raison des modifications environnementales liées aux changements climatiques. Selon les projections, une hausse des températures atmosphériques de 0,2 °C en été et une augmentation de 5% des précipitations par décennies sont prévues dans la région d'Umiujaq (Allard et Lemay, 2012). Avec de telles conditions, le pergélisol dans la vallée Tasiapik pourrait fondre complètement d'ici 2040 (Dagenais et al., 2020).

Ces résultats aideront à mieux comprendre l'évolution de la concentration de sédiments en suspension des rivières de hautes latitudes dans les prochaines années. Toutefois, ce genre de projet nécessite l'acquisition d'un jeu de données sur une plus longue période de temps pour avoir des résultats plus fiables et, ainsi, déterminer si ces processus se répètent chaque année. Par ailleurs, il serait intéressant de prélever des données plus tôt dans la saison pour mieux comprendre les variations de la turbidité associée à la fonte de la neige. La saison de fonte nivale est une période très importante dans les processus de transport sédimentaire en raison de l'augmentation rapide du débit des rivières. D'autres paramètres, tels que le taux de dégel du sol ou la quantité de neige accumulée l'hiver précédent, pourraient être inclus dans les analyses; l'accumulation de neige peut jouer un rôle important sur la dynamique du transport sédimentaire en rivière (Church, 1988). L'utilisation de six turbidimètres dans cette étude fut adéquate pour identifier les différences dans les variations de turbidité à l'intérieur d'un même bassin versant. Toutefois, il fut parfois difficile de faire l'installation de certains turbidimètres en raison de la faible profondeur de la rivière Tasiapik. Il aurait été intéressant, par exemple, d'installer un turbidimètre dans la zone de production et un autre dans la zone de stockage, ce qui ne fut pas possible dans ces travaux. Ainsi, la réalisation d'une telle étude utilisant plusieurs turbidimètres, mais dans une rivière de taille plus importante, pourrait mener à des résultats intéressants concernant les autres zones (zone de production et stockage) d'une rivière.

Bibliographie

- Allard, M., Fortier, R., Sarrazin, D., Calmels, F., Chaumont, D., Savard, J. P. et Tarussov, A. (2007). *L'impact du réchauffement climatique sur les aéroports du Nunavik : caractéristiques du pergélisol et caractérisation des processus de dégradation des pistes (Rapport scientifique final pour Ouranos)*. Consulté à l'adresse https://www.ouranos.ca/publication-scientifique/RapportAllard2007-2_FR.pdf
- Allard, Michel et Lemay, M. (2012). *Nunavik and Nunatsiavut: from science to policy—an integrated regional impact study (IRIS) of climate change and modernization*. (A. I. Université Laval, Éd.). Québec, QC.
- Arlen-Pouliot, Y. et Bhiry, N. (2005). Palaeoecology of a palsa and a filled thermokarst pond in a permafrost peatland, subarctic Québec, Canada. *Holocene*, 15(3), 408-419. <https://doi.org/10.1191/0959683605hl818rp>
- Beck, I., Ludwig, R., Bernier, M., Lévesque, E. et Boike, J. (2015). Assessing permafrost degradation and land cover changes (1986-2009) using remote sensing data over Umiujaq, Sub-Arctic Québec. *Permafrost and Periglacial Processes*, 26(2), 129-141. <https://doi.org/10.1002/ppp.1839>
- Bowden, W. B., Gooseff, M. N., Balsler, A., Green, A., Peterson, B. J. et Bradford, J. (2008). Sediment and nutrient delivery from thermokarst features in the foothills of the North Slope, Alaska: Potential impacts on headwater stream ecosystems. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 113(2), 1-12. <https://doi.org/10.1029/2007JG000470>
- Centre d'études nordiques. (2018). Données des stations climatiques d'Umiujaq au Nunavik, Québec, Canada. <https://doi.org/10.5885/45120SL-067305A53E914AF0>
- Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec. (2015). *Détermination des solides en suspension totaux et volatils : méthode gravimétrique*. MA. 115 – S.S. 1.2, Rév. 3.
- Chandler, F. W. (1988). *The Early Proterozoic Richmond Gulf graben, east coast of Hudson Bay, Quebec*. (Geological Survey of Canada, Éd.).
- Church, M. A. (1988). Floods in cold climates. Dans *Flood Geomorphology* (p. 205-229). New York: Wiley.
- Cochand, M., Molson, J. et Lemieux, J. M. (2019). Groundwater hydrogeochemistry in permafrost regions. *Permafrost and Periglacial Processes*, 30(2), 90-103. <https://doi.org/10.1002/ppp.1998>
- Cockburn, J. M. H. et Lamoureux, S. F. (2008). Hydroclimate controls over seasonal sediment yield in two adjacent High Arctic watersheds. *Hydrological Processes*, 22(12), 2013-2027. <https://doi.org/10.1002/hyp.6798>
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. (N. J. : L. E. A. Hillsdale, Éd.).
- Cumming, H. et Herbert, N. A. (2016). Gill structural change in response to turbidity has no effect on the oxygen uptake of a juvenile sparid fish. *Conservation Physiology*, 4(1). <https://doi.org/10.1093/conphys/cow033>
- Dagenais, S., Molson, J., Lemieux, J. M., Fortier, R. et Therrien, R. (2020). Coupled cryo-hydrogeological modelling of permafrost dynamics near Umiujaq (Nunavik, Canada). *Hydrogeology Journal*, 28(3), 887-904. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02111-3>
- Doré, G., Bilodeau, J.-P., Masseck Thiam, P. et Perron Drolet, F. (2014). *Impact des changements climatiques sur les chaussées des réseaux routiers québécois [Final scientific report for Ouranos]*. Québec, QC.

