



Université du Québec
à Rimouski

Impact des changements climatiques sur la réponse des petits cours d'eau du nord de la Gaspésie, Québec

Mémoire présenté

dans le cadre du programme de maîtrise en géographie
en vue de l'obtention du grade de maître ès sciences (M.Sc.)

PAR

© **YAN BOULET**

décembre 2024

Composition du jury :

Pascal Bernatchez, président du jury, Université du Québec à Rimouski

Francis Gauthier, directeur de recherche, Université du Québec à Rimouski

Thomas Buffin-Bélanger, codirecteur de recherche, Université du Québec à Rimouski

Mélanie Trudel, examinatrice externe, Université de Sherbrooke

Dépôt initial le 12 août 2024

Dépôt final le 20 décembre 2024

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI
Service de la bibliothèque

Avertissement

La diffusion de ce mémoire ou de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire « *Autorisation de reproduire et de diffuser un rapport, un mémoire ou une thèse* ». En signant ce formulaire, l'auteur concède à l'Université du Québec à Rimouski une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de son travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, l'auteur autorise l'Université du Québec à Rimouski à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de son travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits moraux ni à ses droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, l'auteur conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont il possède un exemplaire.

À Vicky, Mathias et Jules dont la collaboration, la compréhension et les encouragements ont permis la production de ce mémoire.

REMERCIEMENTS

Les choix à effectuer au début d'un projet de maîtrise vont habituellement de soi : on choisit un sujet de recherche qui nous intéresse, puis un objet de recherche pertinent pour le sujet. Ensuite, on se met à la recherche d'une ou plusieurs personnes en mesure de nous accompagner dans l'atteinte et le dépassement des objectifs fixés en début de projet. Malheureusement pour mon équipe de direction, ils ont eu à vivre les étapes dans le désordre ; le problème était que le choix d'un sujet de recherche m'importait moins que le processus et les apprentissages qui venaient avec un projet dans le milieu académique. J'ai donc choisi deux directeurs qui, je croyais, avaient des personnalités et des compétences diamétralement opposées et qui seraient en mesure de me pousser (ou de me tirer) chacun de leur côté lorsque j'en aurais besoin. Au fil du temps, j'ai constaté que j'avais pour m'épauler deux personnes dont la profondeur et le désir de me voir réussir allaient largement prendre le dessus sur mes prémisses initiales. J'aimerais donc remercier mes deux directeurs pour leur compréhension, leurs encouragements et la possibilité d'arrimer la vie de famille, le projet de maîtrise et le travail d'agent de recherche, même quand c'était les trois en même temps. Thomas, j'aimerais te remercier pour ton calme, ton souci des autres, ta générosité et ta disponibilité, même quand tu n'en avais aucune et que tu trouvais tout de même un trou quelque part au milieu de la nuit pour répondre à mes questions ou pour commenter abondamment mes textes. Francis, je te remercie pour ta motivation, ton énergie contagieuse, ta curiosité et tes questions toujours pertinentes, même quand elles manquaient parfois de tact (c'est une bonne chose !) qui m'ont fait cheminer et font en sorte que ce mémoire a pu être réalisé, même après 5 ans de travail.

La vie de famille demande habituellement de faire des sacrifices et des compromis importants pour le bien-être des enfants et l'harmonie des relations familiales. L'aboutissement d'un projet de maîtrise nécessite également un dévouement qui empiète sur

la vie de famille étant donné que le temps est une ressource non-renouvelable. J'ai eu la chance de pouvoir faire les deux en même temps, mais je n'aurais pu y arriver sans le soutien, le dévouement et la compréhension de ma femme et de mes enfants. Vicky, merci de m'avoir poussé à retourner à l'école, de m'avoir épaulé financièrement pour le faire et pour ta présence rassurante, stabilisante et lumineuse pour les enfants et moi durant toutes ces années. Mathias et Jules, c'est aussi grâce à vous que j'ai pu produire ce travail. Merci à vous trois de m'avoir permis de mener à terme ce projet malgré les soirées de rédactions coincées entre Noël et le jour de l'an, mes absences lors des campagnes de terrain et les fins de semaine ou les jours fériés travaillés. Merci aussi pour les beaux moments m'ayant permis de passer au travers des périodes plus exigeantes du projet spécifiquement mais aussi de la vie dans son ensemble. Je vous promets d'être plus disponible et présent à partir de maintenant.

C'est étonnant comme « le hasard » fait bien les choses. J'ai passé la partie la plus enrichissante de mon enfance les deux pieds dans la vallée de mon site d'étude ; mon cœur y est toujours d'ailleurs. Une des maisons dans lesquelles j'ai grandi était même située sur un cône de déjection : le ruisseau coulait dans la cave chaque printemps sans que je comprenne pourquoi. Maman, c'est ton sens de l'aventure et ton côté bohème qui m'ont fait voir du pays et qui ont aiguisé ma curiosité. J'aimerais te remercier aussi de m'avoir transmis ton amour de la langue française qui rend la rédaction d'un document comme celui-ci moins pénible et même stimulante ! Mes frères Kim et Jérémie, bien qu'étant physiquement éloignés, les souvenirs qui me viennent chaque fois qu'on se visite ou que je pense à Mont-Saint-Pierre sont d'une richesse inépuisable. Merci pour votre sens critique et l'acceptation de mon pragmatisme et de mes biais.

J'aimerais aussi remercier les personnes m'ayant accompagné sur le terrain. Toutes et tous sans exception ont contribué à créer des moments agréables, des discussions enrichissantes et m'ont permis de développer des compétences dont j'avais grandement besoin. Samuel, merci pour l'épaule que tu as sacrifiée à donner des coups de pelle dans des cônes alluviaux et ta débrouillardise sans limite. Alex, ta bonne humeur contagieuse et ton optimisme inébranlable rendent positifs même les moments les plus désagréables. Francis

M., jamais je n'aurais pu installer les stations météorologiques sans ton aide, ni même en déménager une du sommet du Mont-Saint-Pierre vers le plateau entre Mont-Louis et l'Anse-Pleureuse en moins de 2 heures rush. Félix, Catherine et Zoé, merci pour votre patience et votre détermination. Prendre des mesures dans des cours d'eau dynamiques ou sur des plateaux en pleine tempête de neige quand on reste pris avec le camion ne représente pas des conditions idéales, mais vous l'avez fait avec le sourire et je vous en remercie.

Merci également aux équipes de recherche du Laboratoire de Géomorphologie et de Gestion des Risques en Montagne (LGGRM) et du Laboratoire de Géomorphologie et de Dynamique Fluviale (LGDF). Vos commentaires pertinents et les discussions riches qui en découlaient ont permis d'améliorer la pertinence de ce projet.

Finalement, j'aimerais remercier les organismes ayant permis de financer ce projet de maîtrise : l'Université du Québec à Rimouski, le LGDF, le LGGRM, le Ministère des Transports du Québec, le Réseau Inondations InterSectoriel du Québec et le Centre d'Études Nordiques. L'aboutissement du projet n'aurait jamais pu avoir lieu sans leur contribution financière.

RÉSUMÉ

Bien que représentant la majorité des réseaux hydrographiques à l'échelle mondiale, les petits cours d'eau de tête sont souvent mis de côté dans les analyses abordant les impacts qu'auront les changements climatiques sur leur régime hydrologique. Pourtant, ils sont d'une importance capitale pour la qualité des eaux de surface et des habitats en plus de représenter la source principale de sédiments contribuant au dynamisme des rivières qu'ils alimentent. Ce mémoire vise à utiliser des données météorologiques actuelles et de projections climatiques pour mieux comprendre la réponse hydrologique des petits bassins versants nord gaspésiens lors d'événements hydrologiques d'importance (torrentialité, crue printanière). En développant un seuil intensité – durée de déclenchement d'aléas hydrogéomorphologiques adapté au nord de la Gaspésie et en calculant des tendances climatiques, il a été observé que les événements surpassant le seuil seraient de 2 à 3 fois plus fréquents en 2100 qu'en 2011 selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5. Les résultats de ces analyses ont initié une réflexion sur les impacts morphologiques potentiels à prendre en compte dans une optique de gestion et d'utilisation du territoire dans une région où les cours d'eau sont particulièrement dynamiques et sensibles au déclenchement d'aléas hydrogéomorphologiques. La hausse de la fréquence des événements surpassant le seuil, le comportement hydrologique du cours d'eau instrumenté lors d'événements de crue connus et documentés et le modèle conceptuel proposé mettent en relation les changements climatiques projetés, les impacts sur la réponse hydrologique et les ajustements morphologiques qui pourraient survenir à l'intérieur des petits cours d'eau, sur leurs cônes alluviaux et dans les rivières principales dans lesquelles ils se jettent.

Mots clés : [changements climatiques, hydrogéomorphologie, petits cours d'eau, pluies torrentielles, Gaspésie, aléas]

ABSTRACT

Even though they represent over 70% of stream length in drainage networks at the global scale, small headwater streams are often sidelined when evaluating climate change impacts on the hydrological regime of rivers. Yet, they are of capital importance in maintaining surface water and habitat quality for ecological and resource management purposes. Furthermore, they represent the main source of sediments for downstream fluvial systems, being the main contributor to their dynamics. This thesis aims to use historical meteorological data and climate projections to better understand the hydrological response of small gaspesian headwater streams to important flood events. By developing a triggering intensity – duration rainfall threshold for hydrogeomorphological hazards adapted to the region and extracting trends from precipitation projections, it has been observed that the annual number of events surpassing the threshold would at least double in 2100 in comparison to 2011. Those results initiated a reflection on potential morphological adjustments to consider for land use and management in a region where rivers are particularly mobile and sensitive to the triggering of hydrogeomorphological hazards. The increase in the frequency of triggering rainfall, the hydrological behavior of the instrumented stream during known and documented flood events and the proposed conceptual model help explain potential climate change effects on the hydrological response and morphological adjustments that could happen inside headwater streams, on their alluvial fan and in the main rivers they feed.

Keywords: [climate change, hydrogeomorphology, headwater streams, torrential rainfall, Gaspésie, natural hazards]

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	ix
RÉSUMÉ.....	xiv
ABSTRACT	xvi
TABLE DES MATIÈRES	xviii
LISTE DES TABLEAUX.....	xx
LISTE DES FIGURES.....	xxii
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES	xxvi
LISTE DES SYMBOLES	xxviii
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
1. UN TERRITOIRE FAÇONNÉ PAR L’OCCUPATION HUMAINE ET LES PROCESSUS NATURELS	2
1.1 Occupation du territoire	2
1.2 Contexte physiographique et hydrographique	4
1.3 Contexte climatique	8
2. CADRE THÉORIQUE.....	11
2.1 Variabilité spatio-temporelle des précipitations.....	12
2.2 Seuils de déclenchement	13
2.3 Changements climatiques et petits cours d’eau	15
3. OBJECTIFS ET STRUCTURE DU MÉMOIRE	18
CHAPITRE 1 Seuils de précipitations, variabilité spatio-temporelle et tendances climatiques dans les pluies torrentielles en haute-Gaspésie, Québec.....	20
1.1 RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DU PREMIER ARTICLE	20
1.2 SEUILS DE PRÉCIPITATIONS, VARIABILITÉ SPATIOTEMPORELLE ET TENDANCES CLIMATIQUES DANS LES PLUIES TORRENTIELLES EN HAUTE- GASPÉSIE, QUÉBEC.....	21

1.2.1 Introduction	21
1.2.2 Territoire à l'étude	23
1.2.3 Les événements de pluies torrentielles	24
1.2.4 Tendances et projections climatiques	34
1.2.5 Conclusion	39
CHAPITRE 2 Impacts des changements climatiques sur la réponse des petits cours d'eau du nord de la Gaspésie	42
2.1 RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DU DEUXIÈME ARTICLE	42
2.2 IMPACTS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LA RÉPONSE DES PETITS COURS D'EAU DU NORD DE LA GASPÉSIE	43
2.2.1 Introduction	43
2.2.2 Site d'étude	45
2.2.3 Méthodologie	47
2.2.4 Résultats	54
2.2.5 Discussion	67
2.2.6 Conclusion	81
CONCLUSION GÉNÉRALE	84
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	89

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 Événements torrentiels connus et aléas hydrogéomorphologiques observés (vert=oui, rouge=non, gris=?) (CD=coulée de débris, GT=glissement de terrain, AT=activité torrentielle (cône), IR=inondation en rivière). Les données de précipitations proviennent de la station de Cap-Madeleine.....	25
Tableau 2 Variations par décennie et totales calculées à partir des pentes de régression linéaire pour les paramètres illustrés dans les figures 12 et 13	32
Tableau 3 Variations par décennie et totales calculées à partir des pentes de régression linéaire pour les paramètres illustrés dans la figure 15	37
Tableau 4 Variations par décennie et totales calculées à partir des pentes de régression linéaire pour les paramètres illustrés dans la figure 12	37
Tableau 5 Variables utilisées pour extraire les tendances climatiques	53
Tableau 6 Tendances significatives issues des tests de Mann-Kendall effectués sur les données de température mesurées à la station météorologique de Cap-Madeleine. Les taux des changements sont dans les colonnes Δ 10 ans (moyenne par 10 ans) et 1939-2020 (totale).....	63
Tableau 7 Tendances significatives issues des tests de Mann-Kendall effectués sur les données de précipitations mesurées à la station météorologique de Cap-Madeleine. Les taux des changements sont dans les colonnes à la droite de la valeur p.	65
Tableau 8 Tendances climatiques issues des tests de Mann-Kendall effectués sur les données de précipitations quotidiennes (HIRHAM5, RCA4v1_CanESM2, RCA4v1_ICHEC) et horaires (CanRCM4) des projections climatiques. La colonne 2011-2100 contient la valeur des changements observés.	66
Tableau 9 Tendances climatiques issues des tests de Mann-Kendall effectués sur les données de température des projections climatiques. La colonne 2011-2100 contient la valeur des changements observés.	67

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Formes à l'échelle du paysage de la zone d'étude. Les formes ont été identifiées par l'outil geomorphons (GRASS) et la légende adaptée au contexte.....	5
Figure 2. Photos des vallées de Mont-Saint-Pierre prises vers le nord (a), vers le sud (b) et de Mont-Louis vers le sud (c)	6
Figure 3. Longueur des cours d'eau en fonction de l'ordre de Strahler et des données de la Géobase du réseau hydrographique du Québec (GRHQ)	7
Figure 4. Exemples de petits cours d'eau réactifs du nord de la Gaspésie. a) Localisation de la zone d'étude b) Localisation des trois sites illustrés c) Cône alluvial de la coulée à Désirée, Rivière-à-Claude, en crue d) Intervention mécanique sur le cône alluvial après la crue e) Nouvelle construction en bordure de la coulée à Layoutte à Mont-Saint-Pierre f) Dragage avant un événement de crue dans le ruisseau à Tremblay à Mont-Louis et g) Aggradation du lit après l'événement.	9
Figure 5. Normales climatiques à la station de Sainte-Anne-des-Monts (Environnement Canada) entre 1981 et 2010	10
Figure 6. Présentation théorique des seuils intensité – durée des précipitations pour le déclenchement d'aléas HGM et seuils issus de la littérature	14
Figure 7. Carte de localisation des stations météorologiques des réseaux nationaux (Environnement Canada et MELCCFP) (a) et du LGGRM (b)	24
Figure 8. Seuils Intensité – Durée (ID) des précipitations issus de la littérature et seuil proposé pour les données horaires de la station météorologique de Cap-Madeleine	27
Figure 9. Seuil Total – Durée (TD) des précipitations proposé pour les données quotidiennes de la station météorologique de Cap-Madeleine	28
Figure 10. Variabilité spatiale des précipitations associées à la tempête post-tropicale Ida sur deux échelles spatiales (locale, régionale) et temporelles (15 min, 1 heure). Les données horaires proviennent des stations de Cap-Chat (CC), Cap-Madeleine (CM), Gaspé (GA), New Carlisle (NC) et New Richmond (NR).	30

Figure 11. Variabilité dans les précipitations de l'orage de juin 2009. Intensité vs résolution temporelle (a) et précipitations mesurées (b)	31
Figure 12. Tendances dans les données horaires enregistrées à la station de Cap-Madeleine (1971-2020) pour les événements surpassant le seuil ID proposé	33
Figure 13. Tendances dans les données quotidiennes enregistrées à la station de Cap-Madeleine (1882-2020) pour les événements surpassant le seuil TD proposé	34
Figure 14. Carte de la grille nam-44 utilisée par NA-CORDEX et les cinq points sélectionnés pour les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 du GIEC	35
Figure 15. Variation des paramètres des événements surpassant le seuil ID proposé pour les données de projection de 2010 à 2100	36
Figure 16. Variation des paramètres des événements surpassant le seuil TD proposé pour les données de projection de 2010 à 2100	38
Figure 17. Normales climatiques à la station de Sainte-Anne-des-Monts (Environnement Canada) entre 1981 et 2010. En a) la température de l'air, b) les précipitations et c) la hauteur de neige	46
Figure 18. Carte de localisation de la région (a), du site d'étude (b) et du cône alluvial (c) de la coulée à Layouthe	47
Figure 19. Capteurs de pression installés sur le cône alluvial de la coulée à Layouthe: a)MSPAP b)MSPAM c)MSPPO d)MSPAV	48
Figure 20. Stations météorologiques utilisées dans les analyses : a)MSP_Xp b)MTL_Pv c)MSP_Xv	50
Figure 21. Localisation de la station météorologique de Cap-Madeleine (X) et des neuf points de grille NAM-44 NA-CORDEX sélectionnés (•) pour effectuer les analyses des tendances climatiques	51
Figure 22. Données mesurées pour la coulée à Layouthe. En a) l'intensité des pluies, b) la température de l'air, c) la hauteur de neige et d) le niveau d'eau. Les zones en gris représentent les périodes où les données sont inexistantes.	55
Figure 23. Réponse lors de la crue printanière de 2020. En a) courbe cumulée de la pluie, b) intensité de la pluie, c) température de l'air, d) hauteur de neige, e) niveau d'eau. Le capteur de température de la station MSP_Xp n'était pas fonctionnel pour la période couverte.....	56
Figure 24. Réponse lors de la crue printanière de 2021. En a) courbe cumulée de la pluie, b) intensité de la pluie, c) température de l'air, d) hauteur de neige, e) niveau d'eau.	57

Figure 25. Réponse lors de la crue printanière de 2022. En a) courbe cumulée de la pluie, b) intensité de la pluie, c) température de l'air, d) niveau d'eau. La batterie de la station MSP_Xp a cessé de fonctionner l'hiver précédent malgré le panneau solaire qui l'alimentait.....	58
Figure 26. Réponse lors de la tempête post-tropicale Ida. En a) courbe cumulée de la pluie, b) intensité de la pluie, c) niveau d'eau.....	59
Figure 27. Réponse lors d'un événement survenu un mois après Ida. En a) courbe cumulée de la pluie, b) intensité de la pluie, c) niveau d'eau.....	60
Figure 28. Réponse lors d'un redoux au début de mois de décembre 2020. En a) courbe cumulée de la pluie, b) intensité de la pluie, c) température de l'air, d) hauteur de neige, e) niveau d'eau.....	61
Figure 29. Réponse lors d'un redoux à la fin du mois de décembre 2020. En a) courbe cumulée de la pluie, b) intensité de la pluie, c) température de l'air, d) hauteur de neige, e) niveau d'eau.....	62
Figure 30. Banc de confluence de la coulée à Layoutte dans la rivière Mont-Saint-Pierre.....	75
Figure 31. Photos du plateau entre Mont-Saint-Pierre et Mont-Louis a) Vers le sud b) Vers le nord-ouest en bordure de la coulée à Layoutte	78
Figure 32. Modèle conceptuel proposé pour illustrer l'impact des changements climatiques sur les réponses hydrologiques et morphologiques des cours d'eau torrentiels du nord de la Gaspésie	79

LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

CEHQ	Centre d'expertise hydrique du Québec
CENG	Conseil de l'eau du nord de la Gaspésie
DJD	Degré-jours de dégel
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
GRHQ	Géobase du réseau hydrographique du Québec
HGM	Hydrogéomorphologique
ID	Intensité – durée
LGGRM	Laboratoire de géomorphologie et de gestion des risques en montagne
MELCCFP	Ministère de l'environnement, de la lutte contre les changements climatiques, de la faune et des parcs
MRC	Municipalité régionale de comté
NA-CORDEX	North American coordinated regional climate downscaling experiment
RCP	Representative concentration pathway
TD	Total – durée

LISTE DES SYMBOLES

°C	Degré Celsius
mm	Millimètre
cm	Centimètre
m	Mètre
km	Kilomètre
min	Minute
h	Heure
j	Jour
n	Nombre

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Même si les petits cours d'eau d'ordres 1 et 2 (Strahler 1952) représentent plus de 70% de la longueur des réseaux hydrographiques à l'échelle mondiale (Downing et al. 2012), ils sont souvent mis de côté dans les analyses abordant les impacts potentiels des changements climatiques sur le régime hydrologique des rivières. Pourtant, ils jouent un rôle essentiel dans la préservation de la qualité des eaux de surfaces (Wohl 2017) et des habitats (Finn et al. 2011; Hotaling et al. 2017) en étant une source importante de sédiments pour les rivières qu'ils alimentent (MacDonald et Coe 2007). Les sédiments transitant par les petits cours d'eau sont en grande partie responsables des changements morphologiques observés en aval. Pour qu'il y ait transport de sédiments, deux conditions doivent être présentes : la capacité (volume) et la compétence (taille) de l'écoulement doivent être suffisantes pour les déplacer et les sources de sédiments doivent être disponibles et mobilisables par le cours d'eau (Attal 2017). Dans la mesure où le cours d'eau répond à ces deux critères, plus les événements de crues sont importants, plus les processus de transport seront intenses.

Les inondations en plaine inondable sont celles dont on parle le plus compte tenu des enjeux et du nombre de personnes affectées lorsqu'elles frappent les milieux urbains, comme ce fut le cas lors des inondations de 2017 et 2019 dans les régions de l'Outaouais, de Laval et de Montréal. Cependant, le Québec est aussi touché par des crues torrentielles importantes dans les régions où les conditions le permettent. C'est le cas dans le nord de la Gaspésie. L'énergie du relief y est importante et les dépôts meubles hérités de la dernière glaciation sont nombreux et omniprésents à l'échelle du territoire. En effet, cette région n'a pas été épargnée lorsque des pluies torrentielles ont fait sortir la rivière au Renard de son lit en 2007 (Buffin-Bélanger 2009) ou quand la tempête post-tropicale Arthur a frappé la région en 2014 (Gauthier et al. 2015). Les événements de pluie torrentielle ont le potentiel de déclencher des aléas hydrogéomorphologiques (HGM), comme les glissements de terrain superficiels, les

coulées de débris, l'activation des processus d'aggradation et d'avulsion sur les cônes alluviaux et les inondations (Gauthier et al. 2022). Depuis 1979, ce n'est pas moins de douze événements de précipitations répertoriés qui ont déclenché des aléas HGM dans le nord de la Gaspésie (Hétu et al. 2015; Gauthier et al. 2015). On y trouve à la fois des orages de courte durée et de forte intensité, des systèmes dépressionnaires, des tempêtes post-tropicales et des pluies printanières. La diversité des types d'événement et des moments auxquels ils surviennent témoigne de la sensibilité de la région aux aléas HGM.

Le risque que posent les petits cours d'eau pour les résidents et les infrastructures dans le nord de la Gaspésie dépend de trois contextes qui sont présentés dans la section suivante :

- 1) L'occupation du sol qui explique l'exposition aux aléas et l'impact des activités humaines sur leur déclenchement ;
- 2) La physiographie qui permet d'évaluer les réponses hydrologiques et morphologiques potentielles du cours d'eau ;
- 3) Le climat actuel et futur qui contrôle le bilan hydrique et donc la réponse hydrologique.

1. UN TERRITOIRE FAÇONNÉ PAR L'OCCUPATION HUMAINE ET LES PROCESSUS NATURELS

1.1 Occupation du territoire

Gesp'gewa'gi: là où la terre se termine en langue mi'gmaque

On trouve des traces d'utilisation du territoire gaspésien datant d'au moins 9000 ans, notamment dans le village de La Martre en Haute-Gaspésie (Fallu 2004). Des communautés issues des cultures Plano, ancêtres des Mi'gmaqs actuels auraient migré vers l'est en provenance des Grands Lacs lorsque le retrait du glacier continental l'a permis (Dumais 2000). Longtemps avant l'établissement des villages le long de la côte, les Mi'gmaqs

parcouraient et utilisaient le territoire en naviguant sur les eaux des rivières Gaspésiennes comme en témoignent les écrits des premiers colons (18^e siècle) et les rapports de naufrage (19^e siècle) (Jeannotte et al. 2016).

Plusieurs toponymes de villages ou de cours d'eau sont dérivés de la langue mi'gmaque. Par exemple, les mots *Mntan* (océan, Matane) et *Mntn'ji'j* (Petit-Matane), *Gesgapegiag* (là où l'écoulement s'estompe, Cascapédia) et *Ipsigiag* (lagune, Paspébiac) tiennent leur origine et leur phonétique des toponymes mi'gmaqs alors que *Wowkwisue Sipu* (Rivière-au-Renard) et *Nabasugwemkewey Elamkiaq* (là où nous pêchons avec une torche sur les bancs, rivière au Flambeau) ont été traduites littéralement pour nommer les rivières de la région (Jeannotte et al. 2016). Comme ces toponymes, l'utilisation que les Mi'gmaqs faisaient du territoire était ancrée dans le paysage ; on l'utilisait tel qu'il était en respectant la ressource et la nature qui la fournissait, en laissant le moins de traces possible sur celui-ci.

Vint ensuite la colonisation. Du 16^e au 19^e siècle, les principales activités économiques de la Gaspésie étaient la chasse à la baleine et la pêche. Des postes de pêcheurs se sont mis en place le long de la côte, dont certains sont devenus des villages, comme Mont-Louis, qui compte une centaine d'habitants en 1700 (Pelletier 2012). Les terres situées en bordure des rivières sont défrichées pour mettre en place une agriculture de subsistance (Pelletier 2012) pour nourrir les pêcheurs (Maltais 2019). Puis, la construction du chemin de fer jusqu'à Gaspé au début du siècle et de la route 132 parcourant le périmètre côtier de la péninsule dans les années 1920 a permis d'exploiter une nouvelle ressource : la forêt. La majorité des rivières du nord de la Gaspésie ont été utilisées pour le transport du bois (drave) vers les moulins à scie pour le transformer ou vers les goélettes en vue de l'exporter (Conseil de l'eau du Nord de la Gaspésie 2016).