- Douglas, I. (1967). Man, vegetation and the sediment yields of rivers. *Nature*, 215(5104), 925-928. <https://doi.org/10.1038/215925a0>
- Downing, J. (2006). Twenty-five years with OBS sensors: The good, the bad, and the ugly. *Continental Shelf Research*, 26(17-18), 2299-2318. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2006.07.018>
- Dugan, H. A., Lamoureux, S. F., Lafrenière, M. J. et Lewis, T. (2009). Hydrological and sediment yield response to summer rainfall in a small high Arctic watershed. *Hydrological Processes*, 23(10), 1514-1526. <https://doi.org/10.1002/hyp.7285>
- Eaton, D. W. et Darbyshire, F. (2010). Lithospheric architecture and tectonic evolution of the Hudson Bay region. *Tectonophysics*. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.09.006>
- Environnement Canada. (2004). *Canadian Climate Normals or Averages 1971-2000*. Ottawa.
- Felix, D., Albayrak, I. et Boes, R. M. (2018). In-situ investigation on real-time suspended sediment measurement techniques: turbidimetry, acoustic attenuation, laser diffraction (LISST) and vibrating tube densimetry. *International Journal of Sediment Research*, 33(1), 3-17. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2017.11.003>
- Fillion, M.-È., Bhiry, N. et Touazi, M. (2014). Differential development of two palsa fields in a peatland located near Whapmagoostui-Kuujuarapik, Northern Québec, Canada. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 46(1), 40-54. <https://doi.org/10.1657/1938-4246-46.1.40>
- Forbes, A. C. et Lamoureux, S. F. (2005). Climatic controls on streamflow and suspended sediment transport in three large middle arctic catchments, Boothia Peninsula, Nunavut, Canada. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 37(3), 304-315. [https://doi.org/10.1657/1523-0430\(2005\)037\[0304:CCOSAS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1657/1523-0430(2005)037[0304:CCOSAS]2.0.CO;2)
- Fortier, R. et Aube-Maurice, B. (2008). Fast permafrost degradation near Umiujaq in Nunavik (Canada) since 1957 assessed from time-lapse aerial and satellite photographs. Dans *International Conference on Permafrost (ICOP) Proceedings* (p. 457-462). Quebec City, QC, Canada. Consulté à l'adresse https://www-engineeringvillage-com.acces.bibl.ulaval.ca/search/doc/abstract.url?&pageType=quickSearch&usageZone=resultslist&usageOrigin=searchresults&searchtype=Quick&SEARCHID=ffe718d3M20eeM4866M8ebaM2529bc538435&DOCINDEX=1&ignore_docid=grf_M578b2cf614856
- Fortier, R., Banville, D. R., Lévesque, R., Lemieux, J. M., Molson, J., Therrien, R. et Ouellet, M. (2020). Development of a three-dimensional geological model, based on Quaternary chronology, geological mapping, and geophysical investigation, of a watershed in the discontinuous permafrost zone near Umiujaq (Nunavik, Canada). *Hydrogeology Journal*, 28(3), 813-832. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02113-1>
- Fortier, R., LeBlanc, A.-M. et Yu, W. (2011). Impacts of permafrost degradation on a road embankment at Umiujaq in Nunavik (Quebec), Canada. *Canadian Geotechnical Journal*, 48(5), 720-740. <https://doi.org/10.1139/t10-101>
- Fraser, C., Hill, P. R. et Allard, M. (2005). Morphology and facies architecture of a falling sea level strandplain, Umiujaq, Hudson Bay, Canada. *Sedimentology*, 52(1), 141-160. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2004.00680.x>
- French, H. M. (2007). Present-day periglacial environments. Dans John Wiley and Sons (Éd.), *The Periglacial Environment* (3e éd., p. 47-82). Chichester, England.