Pour faciliter ce transport et le travail des draveurs, des interventions mécaniques dans les cours d'eau pour linéariser leur tracé ou augmenter leur profondeur étaient nécessaires ; c'était l'époque où l'on « domptait » les cours d'eau pour des raisons pratiques. Le bois était transporté à la rivière pendant l'hiver pour être pris en charge par le cours d'eau lors de la crue printanière. Des barrages et des réservoirs étaient même détruits pour faire augmenter

la capacité hydraulique de l'écoulement et favoriser le transport du bois (Bouchard et Boivin 2023). La morphologie des rivières utilisées pour la drave était donc impactée à la fois par les interventions mécaniques directes dans les cours d'eau ainsi que par des écoulements contrôlés et amplifiés qui dépassaient largement le débit morphogène naturel. Au fil du temps, la drave a été abandonnée au profit d'autres méthodes de transport. Les interventions qui y étaient associées ont donc aussi été mises de côté, ce qui a favorisé un réajustement graduel des rivières aux nouvelles conditions (Dust et Wohl 2012). Les zones développées en bordure de ces rivières « domptées » sont aujourd'hui exposées aux aléas d'inondation et de mobilité qui étaient autrefois atténués par les interventions des compagnies forestières.

Aujourd'hui, le réseau routier qui sillonne le territoire est coincé entre la côte et les versants des Appalaches. C'est le cas de la route 132 qui ceinture la région le long de la côte qui est exposée aux aléas hydrogéomorphologiques (HGM), tels que les chutes de pierre et de blocs de glace, les avalanches de neige, les glissements de terrain superficiels (Gauthier et al. 2022; Héту et al. 2015) et la submersion côtière (Drejza et al. 2019). La route 198, qui relie L'Anse-Pleureuse à Gaspé en passant par Murdochville est également exposée à plusieurs aléas de versants, mais aussi à des aléas torrentiels alors qu'elle traverse un grand nombre de cônes alluviaux (Caron Fournier 2009; Héту et al. 2015; Gauthier et al. 2022). Plusieurs tronçons des routes principales et secondaires, certaines infrastructures comme les ponts et ponceaux ainsi que des résidences sont exposées aux aléas HGM posant un risque pour les résidents par exposition directe (aléa) ou indirecte (isolement, services). La physiographie du territoire et les conditions hydrométéorologiques sont les principales causes du déclenchement de ces aléas dans le nord de la Gaspésie.

1.2 Contexte physiographique et hydrographique

Les Appalaches qui forment le socle rocheux de la Gaspésie ont été formées lors de deux orogénèses successives au Paléozoïque. Elles sont formées de roches sédimentaires (grès, shale, grauwacke) fortement plissées et faillées (Héту et Gray 1985). Les périodes glaciaires quaternaires ont permis le développement d'une succession de vallées et plateaux

atteignant des altitudes de 400 à 600 mètres (Figure 2 et 2) sur la portion nord de la Gaspésie où le tracé du réseau hydrographique est contrôlé par la structure géologique des Appalaches (Hétu et Gray 1985).

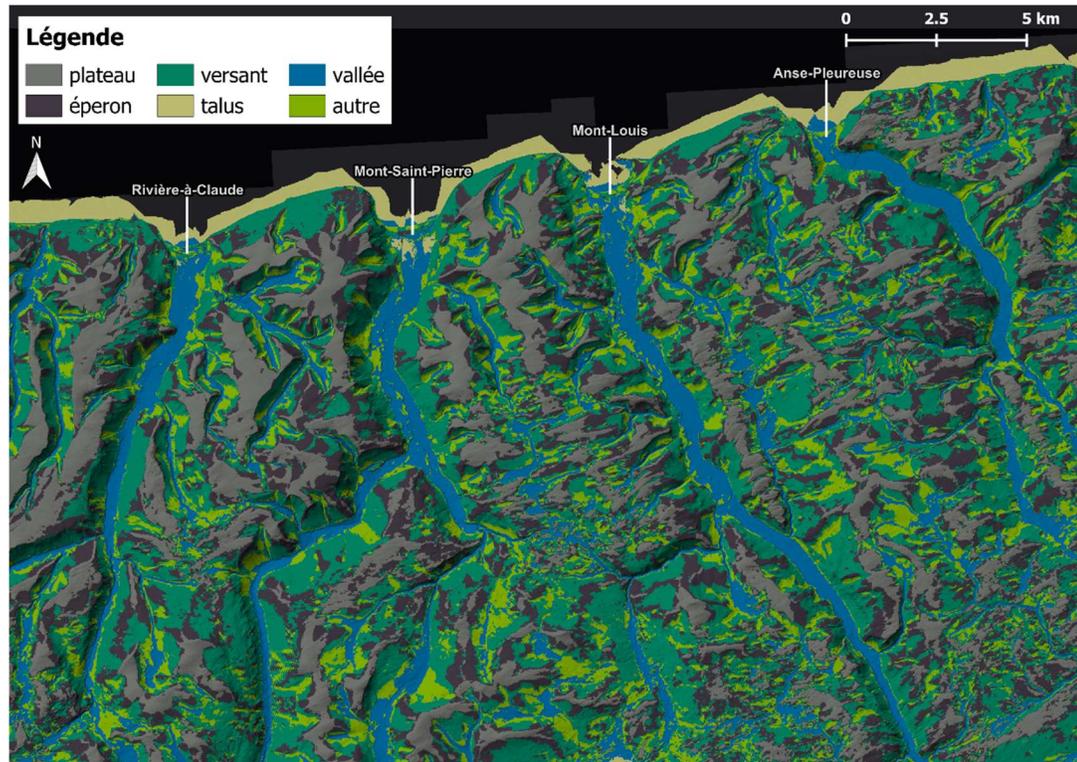


Figure 1. Formes à l'échelle du paysage de la zone d'étude. Les formes ont été identifiées par l'outil geomorphons (GRASS) et la légende adaptée au contexte.

Le nord de la Gaspésie est une région sensible aux aléas fluviaux et de versant (Maltais et al. 2022). Cette sensibilité est expliquée d'abord par l'énergie du relief présentée à la Figure 2, mais aussi par la distribution spatiale des sédiments à l'échelle du territoire. Les dépôts meubles recouvrant la géologie structurale de la région proviennent de la dernière période glaciaire du Quaternaire au Wisconsinien. Ils sont principalement formés de colluvions (flancs et fonds de vallée), de dépôts alluviaux et fluvio-glaciaires (plaines alluviales actuelles et anciennes, deltas), de dépôts marins et littoraux à l'intérieur de la limite du niveau marin relatif (40-75 m) et d'un manteau résiduel de till sur les hauts plateaux (Veillette et Cloutier 1993).

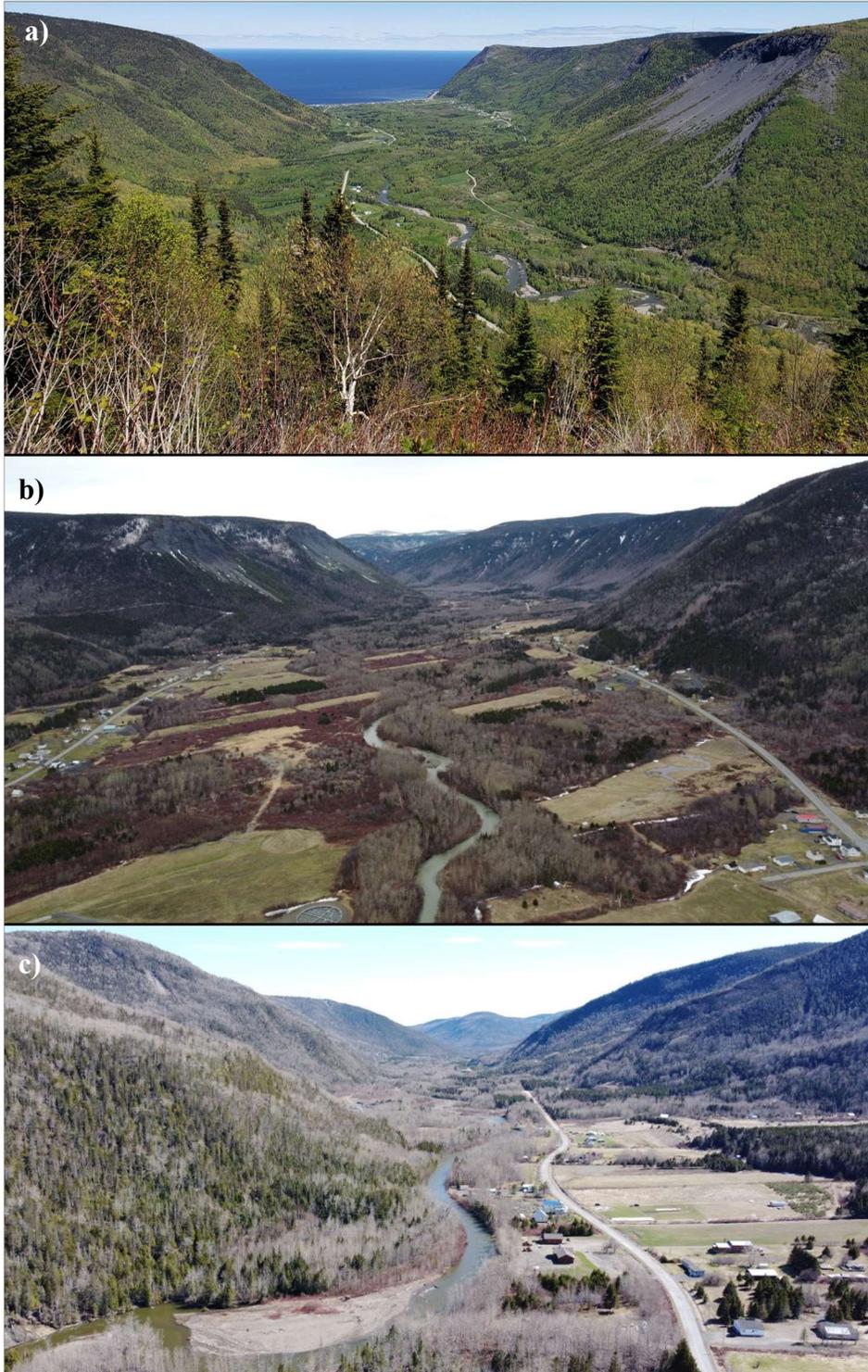


Figure 2. Photos des vallées de Mont-Saint-Pierre prises vers le nord (a), vers le sud (b) et de Mont-Louis vers le sud (c)

Les petits cours d'eau d'ordre 1 et 2 ont généralement une pente plus forte que ceux d'ordres plus élevés. Dans le nord de la Gaspésie, ils représentent aussi environ 75% de la longueur des réseaux hydrographiques (Figure 3). Ils jouent donc un rôle central dans le transit sédimentaire et le dynamisme des rivières de la région, en particulier lors d'événements de crues. Considérant l'historique d'événements de précipitations déclenchant des aléas HGM devenant des sources potentielles de sédiments sur le territoire nord-gaspésien dans les conditions hydrométéorologiques actuelles et le fait que la principale cause de la mobilité des rivières est le transit sédimentaire (Wickert et al. 2013), le dynamisme des rivières de la région devraient au moins perdurer dans le temps. Cependant, les changements climatiques projetés ont le potentiel de modifier les conditions hydrauliques influençant cette dynamique.



Figure 3. Longueur des cours d'eau en fonction de l'ordre de Strahler et des données de la Géobase du réseau hydrographique du Québec (GRHQ)

La Figure 4 illustre trois exemples de petits cours d'eau réactifs dans trois municipalités du nord de la Gaspésie. Fréquemment, le cône alluvial situé à Rivière-à-Claude (Figure 4c), s'active lors des crues. Chaque fois, des interventions mécaniques ont lieu pour « redresser » le cours d'eau (Figure 4d) et les résidences situées à proximité ont de l'eau dans leur sous-sol. Malgré tout, on permet la construction de nouvelles résidences à proximité des cours d'eau à cône alluvial (Figure 4e). Dans certains d'entre eux, on drague le lit avant les événements de crue importants en amont et en aval des traverses (Figure 4f). Il s'agit d'une solution temporaire qui doit être répétée après l'événement (Figure 4g).

1.3 Contexte climatique

Selon la classification de Köppen-Geiger, la Gaspésie possède un climat de type continental humide avec des étés chauds (Peel et al. 2007). Le climat de la région est toutefois plus complexe qu'il n'y paraît. La géographie de la Gaspésie exerce une influence notable sur celui-ci : la proximité du Saint-Laurent et des Appalaches a un impact sur les masses d'air de provenances multiples qui affectent le territoire.

La Gaspésie se situe à un point de convergence des grands systèmes dépressionnaires venant de l'ouest de l'Amérique du Nord, des ouragans devenant tempêtes post-tropicales qui remontent la côte est des États-Unis avant d'atteindre la Gaspésie et des masses d'air arctiques. La région est donc affectée par un climat contrasté où les extrêmes météorologiques sont fréquents (Fortin et al. 2015).

La Figure 5 montre les normales climatiques pour la station météorologique de Sainte-Anne-des-Monts entre 1981 et 2010. Les températures moyennes quotidiennes oscillent entre -15 °C l'hiver et 10 °C l'été. Des précipitations tombent sur la région toute l'année, généralement liquides entre avril et novembre et solides entre décembre et mars.