- Göransson, G., Larson, M. et Bendz, D. (2013). Variation in turbidity with precipitation and flow in a regulated river system-river Göta Älv, SW Sweden. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(7), 2529-2542. <https://doi.org/10.5194/hess-17-2529-2013>
- Gouvernement du Canada. (2019). Glossaire. Consulté 20 avril 2020, à l'adresse https://climate.weather.gc.ca/glossary_f.html
- Gouvernement du Québec. (2012). Lac Tasiujaq. [https://doi.org/10.1016/s1769-7255\(08\)75158-7](https://doi.org/10.1016/s1769-7255(08)75158-7)
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. (2014). *Summary for Policymakers. Climate change 2014: synthesis report. Contribution of working groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Geneva, Switzerland: Gian-Kasper Plattner. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>
- Gullian, M., Espinosa-Faller, F. J., Nunez, A. et Lopez-Barahona, N. (2012). Effect of turbidity on the ultraviolet disinfection performance in recirculating aquaculture systems with low water exchange. *Aquaculture Research*, 43(4), 595-606. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2109.2011.02866.x>
- Hamilton, J. L. et Luffman, I. (2009). Precipitation, pathogens, and turbidity trends in the Little River, Tennessee. *Physical Geography*, 30(3), 236-248. <https://doi.org/10.2747/0272-3646.30.3.236>
- Heiri, O., Lotter, A. F. et Lemcke, G. (2001). Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: Reproducibility and comparability of results. *Journal of Paleolimnology*, 25(1), 101-110. <https://doi.org/10.1023/A:1008119611481>
- Inman, D. L. et Jenkins, S. A. (1999). Climate change and the episodicity of sediment flux of small California rivers. *The Journal of Geology*, 107, 251-270. Consulté à l'adresse <https://escholarship.org/uc/item/7hw6j6qs>
- Jolivel, M. et Allard, M. (2013). Thermokarst and export of sediment and organic carbon in the Sheldrake River watershed, Nunavik, Canada. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 118(3), 1729-1745. <https://doi.org/10.1002/jgrf.20119>
- Jolivel, M. et Allard, M. (2017). Impact of permafrost thaw on the turbidity regime of a subarctic river: the Sheldrake River, Nunavik, Quebec. *Arctic Science*, 3(2), 451-474. <https://doi.org/10.1139/as-2016-0006>
- Jorgenson, M. T., Shur, Y. L. et Pullman, E. R. (2006). Abrupt increase in permafrost degradation in Arctic Alaska. *Geophysical Research Letters*, 33(2), L02503. <https://doi.org/10.1029/2005GL024960>
- Kokelj, S. V., Lacelle, D., Lantz, T. C., Tunnicliffe, J., Malone, L., Clark, I. D. et Chin, K. S. (2013). Thawing of massive ground ice in mega slumps drives increases in stream sediment and solute flux across a range of watershed scales. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 118(2), 681-692. <https://doi.org/10.1002/jgrf.20063>
- Lajeunesse, P. et Allard, M. (2003). The Nastapoka drift belt, eastern Hudson Bay: Implications of a stillstand of the Quebec-Labrador ice margin in the Tyrrell Sea at 8 ka BP. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 40(1), 65-76. <https://doi.org/10.1139/e02-085>
- Lamoureux, S. F. et Lafrenière, M. J. (2009). Fluvial impact of extensive active layer detachments, Cape Bounty, Melville Island, Canada. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 41(1), 59-68. [https://doi.org/10.1657/1938-4246\(08-030\)\[LAMOUREUX\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1657/1938-4246(08-030)[LAMOUREUX]2.0.CO;2)
- Lavoie, C., Allard, M. et Duhamel, D. (2012). Deglaciation landforms and C-14 chronology of the Lac Guillaume-Delisle area, eastern Hudson Bay: A report on field evidence. *Geomorphology*, 159-160,