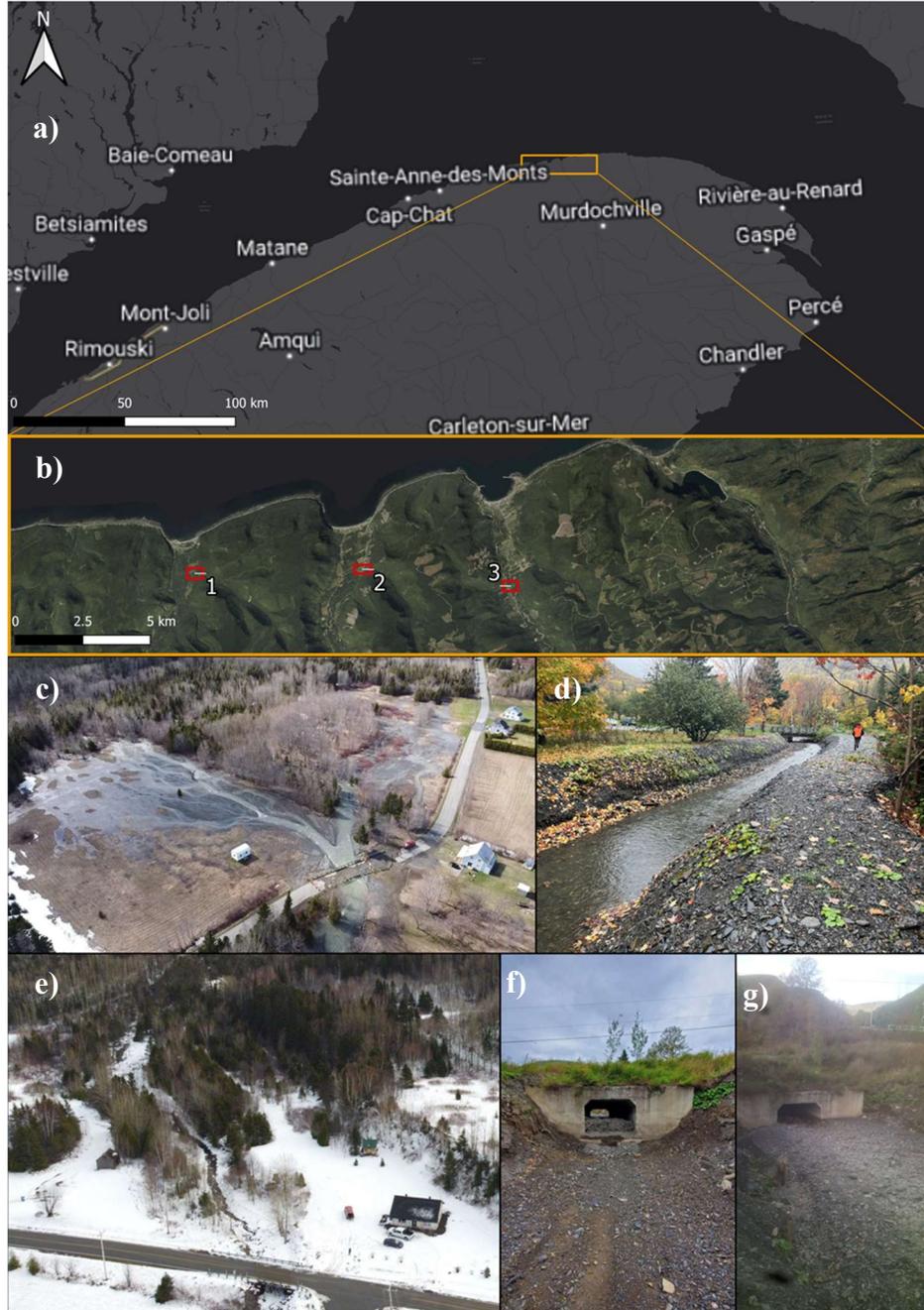


Figure 4. Exemples de petits cours d'eau réactifs du nord de la Gaspésie. a) Localisation de la zone d'étude b) Localisation des trois sites illustrés c) Cône alluvial de la coulée à Désirée, Rivière-à-Claude, en crue (1) d) Intervention mécanique sur le cône alluvial après la crue (1) e) Nouvelle construction en bordure de la coulée à Layoutte à Mont-Saint-Pierre (2) f) Dragage avant un événement de crue dans le ruisseau à Tremblay à Mont-Louis (3) et g) Aggradation du lit après l'événement (3)

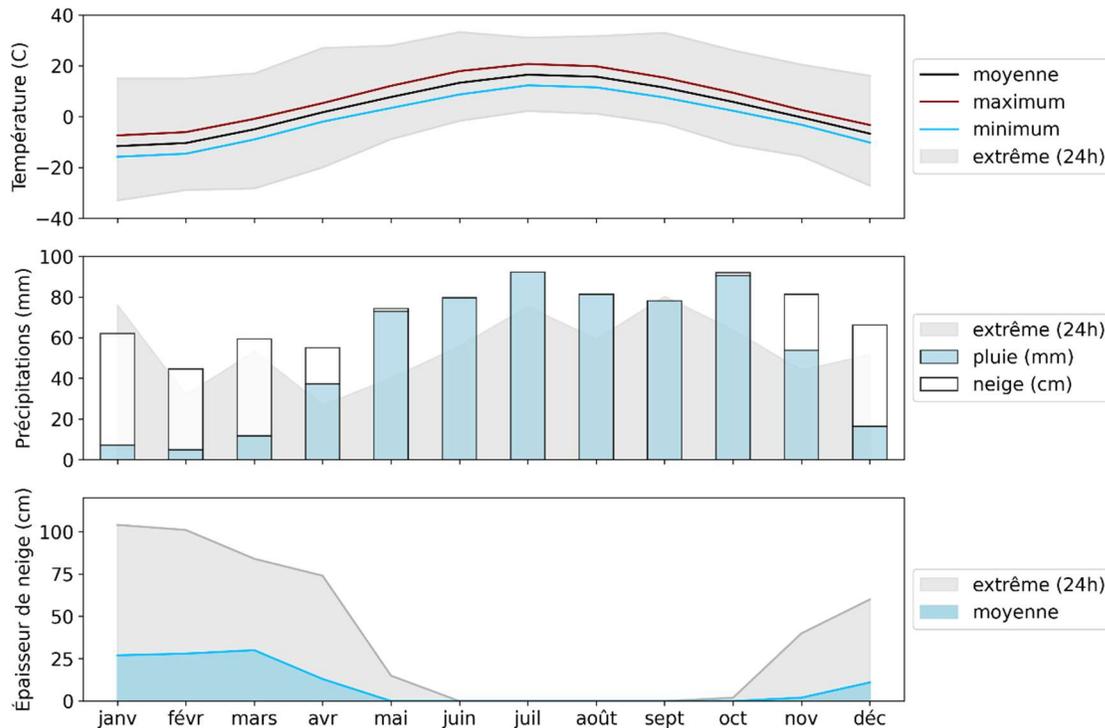


Figure 5. Normales climatiques à la station de Sainte-Anne-des-Monts (Environnement Canada) entre 1981 et 2010

La Gaspésie n'échappera pas aux changements climatiques par le biais de modifications du régime pluviométrique et des températures (Gauthier et al. 2022). Ces modifications, en retour, auront certainement un effet sur la réponse des cours d'eau et l'exposition des infrastructures de transports et des résidents aux aléas HGM qui en découlent. Les données de projection CMIP6 d'Ouranos (Lavoie et al. 2024) pour un scénario d'émissions modéré (SSP2-4.5) pointent vers une hausse de la température moyenne annuelle d'environ 2,8°C d'ici 2100 avec une hausse plus marquée en hiver de 4°C. Les projections pour les précipitations indiquent également une hausse d'environ 100 mm à l'échelle annuelle pour les précipitations liquides et solides combinées, dont 36 mm en hiver. En revanche, les précipitations solides, qui devraient rester stables pour la période hivernale, diminuent significativement en automne et au printemps au profit de précipitations liquides. La hausse projetée des températures ainsi que la diminution des précipitations solides durant

la saison froide et l'augmentation des précipitations liquides affectera le régime hydrologique des rivières gaspésiennes.

L'atlas hydroclimatique du Québec méridional (MELCCFP 2022) montre des tendances pour les crues hiver-printemps et été-automne à l'horizon de 2100 à partir du modèle CMIP5. Les données indiquent que le pic de crue printanier sera plus hâtif et qu'une diminution est de probable (RCP 4.5) à très probable (RCP 8.5) pour la valeur du pic de crue printanier. Le contraire est observé pour les crues automnales où une augmentation de la valeur du pic de crue est probable dans la majorité des rivières de la région. Par contre, les stations hydrométriques installées sur le territoire sont éparses et ne couvrent que les grandes rivières (Sainte-Anne, Au Renard, Dartmouth, York). Les données de projections ne sont donc pas adaptées aux cours d'eau drainant des superficies inférieures à 100 km² à cause des incertitudes liées à la résolution spatiale des données d'entrée. De plus, les données fournies représentent un débit moyen journalier qui n'est pas représentatif des petits cours d'eau. En effet, ces derniers ont généralement un temps de réponse plus rapide et un pic de crue de plus courte durée, ce qui rend nécessaire une analyse sur les débits de pointes plutôt que sur les débits moyens.

2. CADRE THÉORIQUE

Trois composantes sont essentielles pour mieux comprendre les impacts que pourront avoir les changements climatiques sur la réponse hydrologique et la morphologie des petits cours d'eau. Premièrement, les événements de précipitations ont une variabilité spatiale et temporelle dont l'importance évolue en fonction de l'échelle à laquelle les analyses sont produites. Une compréhension de cette variabilité permettra de saisir les nuances sur la réponse hydrologique des petits cours d'eau. Deuxièmement, certains des événements de précipitations déclenchent des aléas HGM qui alimentent le cours d'eau en sédiments. Il est donc pertinent d'aborder le développement de seuils de déclenchement de ces aléas pour comprendre la connectivité sédimentaire entre les petits cours d'eau et les rivières principales. Finalement, les changements climatiques affecteront certainement le régime

hydrologique à l'échelle globale. Leurs impacts potentiels sur les événements de précipitations, la réponse hydrologique et la morphologie des petits cours d'eau sont présentés dans la section 2.3.

2.1 Variabilité spatiotemporelle des précipitations

Les événements de précipitations comportent deux composantes principales : la structure spatiale et la structure temporelle. Ces deux composantes sont étroitement liées et leur combinaison joue un rôle non négligeable dans la réponse hydrologique à l'échelle du bassin versant. Des erreurs significatives dans les prédictions des débits ou du ruissellement découlent de la mauvaise représentation des champs de pluie dans le temps et dans l'espace (Krajewski et al. 2003; Syed et al. 2003). Il est difficile d'obtenir une valeur de précipitations qui est à la fois exacte et précise à l'échelle d'un bassin versant. Pour une valeur unique, l'utilisation d'un pluviomètre au centre du bassin versant semble logique. Pourtant, c'est loin d'être gage de succès. Syed et al. (2003) ont montré qu'un événement de pluie peut facilement être sous-estimé en utilisant cette méthode.

L'utilisation d'un seul instrument de mesure ne suffit pas à obtenir une donnée fiable. Des données matricielles obtenues par radar sont parfois disponibles et permettent d'améliorer la qualité de l'intrant dans les modèles hydrologiques. Un autre moyen d'améliorer la fiabilité des données de précipitations est de déployer un réseau dense de plusieurs pluviomètres. La densité du réseau est importante puisque, même à une échelle inférieure à 5 km², la variabilité spatiale d'une précipitation est considérable (Krajewski et al. 2003; Ciach et Krajewski 2006). Une diminution du coefficient de détermination est observée à la fois quand la distance entre les stations pluviométriques augmente, mais aussi lorsque la résolution temporelle des données est plus fine. Le type d'événement de précipitations influence également la valeur de coefficient (Ciach et Krajewski 2006). En effet, la corrélation entre les stations lorsque la distance augmente est plus forte pour des événements de faible intensité que pour ceux de forte intensité.

Le relief affecte aussi la distribution des précipitations sur le territoire par effet orographique. Le soulèvement des masses d'air favorise la condensation et la formation de nuages. La relation entre les précipitations et l'altitude dépend de la pente, de l'orientation des versants, des aérosols présents dans la colonne d'air (Napoli et al. 2019), de l'exposition de la région aux vents et aux conditions synoptiques (Ly et al. 2013).

2.2 Seuils de déclenchement

Les pluies torrentielles peuvent déclencher des aléas catastrophiques, tels que les crues éclair (Davis 2001; Borga et al. 2014), les glissements de terrain (Crosta et Frattini 2001) et les coulées de débris (Crosta et Frattini 2001; Borga et al. 2014). On sait également que les zones les plus arrosées lors d'événements de pluies torrentielles sont généralement associées aux points d'initiation des aléas HGM (Marra et al. 2016). Des seuils de déclenchement de ces aléas basés sur l'intensité et la durée en heures des précipitations ont été développés sur des bases de données à l'échelle mondiale (Caine 1980; Innes 1983; Guzzetti et al. 2007; 2008). La Figure 6 présente la forme que prennent la plupart des seuils issus de la littérature et illustrent ces derniers pour les comparer entre eux. La variabilité qui existe entre ces seuils dépend de quelques facteurs. D'abord, la qualité des seuils développés est affectée par la structure des données de précipitation (Marra et al. 2017), c'est-à-dire la résolution spatiale et temporelle. Ensuite, selon Vaz et al. (2018), à cause de la variabilité spatiale des événements de pluie, la distance maximale idéale entre l'aléa déclenché et la station météorologique devrait être de 10 kilomètres. Considérant la difficulté d'avoir une instrumentation aussi dense, ils soulignent toutefois qu'une distance de moins de 50 kilomètres reste acceptable lorsqu'elle est la seule disponible. Lorsque des données à résolution temporelle horaire ne sont pas accessibles, il est également possible d'utiliser un seuil de déclenchement basé sur la quantité et la durée des précipitations en jours (Leonarduzzi et al. 2017).

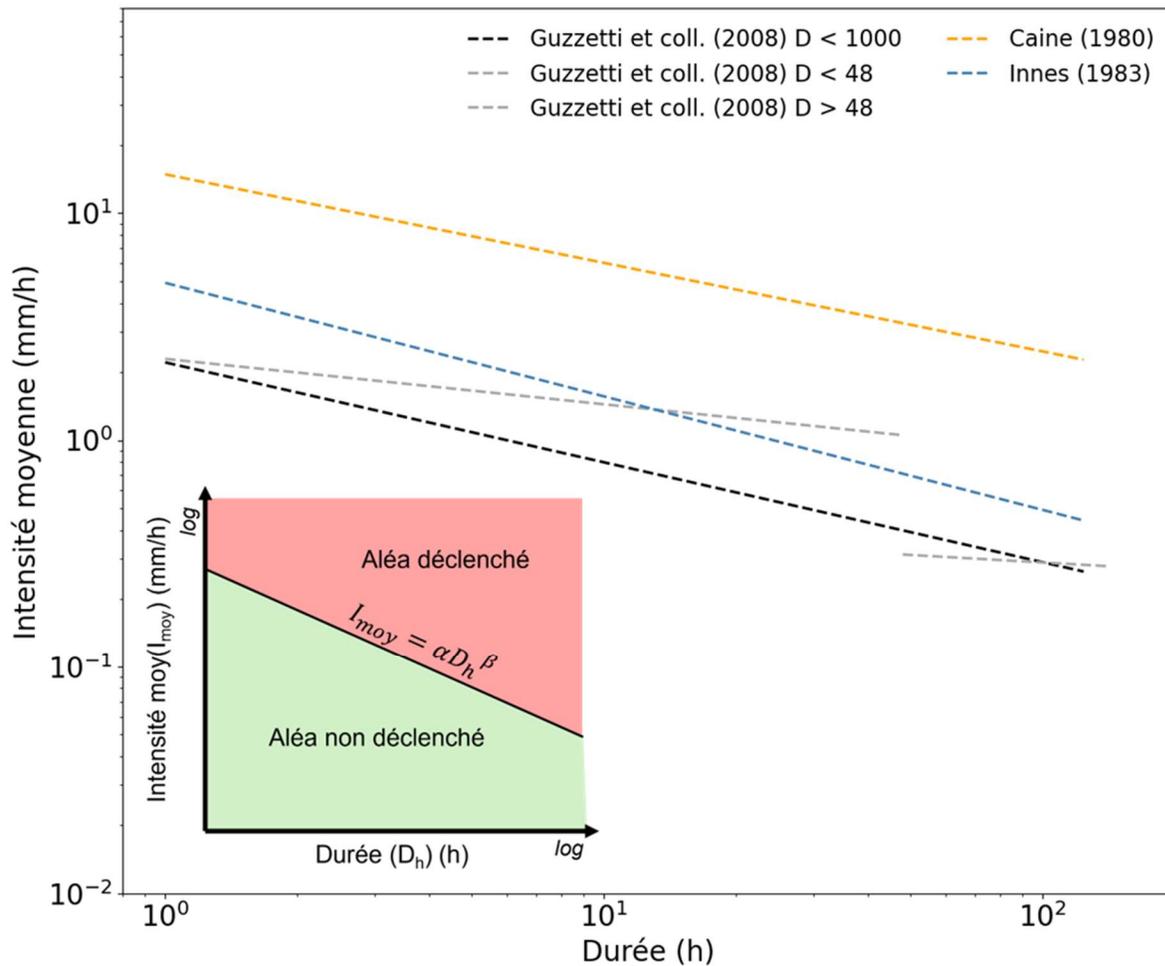


Figure 6. Présentation théorique des seuils intensité – durée des précipitations pour le déclenchement d'aléas HGM et seuils issus de la littérature

Les seuils de déclenchement des aléas HGM existants dans la littérature ne sont pas adaptés au nord de la Gaspésie. Les aléas sont les mêmes, mais les contextes physiographiques et climatiques ne sont pas comparables à ceux des seuils documentés dans les Alpes (Guzzetti et al. 2007) et encore moins à l'échelle mondiale (Caine 1980; Innes 1983; Crosta et Frattini 2001; Guzzetti et al. 2008). L'échelle à laquelle ces derniers sont développés permet d'avoir une idée générale de la sensibilité d'un territoire, mais ne permet pas de saisir les spécificités locales et régionales des événements de pluie torrentielle. Les connaissances sur le déclenchement des aléas dans la région sont limitées par l'étendue du

territoire alors que la couverture spatiotemporelle des stations météorologiques est déficiente. Le nombre de stations est insuffisant pour apprécier la variabilité spatiale des précipitations et la résolution temporelle des données horaires est trop grossière pour mesurer l'impact des événements de très forte intensité, mais de courte durée, comme les orages violents.

Le nombre d'événements recensés dans le nord de la Gaspésie depuis 1979 est faible et ne permet pas l'application d'une méthode objective pour le développement de seuils de déclenchement, comme l'ont fait Guzzetti et al. (2008). Cependant, plusieurs types d'événements de précipitations sont représentés : orages, tempêtes post-tropicales, systèmes dépressionnaires et pluies printanières. Cette variabilité dans les types d'événements et les aléas permet d'amorcer la réflexion et le développement d'un seuil de déclenchement adapté à la région. La complexité du contexte climatique régional causée par la convergence de masses d'air d'origines diverses en plus des effets orographique des Appalaches et maritime du Saint-Laurent rendent pertinent l'évaluation de la variabilité spatiotemporelle des précipitations entraînant une réponse hydrologique importante dans les petits cours d'eau nord-gaspésiens.

2.3 Changements climatiques et petits cours d'eau

La fréquence et l'intensité des cyclones de forte intensité (catégories 4 et 5) ont augmenté depuis les années 1970 (Goldenberg et al. 2001; Vimont et Kossin 2007; M. E. Mann et Emanuel 2006; Saunders et Lea 2008). D'ici 2100, le patron spatial des précipitations affectant l'Amérique du Nord pourrait être perturbé. En effet, la partie nord de la région couvrant de l'état de la Pennsylvanie au Maine devrait être moins arrosée de 50 à 100 mm durant la saison estivale, alors que la partie sud serait plus arrosée en 2100 par rapport à 1990 (Hayhoe et al. 2008). Les événements de précipitations affectant les régions côtières devraient aussi être plus intenses, alors que ceux à l'intérieur des terres le seraient moins (Hayhoe et al. 2008). Le cycle de l'eau serait suffisamment affecté par la modification des conditions hydroclimatiques pour causer des événements de précipitations extrêmes d'une intensité inégalée avec les conditions climatiques actuelles (Giorgi et al. 2019). Peu

importe le scénario utilisé (RCP4.5 ou RCP8.5), les extrêmes quotidiens des précipitations augmentent pour les États-Unis, avec une hausse plus marquée pour le scénario RCP8.5 (Lopez-Cantu et al. 2020). Les seuils de déclenchement des aléas HGM devraient donc aussi être surpassés plus fréquemment dans un climat futur.

Les impacts des changements climatiques sur la réponse hydrologique des petits cours d'eau (< 50 km²) sont peu documentés, puisqu'il n'existe que très peu de données hydrométriques et de projections climatiques adaptées à l'étude de ces impacts. Pour pouvoir calibrer des modèles hydrologiques cohérents pour les petits cours d'eau, il est nécessaire d'utiliser des projections climatiques à haute résolution spatiotemporelle (Tsegaw et al. 2020) compte tenu de leur morphométrie. C'est pour cette raison qu'ils sont généralement exclus des analyses, ou qu'un avertissement concernant la fiabilité des analyses les concernant, comme c'est le cas avec l'atlas hydroclimatique du Québec méridional (MELCCFP 2022).

De plus en plus de projections climatiques aux résolutions spatiales et temporelles plus fines sont développées, permettant le développement de nouvelles méthodes d'analyse des impacts des changements climatiques sur la réponse hydrologique des petits cours d'eau. Tsegaw et al. (2020) ont comparé la période 1981-2011 avec 2070-2100 à l'aide d'un modèle hydrologique régional basé sur des projections climatiques à haute résolution améliorant la spatialisation des données de précipitations. Leurs résultats tendent vers une augmentation du débit moyen annuel de 16% à 33% et du débit maximal annuel de 29% à 38%, de même que des débits de récurrence de 2 à 200 ans plus fréquents de 16% à 43% selon le scénario RCP8.5 d'un modèle calibré sur la région de Bergen, en Norvège. Une analyse hiérarchique a également permis de classer 186 petits bassins versants de Suisse en fonction du type de réponse hydrologique et des variables explicatives les plus significatives (Köplin et al. 2012). Les résultats de ces derniers montrent une diminution des débits estivaux et une augmentation des débits hivernaux dans six des sept groupes. Pour les bassins versants aux altitudes inférieures à 1000 mètres d'altitude, les changements hydrologiques observés sont expliqués par la modification du régime de précipitations. Pour des altitudes situées entre 1000 et 2500 mètres, c'est plutôt la température qui semble influencer la réponse hydrologique en

contrôlant la nature des précipitations et la fonte nivale. Moraga et al. (2021) arrivent à des résultats similaires pour deux sous-bassins des Alpes suisses : une diminution des débits estivaux (20-40%) et une augmentation des débits hivernaux (40%).

Une redistribution des débits saisonniers est aussi observable dans le sud de l'Alberta, où une augmentation des débits hivernaux et printaniers ainsi qu'une diminution des débits estivaux et automnaux sont probables dans un bassin versant de moyenne taille (254 km²) (Forbes et al. 2011). En utilisant 18 ans de données hydrométéorologiques provenant de trois environnements différents (forêt boréale, toundra arbustive, toundra alpine) dans un même bassin versant (179 km²), Rasouli et al. (2014) ont montré que l'hydrologie des bassins versants montagnards du nord du Canada (Yukon) est extrêmement sensible au réchauffement induit par les changements climatiques, particulièrement en ce qui concerne le régime nival.

Aux États-Unis, Young et al. (2019) ont étudié les effets des perturbations forestières et des changements climatiques sur la réponse hydrologique de cinq petits bassins versants forestiers des Appalaches. Ils ont constaté que des perturbations de forte magnitude, mais peu fréquentes ont un impact plus grand que les changements climatiques sur la réponse hydrologique. Au contraire, des perturbations de faible magnitude, mais à fréquence élevée amplifient l'impact des changements climatiques sur le régime hydrologique des petits bassins versants forestiers.

Dans la littérature, les impacts des changements climatiques sur les petits cours d'eau sont essentiellement abordés d'un point de vue écologique. En effet, la diminution de la qualité des eaux de surface et des habitats qui en découle aura un impact sur la biodiversité des communautés (Finn et al. 2011; Hotaling et al. 2017). Cependant, les impacts morphologiques induits par la modification du régime hydrologique sont souvent ignorés même si les petits cours d'eau de tête représentent plus de 70% de la longueur des réseaux hydrographiques à l'échelle mondiale et qu'ils ont un impact significatif sur la morphologie des cours d'eau situés en aval (Wohl 2017).

3. OBJECTIFS ET STRUCTURE DU MÉMOIRE

Les événements de précipitations responsables du déclenchement des aléas HGM sont relativement fréquents. Les changements climatiques projetés, même selon un scénario d'émission de gaz à effet de serre modéré, devraient faire augmenter la fréquence et l'intensité de ces événements. Les cours d'eau du nord de la Gaspésie sont particulièrement dynamiques et sensibles aux aléas hydrogéomorphologiques. Ce dynamisme est expliqué par l'apport sédimentaire des petits cours d'eau torrentiels qui ne sont ni instrumentés, ni inclus dans les projections de l'atlas hydroclimatique du Québec méridional à cause des incertitudes qui leur sont associées.

L'objectif principal de ce mémoire est d'identifier les impacts potentiels des changements climatiques sur les réponses hydrologiques et morphologiques des petits cours d'eau du nord de la Gaspésie. Pour rencontrer cet objectif, deux analyses distinctes sont réalisées menant à la présentation de deux chapitres articles dans ce mémoire.