142-155. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.03.015>

- Lawler, D. M., Petts, G. E., Foster, I. D. L. et Harper, S. (2006). Turbidity dynamics during spring storm events in an urban headwater river system: The Upper Tame, West Midlands, UK. *Science of the Total Environment*, 360(1-3), 109-126. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.08.032>
- Lemieux, J.-M., Fortier, R., Talbot-Poulin, M.-C., Molson, J., Therrien, R., Ouellet, M., ... Murray, R. (2016). Groundwater occurrence in cold environments: examples from Nunavik, Canada. *Hydrogeology Journal*, 24(6), 1497-1513. <https://doi.org/10.1007/s10040-016-1411-1>
- Lemieux, J. M., Fortier, R., Murray, R., Dagenais, S., Cochand, M., Delottier, H., ... Parhizkar, M. (2020). Groundwater dynamics within a watershed in the discontinuous permafrost zone near Umiujaq (Nunavik, Canada). *Hydrogeology Journal*, 28(3), 833-851. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02110-4>
- Lewis, T., Braun, C., Hardy, D. R., Francus, P. et Bradley, R. S. (2005). An extreme sediment transfer event in a canadian high arctic stream. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 37(4), 477-482. [https://doi.org/10.1657/1523-0430\(2005\)037\[0477:AESTE\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1657/1523-0430(2005)037[0477:AESTE]2.0.CO;2)
- Lewkowicz, A. G. (1990). Morphology, frequency and magnitude of active layer detachment slides, Fosheim Peninsula, Ellesmere Island, N.W.T. *Nordicana*, 54(May), 111-118.
- Lewkowicz, A. G. et Harris, C. (2005). Frequency and magnitude of active-layer detachment failures in discontinuous and continuous permafrost, northern Canada. *Permafrost and Periglacial Processes*, 16(1), 115-130. <https://doi.org/10.1002/ppp.522>
- Luoto, M. et Seppälä, M. (2003). Thermokarst ponds as indicators of the former distribution of palsas in finnish lapland. *Permafrost and Periglacial Processes*, 14(1), 19-27. <https://doi.org/10.1002/ppp.441>
- Matveev, A., Laurion, I., Deshpande, B. N., Bhiry, N. et Vincent, W. F. (2016). High methane emissions from thermokarst lakes in subarctic peatlands. *Limnology and Oceanography*, 61(S1), S150-S164. <https://doi.org/10.1002/lno.10311>
- Ménard, É., Allard, M. et Michaud, Y. (1998). Monitoring of ground surface temperatures in various biophysical micro-environments near Umiujaq, eastern Hudson Bay, Canada. *Permafrost: Proceedings of the Seventh ...*, 55(55), 723-729. Consulté à l'adresse <http://www.arlis.org/docs/vol1/ICOP/40770716/CD-ROM/Proceedings/PDF001189/112326.pdf>
- Michel, F. A. et Van Everdingen, R. O. (1994). Changes in hydrogeologic regimes in permafrost regions due to climatic change. *Permafrost and Periglacial Processes*, 5(3), 191-195. <https://doi.org/10.1002/ppp.3430050308>
- Milliman, J. D. et Syvitski, J. P. M. (1992). Geomorphic/tectonic control of sediment discharge to the ocean: the importance of small mountainous rivers. *The Journal of Geology*, 100(5), 525-544. <https://doi.org/10.1086/629606>
- Minello, T. J. et Benfield, M. C. (2018). Effects of turbidity on feeding of southern flounder on estuarine prey. *Marine Ecology Progress Series*, 594, 203-212. <https://doi.org/10.3354/meps12535>
- Ouranos. (2015). *Vers l'adaptation. Synthèse des connaissances sur les changements climatiques au Québec*. Montréal, Québec. Consulté à l'adresse <https://www.ouranos.ca/publication-scientifique/SyntheseRapportfinal.pdf>
- Payette, S. (1983). The forest tundra and present tree-lines of the northern Quebec-Labrador peninsula. Dans *Proceedings of the northern Quebec tree-line conference* (Vol. 47, p. 3-24). Québec, QC: Collection