Le premier chapitre article porte sur les événements de précipitations responsables du déclenchement des aléas HGM dans le nord de la Gaspésie. Il met la table pour le deuxième chapitre article en remplissant les trois objectifs spécifiques suivants :

1. Déterminer un seuil adapté au nord de la Gaspésie au-delà duquel les aléas HGM se déclenchent ;
2. Évaluer la variabilité spatiale des précipitations dans le nord de la Gaspésie ;
3. Extraire des tendances des données historiques et des projections climatiques pour évaluer l'impact des changements climatiques sur la fréquence, l'intensité et la durée des pluies torrentielles ;

Le second chapitre article aborde la réponse hydrologique des petits cours d'eau aux événements de crues, qu'ils soient causés par des pluies torrentielles ou non, et illustre l'effet

des changements climatiques sur la réponse et la morphologie des cours d'eau de la région dans un modèle conceptuel selon les trois objectifs spécifiques suivants :

4. Analyser la réponse hydrologique d'un petit cours d'eau torrentiel à divers événements de crue connus ;
5. Inférer l'effet des changements climatiques sur la réponse hydrologique des petits cours d'eau torrentiels ;
6. Proposer des actions pour atténuer l'impact des changements climatiques sur les réponses hydrologiques et morphologiques des petits cours d'eau torrentiels du nord de la Gaspésie.

Le site d'étude choisi pour l'instrumentation est la coulée à Layoutte. Il s'agit d'un affluent de la rivière Mont-Saint-Pierre. Ce cours d'eau a été choisi d'abord parce que des aléas HGM y sont déclenchés fréquemment lors de pluies torrentielles. Son relief et sa taille en font aussi un petit bassin versant représentatif de la région et il est situé au centre du réseau de stations météorologiques du LGGRM. Les accès à l'amont et l'aval du cours d'eau sont relativement faciles. En effet, des chemins ont été construits au sommet pour trois raisons : l'installation d'une antenne de réseau cellulaire, le passage d'une ligne électrique d'Hydro-Québec et l'exploitation forestière. Le cône alluvial de la coulée à Layoutte s'étend jusqu'à la rivière Mont-Saint-Pierre où le banc de confluence est en constante croissance à cause de l'apport sédimentaire du cours d'eau.

CHAPITRE 1

SEUILS DE PRÉCIPITATIONS, VARIABILITÉ SPATIOTEMPORELLE ET TENDANCES CLIMATIQUES DANS LES PLUIES TORRENTIELLES EN HAUTE-GASPÉSIE, QUÉBEC

1.1 RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DU PREMIER ARTICLE

L'article intitulé « Seuils de précipitations, variabilité spatio-temporelle et tendances climatiques dans les pluies torrentielles en Haute-Gaspésie, Québec » a été accepté pour publication et présentation dans le cadre de la conférence Géorisques 8 organisée par la société canadienne de géotechnique ayant eu lieu à Québec en juin 2022. Comme premier auteur, j'ai effectué la revue de littérature, les analyses et produit les résultats. Les professeurs Thomas Buffin-Bélanger, Francis Gauthier et Bernard Héту ont révisé l'article pour y apporter des corrections pertinentes et nécessaires pour améliorer la clarté du propos avant la soumission finale. Les résultats ont été présentés à la conférence et l'article publié dans le compte-rendu en plus de figurer comme chapitre à part entière dans un rapport remis au Ministère des Transports du Québec produit par le Laboratoire de Géomorphologie et de Gestion des Risques en Montagne sur l'effet des changements climatiques sur le déclenchement d'aléas hydrogéomorphologiques liés aux paramètres hydrométéorologiques dans le nord de la Gaspésie.

1.2 SEUILS DE PRÉCIPITATIONS, VARIABILITÉ SPATIOTEMPORELLE ET TENDANCES CLIMATIQUES DANS LES PLUIES TORRENTIELLES EN HAUTE-GASPÉSIE, QUÉBEC

1.2.1 Introduction

Les précipitations de forte intensité, aussi appelées pluies torrentielles, représentent la principale cause des crues soudaines (Davis 2001; Borga et al. 2014), des coulées de débris (Crosta et Frattini 2001; Borga et al. 2014) et des glissements de terrain (Crosta et Frattini 2001; Guzzetti et al. 2007) en milieu montagneux. Ces aléas mettent en péril la sécurité des personnes et causent des dégâts aux infrastructures, notamment les routes longeant les versants et traversant les cours d'eau réactifs.

Depuis quarante ans, en Haute-Gaspésie, un grand nombre d'événements de pluie ont provoqué des crues torrentielles suffisamment intenses pour causer des dégâts substantiels. La majorité de ces événements ont été causés par le passage de cyclones tropicaux, comme Arthur (2014), Dorian (2019) et Ida (2021) ou par des systèmes convectifs intenses et de courte durée. On peut supposer avec quasi-certitude que la fréquence et l'intensité des plus importants cyclones (catégories 4 et 5) de l'Atlantique Nord ont augmenté depuis les années 1970 (Goldenberg et al. 2001; Vimont et Kossin 2007; M. E. Mann et Emanuel 2006; Saunders et Lea 2008).

Dans une perspective de changements climatiques où l'intensité et la fréquence des cyclones sont en augmentation, il est probable que les précipitations nécessaires pour déclencher les aléas hydrogéomorphologiques (HGM) se produisent plus fréquemment dans le futur. De plus, d'ici 2100, des changements significatifs pourraient survenir dans le patron spatial des précipitations. En effet, Hayhoe et al. (2008) estiment que la portion nord du nord-est des États-Unis (de la Pennsylvanie au Maine) sera moins arrosée de 50 à 100 mm durant l'été entre 1990 et 2100. En revanche, la portion sud de cette région recevrait plus de précipitations. Une intensification des événements de précipitations en milieu côtier et une diminution de l'intensité des événements à l'intérieur des terres sont aussi probables (Hayhoe et al. 2008). Les changements dans les conditions hydroclimatiques affecteraient le cycle de

l'eau au point où les événements de précipitations extrêmes seraient d'une intensité inégalée avec les conditions climatiques actuelles (Giorgi et al. 2019). Les jeux de données de précipitations issues de projections climatiques sont normalement basés sur les scénarios Representative Concentration Pathway (RCP) du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). La majorité des données montrent que les extrêmes quotidiens augmentent qu'on utilise le scénario RCP 4.5 ou 8.5 des modèles CMIP5 pour les États-Unis, avec une hausse plus marquée pour RCP 8.5 (Lopez-Cantu et al. 2020).

Pour permettre aux autorités d'agir quand le risque pour la population et les infrastructures est élevé, des seuils intensité – durée ont été proposés pour identifier les événements pouvant causer des glissements de terrain superficiels (Guzzetti et al. 2007; Crosta et Frattini 2001), des coulées de débris (Innes 1983) ou les deux à la fois (Caine 1980; Guzzetti et al. 2008) à différentes échelles spatiales. Ces seuils sont définis par l'intensité moyenne (mm/h) et la durée (h) des événements de pluie. Les seuils développés pour une échelle spatiale globale ont tendance à être plus bas que les seuils régionaux ou locaux (Guzzetti et al. 2007). Toutefois, les seuils établis dans une région donnée peuvent difficilement être transposés à une autre région compte tenu de la variabilité interrégionale dans la météo, le climat et les différences morphologiques et lithologiques (Guzzetti et al. 2007). Là où des données de précipitations horaires ne sont pas disponibles, des seuils prenant en compte le total des précipitations et la durée en jours peuvent être utilisés (Leonarduzzi et al. 2017). La distance entre l'aléa HGM et la station où les précipitations sont enregistrées doit être prise en considération dans l'identification des seuils de déclenchement. Une distance optimale inférieure à 10 km a été proposée par Vaz et al. (2018) pour la région de Lisbonne. Ils soutiennent toutefois que cette distance pourrait être étendue à 50 km en conservant un niveau de confiance acceptable. Ces valeurs sont influencées par les conditions climatiques et physiographiques et sont donc propres à la région étudiée. Elles donnent cependant une idée de l'ordre de grandeur de la distance à considérer.

Puisqu'il existe une variabilité spatiotemporelle dans les données de précipitations, l'utilisation d'un pluviomètre unique entraîne généralement une sous-estimation dans les

mesures (Syed et al. 2003). Il importe donc d'obtenir des données fiables et distribuées dans l'espace pour limiter l'incertitude associée à cette variabilité, surtout que les zones les plus arrosées sont souvent associées aux points d'initiation des coulées de débris (Marra et al. 2016). L'utilisation d'un réseau de plusieurs stations n'est toutefois pas gage de succès, puisque la variabilité spatiale reste considérable, même à une échelle inférieure à 5 km² (Krajewski et al. 2003; Ciach et Krajewski 2006). Enfin, la qualité des seuils déclencheurs est affectée par la non-stationnarité des données de précipitations qui entraîne une sous-estimation dans les mesures effectuées par un pluviomètre (Marra et al. 2017).

Les objectifs de cette publication sont de (1) proposer des seuils de déclenchement des aléas HGM pour le nord de la Gaspésie, (2) discuter de l'effet de la variabilité spatiotemporelle des précipitations sur la capacité prédictive des événements torrentiels, et (3) discuter de l'effet des changements climatiques sur la fréquence, l'intensité et la durée des pluies torrentielles.

1.2.2 Territoire à l'étude

Le territoire nord-gaspésien est formé d'un littoral dynamique et d'une succession de vallées et de plateaux aux altitudes modestes (0-400 m) façonnés par les dernières glaciations (Hétu et Gray 1985; 2000). Les fortes pentes des bassins-versants et la distribution de sources importantes de sédiments rendent les cours d'eau des vallées principales et de leurs tributaires particulièrement sensibles aux aléas hydrométéorologiques (Maltais et al. 2022).

Le climat y est contrasté en raison de l'influence des masses d'air provenant de l'arctique et des dépressions remontant la côte est américaine (Hétu et Vandelac 1989). L'influence maritime sur le climat y est également non négligeable. Les étés y sont habituellement chauds et les hivers froids (Fortin et al. 2015). Les précipitations sont importantes tout au long de l'année, généralement solides entre novembre et avril et liquides entre mai et octobre (Hétu et Vandelac 1989). La Figure 7 présente les stations météorologiques du MELCCFP et d'Environnement Canada en plus de celles du Laboratoire

de Géomorphologie et de Gestion des Risques en Montagne (LGGRM). Ces deux réseaux de stations permettent d'effectuer des analyses à l'échelle régionale et locale respectivement.

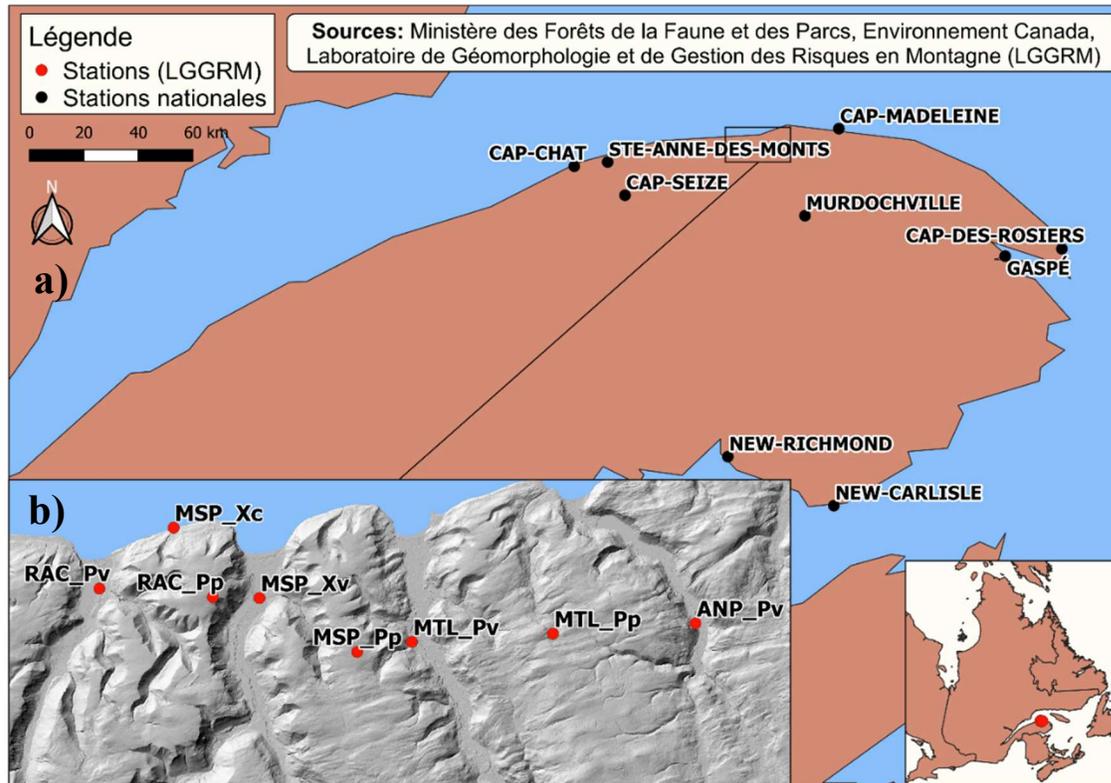


Figure 7. Carte de localisation des stations météorologiques des réseaux nationaux (Environnement Canada et MELCCFP) (a) et du LGGRM (b)

1.2.3 Les événements de pluies torrentielles

Un inventaire des événements torrentiels ayant causé des aléas HGM dans le nord de la Gaspésie a été effectué entre 1979 et 2008 (Fortin et al. 2015). Le LGGRM a pris le relais depuis 2009 pour mettre sur pied une base de données des événements torrentiels connus pour avoir causé ces aléas (Tableau 1). Les données de précipitations figurant dans le tableau sont celles enregistrées à la station météorologique la plus près, soit celle de Cap-Madeleine. Les aléas ont été identifiés lors de visites sur le terrain pendant et après les événements.