Nordicana.

- Provencher-Nolet, L., Bernier, M. et Lévesque, E. (2014). Quantification des changements récents à l'écotone forêt-toundra à partir de l'analyse numérique de photographies aériennes. *Écoscience*, 21(3-4), 419-433. [https://doi.org/10.2980/21-\(3-4\)-3715](https://doi.org/10.2980/21-(3-4)-3715)
- Romanovsky, V. E., Drozdov, D. S., Oberman, N. G., Malkova, G. V., Kholodov, A. L., Marchenko, S. S., ... Vasiliev, A. A. (2010). Thermal state of permafrost in Russia. *Permafrost and Periglacial Processes*, 21(2), 136-155. <https://doi.org/10.1002/ppp.683>
- Schoellhamer, D. H. (1993). Biological interference of optical backscatterance sensors in Tampa Bay, Florida. *Marine Geology*, 110(3-4), 303-313. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(93\)90090-l](https://doi.org/10.1016/0025-3227(93)90090-l)
- Schumm, S. A. (1960). *The shape of alluvial channels in relation to sediment type. Geological Survey Professional Paper 352-B.*
- Schumm, S. A. (1977). *The fluvial system.* New York: John Wiley & Sons, Ltd.
- Schuur, E. A. G., McGuire, A. D., Schädel, C., Grosse, G., Harden, J. W., Hayes, D. J., ... Vonk, J. E. (2015). Climate change and the permafrost carbon feedback. *Nature*. Nature Publishing Group. <https://doi.org/10.1038/nature14338>
- Seguin, M. K. et Allard, M. (1984). Le Pergélisol et les processus thermokarstiques de la région de la région de la rivière Nastapoca, Nouveau-Québec. *Geographie Physique et Quaternaire*, 38(1), 11-25. <https://doi.org/10.7202/032532ar>
- Sollid, J. L. et Sørbel, L. (1998). Palsa bogs as a climate indicator: examples from Dovrefjell, Southern Norway. *Ambio*, 27(4), 287-291. <https://doi.org/10.2307/4314737>
- Syvitski, J. P. M. (2002). Sediment discharge variability in Arctic rivers: Implications for a warmer future. *Polar Research*, 21(2), 323-330. <https://doi.org/10.1111/j.1751-8369.2002.tb00087.x>
- Tananaev, N. I. (2015). Hysteresis effects of suspended sediment transport in relation to geomorphic conditions and dominant sediment sources in medium and large rivers of the Russian Arctic. *Hydrology Research*, 46(2), 232-243. <https://doi.org/10.2166/nh.2013.199>
- Vallée, S. et Payette, S. (2007). Collapse of permafrost mounds along a subarctic river over the last 100 years (northern Québec). *Geomorphology*, 90(1-2), 162-170. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.01.019>
- Walker, J. et Hadden, L. (1998). Placing colville river delta research on the internet in a digital library format. Dans *Seventh International Permafrost Conference* (p. 1103-1107). Collection Nordicana.
- Williams, G. P. (1989). Sediment concentration versus water discharge during single hydrologic events in rivers. *Journal of Hydrology*, 111(1-4), 89-106. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(89\)90254-0](https://doi.org/10.1016/0022-1694(89)90254-0)
- Wilson, L. (1973). Variations in mean annual sediment yield as a function of mean annual precipitation. *American Journal of Science*. American Journal of Science. <https://doi.org/10.2475/ajs.273.4.335>