Tableau 1

Événements torrentiels connus et aléas hydrogéomorphologiques observés (vert=oui, rouge=non, gris=?) (CD=coulée de débris, GT=glissement de terrain, AT=activité torrentielle (cône), IR=inondation en rivière). Les données de précipitations proviennent de la station de Cap-Madeleine.

Dates	Type de système	Total (mm)	Durée (h)	Intensité moy (mm/h)	Intensité max (mm/h)	Aléas HGM			
						C D	G T	A T	I R
1979/08		54,9	16	3,4	8,4	Vert	Vert	Gris	Gris
1980/07	Dépression (système régional)	117,9	38	3,1	11,0	Vert	Vert	Vert	Vert
1991/06		66,4	30	2,21	6,6	Vert	Vert	Gris	Gris
1993/06		41,8	19	2,2	6,2	Vert	Gris	Gris	Gris
1998/06	Orage (système convectif)	40,0	4	10,0	29,7	Vert	Vert	Gris	Gris
2002/08		76,1	15	5,1	12,1	Vert	Gris	Vert	Vert
2007/08		114,3	16	7,14	18,6	Vert	Vert	Vert	Vert
2009/06	Orage (système convectif)	53,0	5	10,6	28,1	Vert	Rouge	Rouge	Rouge
2014/07	Tempête post- tropicale (Arthur)	73,2	53	1,4	10,7	Vert	Vert	Vert	Rouge
2015/04	Pluie printanière	88,5	143	0,6	3,5	Vert	Vert	Vert	Vert
2019/09	Tempête post- tropicale (Dorian)	38,9	17	2,3	5,8	Vert	Vert	Vert	Rouge
2021/09	Tempête post- tropicale (Ida)	65,0	54	1,2	4,0	Vert	Vert	Gris	Vert

1.2.3.1 Seuils de déclenchement

Les événements identifiés dans le Tableau 1 permettent de paramétrer des équations à deux variables déterminant des seuils au-delà desquels ce type d'événement peut survenir. Compte tenu du faible nombre d'occurrences (12), il est difficile de paramétrer l'équation de ces seuils objectivement, aussi elles ont été estimées et ajustées visuellement. Deux seuils de précipitations sont proposés et estimés à partir des données de pluie de la station météorologique de Cap-Madeleine (Environnement Canada) : de 1967 à 2021 pour les données horaires et de 1882 à 2021 pour les données journalières. Pour les données horaires, les événements de pluie sont séparés par douze heures consécutives sans précipitations. Pour les données quotidiennes, il s'agit plutôt d'au moins une journée non-arrosée.

Le premier seuil proposé en est un d'intensité-durée (ID) ayant la même structure que ceux développés par Caine (1980), Innes (1983) et Guzzetti et al. (2008). Comme ces derniers ont été calculés à l'échelle régionale ou globale dans différentes régions du monde, aucun d'entre eux ne correspond aux conditions météorologiques et climatiques du nord de la Gaspésie (Figure 8). Les paramètres du seuil ID proposé sont l'intensité moyenne (I_{moy}) en mm/h et la durée (D_h) en heure :

$$I_{moy} = 10.5D_h^{-0.58}$$

Le seuil ID a été tracé en fonction des événements connus, mais il est possible de voir sur la Figure 8 que plusieurs l'ont surpassé. Puisqu'il n'était pas toujours possible de se déplacer pour constater les aléas HGM potentiels des événements torrentiels, il est possible que plusieurs d'entre eux aient causé des dégâts substantiels sans qu'ils ne figurent dans l'inventaire du Tableau 1.

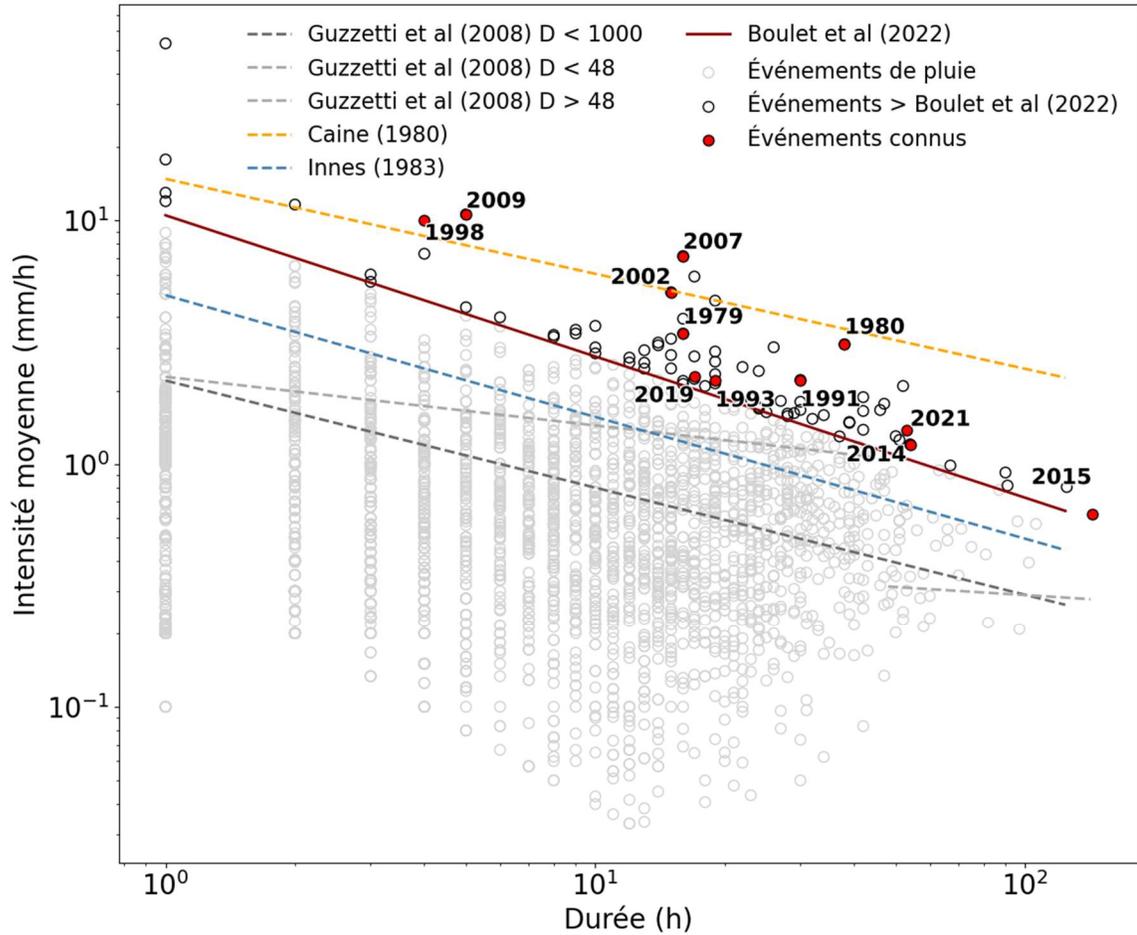


Figure 8. Seuils Intensité – Durée (ID) des précipitations issus de la littérature et seuil proposé pour les données horaires de la station météorologique de Cap-Madeleine

Le deuxième seuil proposé a pour avantage d'utiliser des données de précipitations quotidiennes. Par conséquent, il peut être appliqué partout où une station météorologique est munie d'un pluviomètre, même si les données qu'il mesure sont journalières. La Figure 9 présente le seuil total-durée (TD) proposé. Les paramètres de l'équation de la droite du seuil sont les précipitations totales (P_{mm}) en mm et la durée de l'événement de pluie en jours (D_j) :

$$P_{mm} = 9.5D_j + 18$$

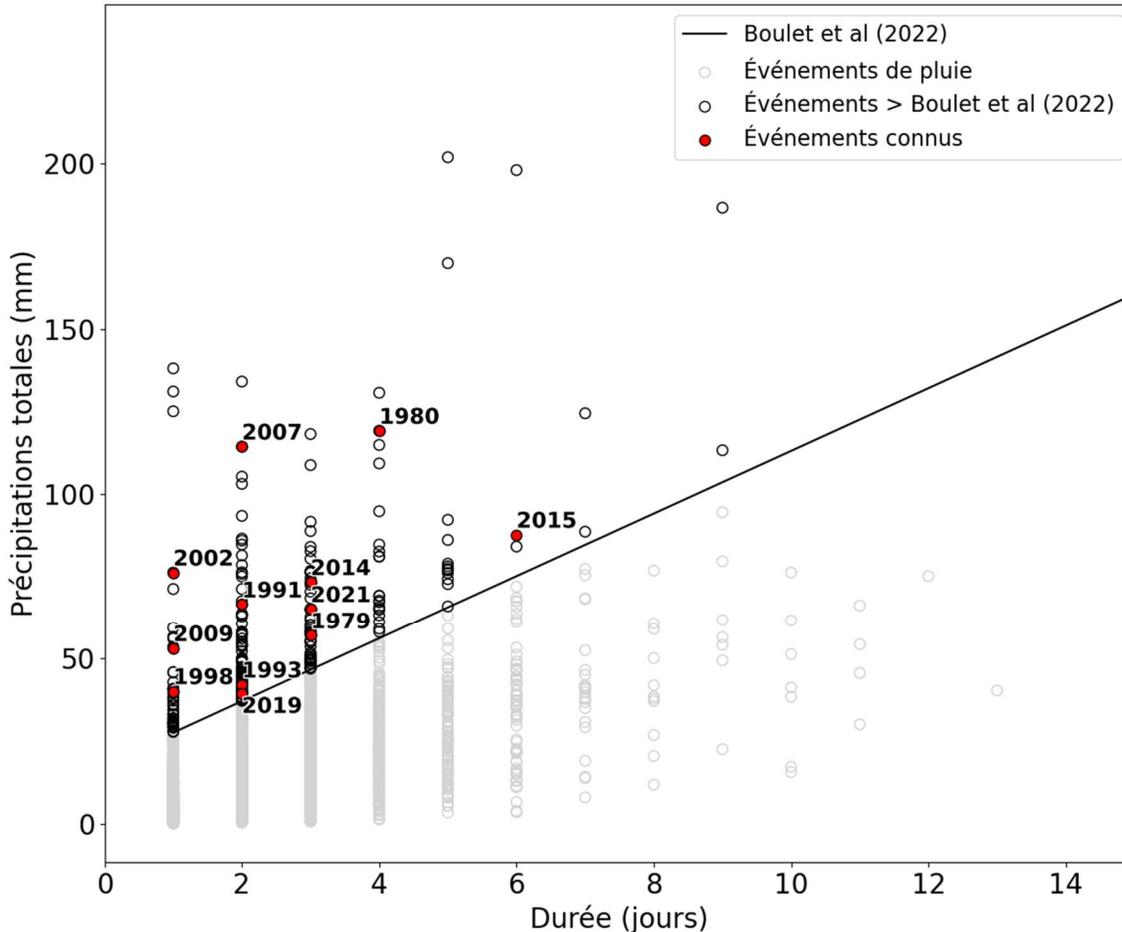


Figure 9. Seuil Total – Durée (TD) des précipitations proposé pour les données quotidiennes de la station météorologique de Cap-Madeleine

En utilisant des données quotidiennes, il est évident que la perte de résolution temporelle a un effet sur la définition du seuil, particulièrement pour les événements de courte durée, comme les systèmes convectifs provoquant des orages. Néanmoins, la versatilité de ce type de seuil le rend pertinent pour les endroits où un seuil ID ne peut être appliqué.

1.2.3.2 Variabilité spatiotemporelle des pluies

Depuis 2018, le LGGRM a déployé un réseau de 8 stations météorologiques munies de pluviomètres : quatre en vallée, une sur la côte et trois sur les plateaux (Figure 7). Ces stations enregistrent des données de pluie ($\Delta 15$ min) de la mi-avril à la mi-novembre. Ce réseau de

stations, combiné aux réseaux nationaux, a permis l'analyse de la répartition spatiotemporelle des pluies pendant la tempête post-tropicale Ida (Figure 10).

Toute la Gaspésie a été arrosée par la tempête post-tropicale Ida. Toutefois, certains secteurs ont enregistré des précipitations plus importantes que d'autres. C'est le cas notamment de Rivière-à-Claude, Mont-Saint-Pierre, Mont-Louis et L'Anse-Pleureuse, où les précipitations enregistrées ont atteint 200 mm comparativement aux stations d'Environnement Canada, où les valeurs se situent entre 34 et 76 mm.

Les systèmes régionaux, comme les tempêtes post-tropicales qui remontent la côte est de l'Amérique du Nord, sont relativement prévisibles et touchent un grand territoire. Ce n'est toutefois pas le cas des systèmes convectifs causant des orages de courte durée, souvent très localisés. Celui du 27 juin 2009 était particulièrement intense. Cet été-là, un pluviomètre temporaire avait été installé à Mont-Saint-Pierre et a permis de mesurer les précipitations. La Figure 11 présente l'impact de la résolution temporelle des données de précipitations sur l'intensité mesurée lors de l'orage et les précipitations enregistrées à Mont-Saint-Pierre et dans les deux stations d'Environnement Canada les plus près. En 24 heures, deux orages sont survenus à Mont-Saint-Pierre. Le premier a été mesuré en simultané à Mont-Saint-Pierre et Cap-Madeleine, mais le deuxième semble modeste à Cap-Chat et inexistant à Cap-Madeleine. Cet événement est important d'abord parce que plus de 40 mm de pluie ont été enregistrés en trente minutes durant le pic d'intensité, puis parce que l'événement a causé des coulées de débris dans le nord de la Gaspésie (Tableau 1).