Annexe A - Résultats des analyses de variances

Température atmosphérique et débit

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
Temperature_classe	2	45	22.5	67.45	<2e-16	***
Debit_classe	2	1952	976.1	2921.83	<2e-16	***
Temperature_classe:Debit_classe	4	99	24.8	74.16	<2e-16	***
Residuals	12045	4024	0.3			

Précipitation et débit

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
Precipitation_classe	2	118.3	59.2	218.45	<2e-16	***
Debit_classe	2	1081.5	540.7	1996.61	<2e-16	***
Precipitation_classe:Debit_classe	4	39.1	9.8	36.06	<2e-16	**
Residuals	10366	2807.4	0.3			

Annexe B - Résultats des comparaisons multiples

Température atmosphérique et débit

```
$Temperature_classe
      diff          lwr          upr      p adj
T_2-T_1 0.14272636 0.11392084 0.1715319 0.0000000
T_3-T_1 0.09331407 0.05599399 0.1306341 0.0000000
T_3-T_2 -0.04941229 -0.08294987 -0.0158747 0.0016094
```

```
$Debit_classe
      diff          lwr          upr p adj
D_2-D_1 0.3522209 0.3257872 0.3786546 0
D_3-D_1 1.3919824 1.3479831 1.4359817 0
D_3-D_2 1.0397615 0.9971966 1.0823265 0
```

Précipitation et débit

```
$Precipitation_classe
      diff          lwr          upr p adj
P_2-P_1 0.2145335 0.1738412 0.2552258 0
P_3-P_1 0.6752777 0.5842099 0.7663455 0
P_3-P_2 0.4607442 0.3626342 0.5588542 0
```

```
$Debit_classe
      diff          lwr          upr p adj
D_2-D_1 0.1944168 0.1679914 0.2208421 0
D_3-D_1 1.0737668 1.0327921 1.1147415 0
D_3-D_2 0.8793500 0.8407067 0.9179934 0
```

Annexe C - Résultats des sélections de modèles

Tableau d'AICc

Model selection based on AICc:

	K	AICc	Delta_AICc	AICcWt	Cum.Wt	LL
Mod10	9	17648.00	0.00	0.7	0.7	-8814.99
Mod6	10	17649.71	1.70	0.3	1.0	-8814.84
Mod2	9	18190.24	542.24	0.0	1.0	-9086.11
Mod1	10	18191.53	543.52	0.0	1.0	-9085.75
Mod8	9	18359.99	711.99	0.0	1.0	-9170.99
Mod11	8	18360.78	712.78	0.0	1.0	-9172.38
Mod12	9	20222.56	2574.56	0.0	1.0	-10102.27
Mod4	9	20483.31	2835.31	0.0	1.0	-10232.65
Mod14	8	20703.67	3055.67	0.0	1.0	-10343.83
Mod7	9	23801.83	6153.83	0.0	1.0	-11891.91
Mod13	8	24107.65	6459.65	0.0	1.0	-12045.82
Mod3	9	24199.29	6551.28	0.0	1.0	-12090.64
Mod9	8	24199.53	6551.53	0.0	1.0	-12091.76
Mod5	8	24522.25	6874.24	0.0	1.0	-12253.12

Sommaire du modèle 10

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	2.3595545	0.0153902	153.31	<2e-16 ***
Debit	0.0135498	0.0001466	92.43	<2e-16 ***
Temperature_48h	0.0276431	0.0010190	27.13	<2e-16 ***
SiteT2	0.5356377	0.0180025	29.75	<2e-16 ***
SiteT4	0.4305034	0.0156884	27.44	<2e-16 ***
SiteT5	0.3579646	0.0156884	22.82	<2e-16 ***
SiteT6	-0.2055367	0.0166984	-12.31	<2e-16 ***
SiteT7	0.1731051	0.0156884	11.03	<2e-16 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.5029 on 12046 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.5022, Adjusted R-squared: 0.5019

F-statistic: 1736 on 7 and 12046 DF, p-value: < 2.2e-16

Coefficients:

Sommaire du modèle 6

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	2.359669	0.015392	153.304	<2e-16 ***
Precipitation	0.003653	0.006665	0.548	0.584
Debit	0.013530	0.000151	89.579	<2e-16 ***
Temperature_48h	0.027619	0.001020	27.078	<2e-16 ***
SiteT2	0.535752	0.018004	29.757	<2e-16 ***
SiteT4	0.430502	0.015689	27.440	<2e-16 ***
SiteT5	0.357963	0.015689	22.816	<2e-16 ***
SiteT6	-0.205519	0.016699	-12.307	<2e-16 ***
SiteT7	0.173104	0.015689	11.034	<2e-16 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.5029 on 12045 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.5022, Adjusted R-squared: 0.5019

F-statistic: 1519 on 8 and 12045 DF, p-value: < 2.2e-16

Annexe D - Résultats des inférence multimodèles

Variable débit

	K	AICc	Delta_AICc	AICcWt	Estimate	SE
Mod1	10	18191.53	543.524	0.000	0.014	0
Mod2	9	18190.24	542.241	0.000	0.014	0
Mod3	9	24199.29	6551.284	0.000	0.000	0
Mod4	9	20483.31	2835.308	0.000	0.000	0
Mod5	8	24522.25	6874.244	0.000	0.000	0
Mod6	10	17649.71	1.703	0.299	0.014	0
Mod7	9	23801.83	6153.831	0.000	0.000	0
Mod8	9	18359.99	711.989	0.000	0.013	0
Mod9	8	24199.53	6551.530	0.000	0.000	0
Mod10	9	17648.00	0.000	0.701	0.014	0
Mod11	8	18360.78	712.779	0.000	0.014	0
Mod12	9	20222.56	2574.558	0.000	0.000	0
Mod13	8	24107.65	6459.646	0.000	0.000	0
Mod14	8	20703.67	3055.670	0.000	0.000	0

Model-averaged estimate with shrinkage: 0.014

Unconditional SE: 0.001

95% Unconditional confidence interval: 0.013, 0.014

Variable température atmosphérique 48h

	K	AICc	Delta_AICc	AICcWt	Estimate	SE
Mod1	10	18191.53	543.524	0.000	0.000	0.000
Mod2	9	18190.24	542.241	0.000	0.000	0.000
Mod3	9	24199.29	6551.284	0.000	0.000	0.000
Mod4	9	20483.31	2835.308	0.000	0.000	0.000
Mod5	8	24522.25	6874.244	0.000	0.000	0.000
Mod6	10	17649.71	1.703	0.299	0.028	0.001
Mod7	9	23801.83	6153.831	0.000	0.027	0.001
Mod8	9	18359.99	711.989	0.000	0.000	0.000
Mod9	8	24199.53	6551.530	0.000	0.000	0.000
Mod10	9	17648.00	0.000	0.701	0.028	0.001
Mod11	8	18360.78	712.779	0.000	0.000	0.000
Mod12	9	20222.56	2574.558	0.000	0.025	0.001
Mod13	8	24107.65	6459.646	0.000	0.027	0.001
Mod14	8	20703.67	3055.670	0.000	0.000	0.000

Model-averaged estimate with shrinkage: 0.028

Unconditional SE: 0.001

95% Unconditional confidence interval: 0.026, 0.03

Variable précipitation

	K	AICc	Delta_AICc	AICcWt	Estimate	SE
Mod1	10	18191.53	543.524	0.000	0.006	0.007
Mod2	9	18190.24	542.241	0.000	0.000	0.000
Mod3	9	24199.29	6551.284	0.000	0.154	0.008
Mod4	9	20483.31	2835.308	0.000	0.000	0.000
Mod5	8	24522.25	6874.244	0.000	0.000	0.000

Mod6	10	17649.71	1.703	0.299	0.004	0.007
Mod7	9	23801.83	6153.831	0.000	0.147	0.008
Mod8	9	18359.99	711.989	0.000	0.011	0.007
Mod9	8	24199.53	6551.530	0.000	0.154	0.008
Mod10	9	17648.00	0.000	0.701	0.000	0.000
Mod11	8	18360.78	712.779	0.000	0.000	0.000
Mod12	9	20222.56	2574.558	0.000	0.000	0.000
Mod13	8	24107.65	6459.646	0.000	0.000	0.000
Mod14	8	20703.67	3055.670	0.000	0.000	0.000

Model-averaged estimate with shrinkage: 0.001

Unconditional SE: 0.004

95% Unconditional confidence interval: -0.007, 0.009