Puisque le seuil ID est développé à partir de l'intensité et de la durée, il est intéressant de constater l'effet de la résolution temporelle des données sur l'intensité. Pour cet événement, l'intensité maximale enregistrée pour chacune des résolutions est de 132 mm/h ($\Delta 1\text{min}$), 77 mm/h ($\Delta 15\text{min}$) et 52 mm/h ($\Delta 60\text{min}$). Le déclenchement des aléas HGM par les précipitations dépend de l'interception de l'eau par la végétation et du taux d'infiltration dans le sol. Plus l'intensité est élevée, moins la proportion de l'eau captée par la végétation sera grande (Keim et al. 2006) et plus il y aura de ruissellement (Dunne et al. 1991). Aussi,

un événement à intensité variable a tendance à mobiliser plus de sédiments que lorsqu'elle reste constante (Parsons et Stone 2006).

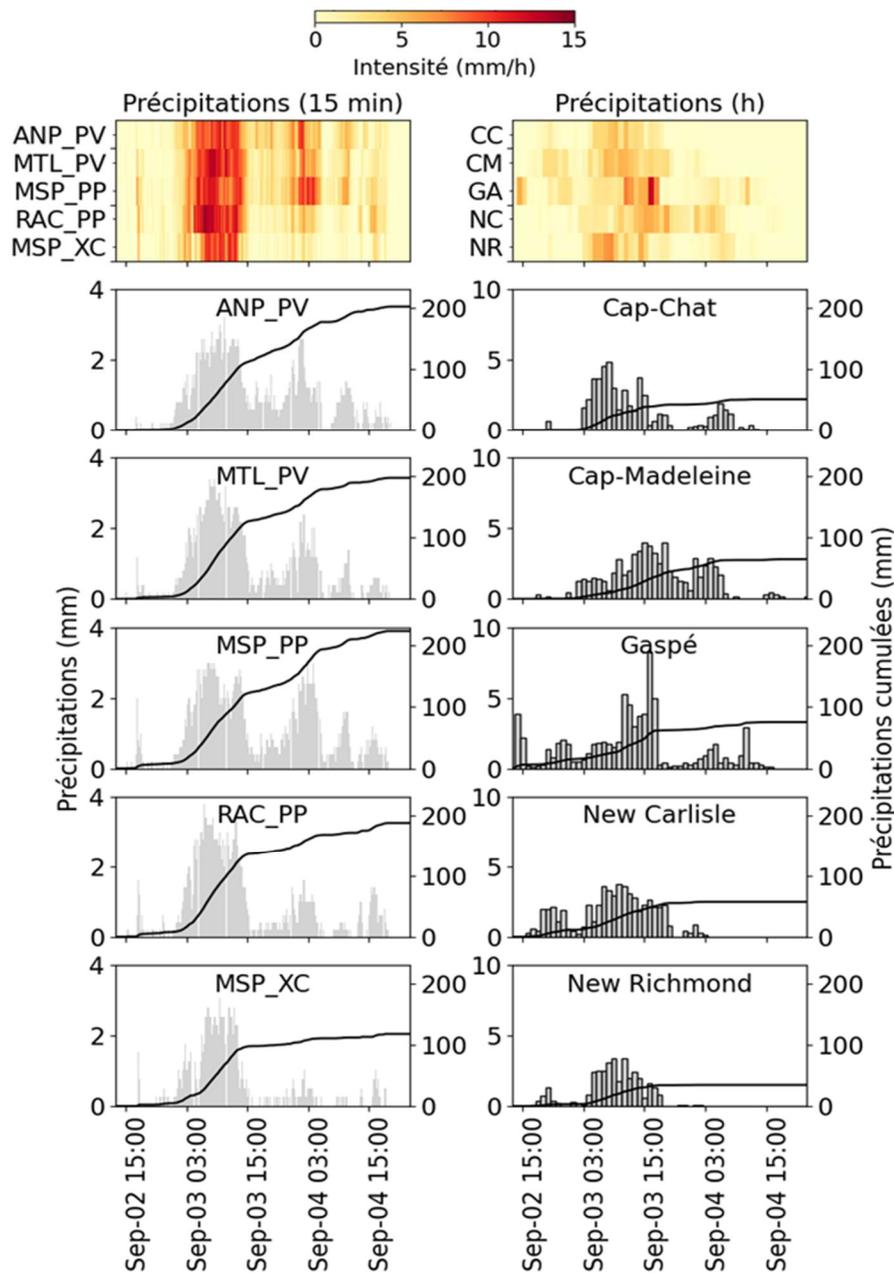


Figure 10. Variabilité spatiale des précipitations associées à la tempête post-tropicale Ida sur deux échelles spatiales (locale, régionale) et temporelles (15 min, 1 heure). Les données horaires proviennent des stations de Cap-Chat (CC), Cap-Madeleine (CM), Gaspé (GA), New Carlisle (NC) et New Richmond (NR).

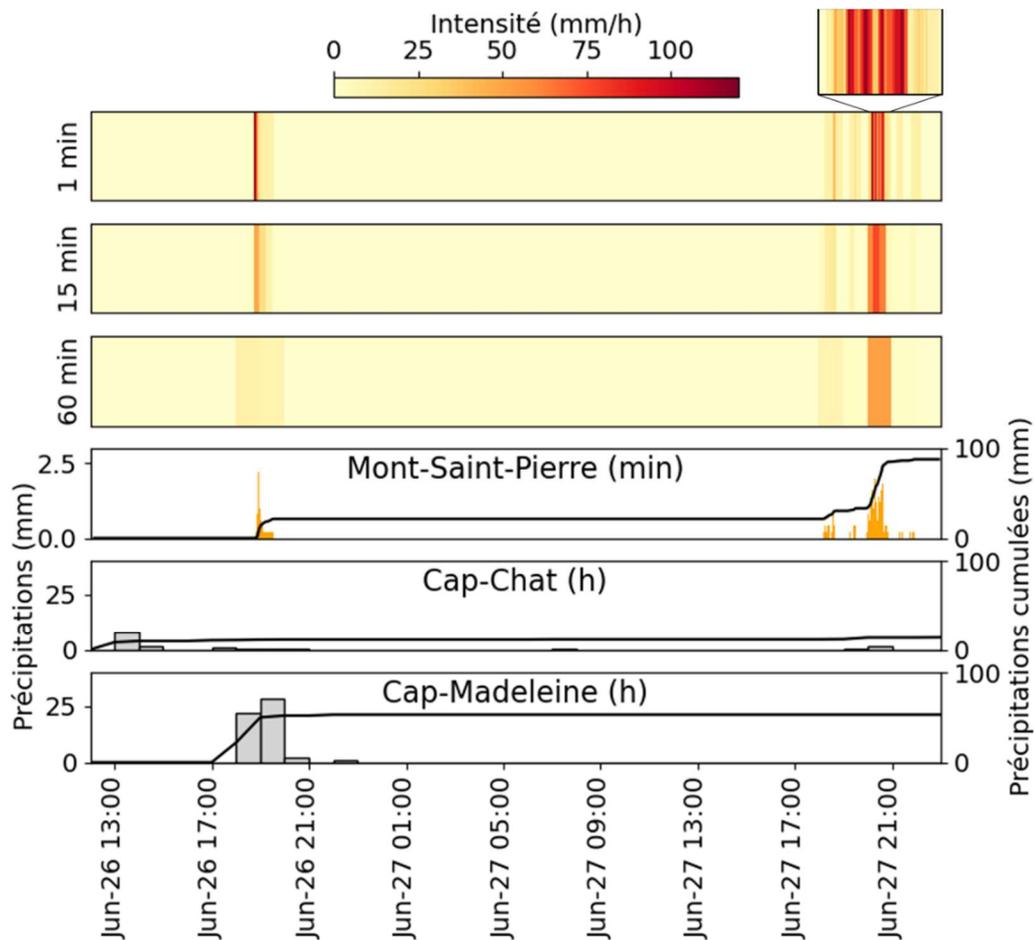


Figure 11. Variabilité dans les précipitations de l'orage de juin 2009. Intensité vs résolution temporelle (a) et précipitations mesurées (b)

Les seuils ID et TD devraient être utilisés pour les précipitations causées par les systèmes régionaux. La raison principale est qu'ils sont observables sur un grand territoire. De plus, la durée de ces événements est suffisamment longue et leur intensité assez constante pour que des données horaires soient adéquates pour développer et utiliser les seuils. Pour les événements de forte intensité, comme les orages convectifs, il est nécessaire de les mesurer sur un pas de temps court ($\Delta 15\text{min}$) pour obtenir une valeur représentative de l'événement. Évidemment, le seuil TD ne peut être utilisé pour ces derniers considérant la résolution temporelle des données utilisées ($\Delta 1\text{j}$).

1.2.3.3 Tendances 1967-2021 et 1882-2021

L'intérêt des analyses présentées est d'améliorer la capacité prédictive et la gestion des événements extrêmes. Ainsi, à l'aide des données des événements de précipitation, il a été permis d'extraire les événements surpassant les seuils ID et TD à partir de leur base de données respective. À l'exception du nombre d'événements et des régressions linéaires, les statistiques d'événements ont été regroupées par décennies.

Des tests de Mann-Kendall (H. B. Mann 1945; Kendall 1948) et des régressions linéaires ont été effectués sur chacune des variables pour extraire les tendances statistiquement significatives (Figure 12, Tableau 2). Ces analyses révèlent que seul le total des précipitations présente une hausse statistiquement significative de 14 mm entre 1971 et 2020 pour les événements de pluie surpassant le seuil ID.

Tableau 2

Variations par décennie et totales calculées à partir des pentes de régression linéaire pour les paramètres illustrés dans les Figure 12 et Figure 13

Variable	1971-2020 (h)		1882-2020 (j)	
	\bar{x} par 10 ans	1971-2020	\bar{x} par 10 ans	1882-2020
Durée (h j)	6,01	30,1	0,06	0,84
Total (mm)	2,80*	14,0	1,41**	19,70
Intensité moyenne (mm/h)	0,38	1,90	---	---
Intensité maximale (mm/h)	0,80	4,00	---	---
Fréquence (n)	0,07	0,35	0,02	0,28

pvalue Mann-Kendall < *0,05 | **0,01

Pour ce qui est des données quotidiennes, la Figure 13 illustre les tendances entre 1882 et 2020. De celles-ci, la durée et les précipitations totales sont statistiquement significatives. Une hausse de la durée des événements de 0,84 jour entre 1882 et 2020 est observée pour les

événements de pluie surpassant le seuil TD (Tableau 2). Aussi, le total des précipitations par événement a augmenté de 19,7 mm au cours de la même période.

Pour les deux bases de données, l'augmentation dans les précipitations totales par événement en plus de la hausse de la durée (j) des événements entre 1882 et 2020 pourraient être expliquées par l'effet des changements climatiques sur les événements extrêmes de précipitations.

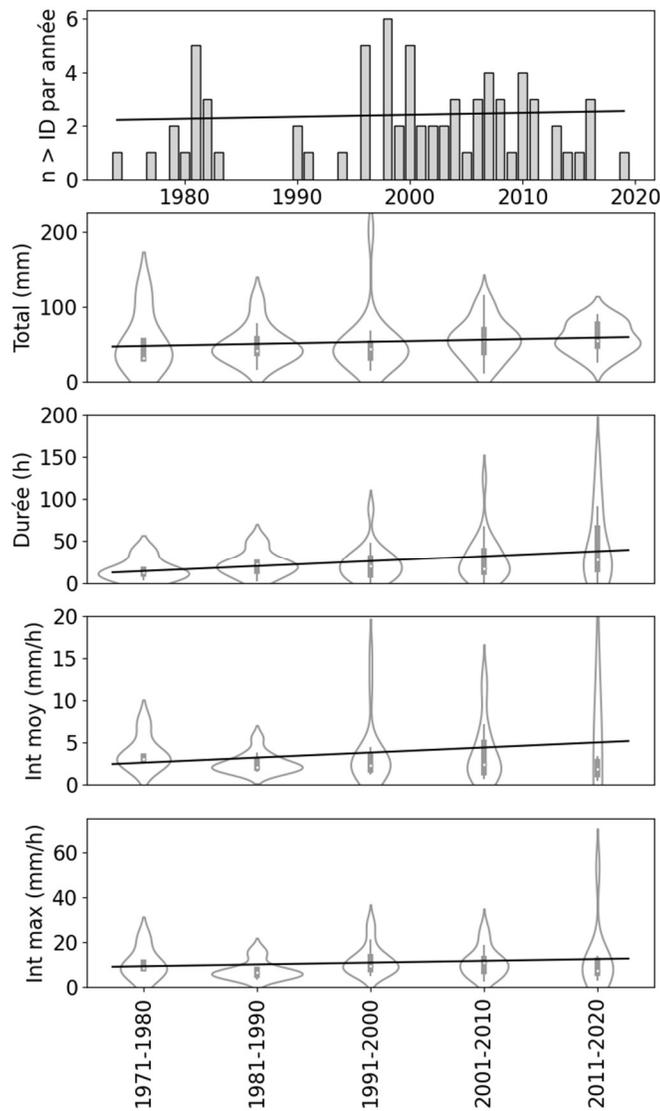


Figure 12. Tendances dans les données horaires enregistrées à la station de Cap-Madeleine (1971-2020) pour les événements surpassant le seuil ID proposé

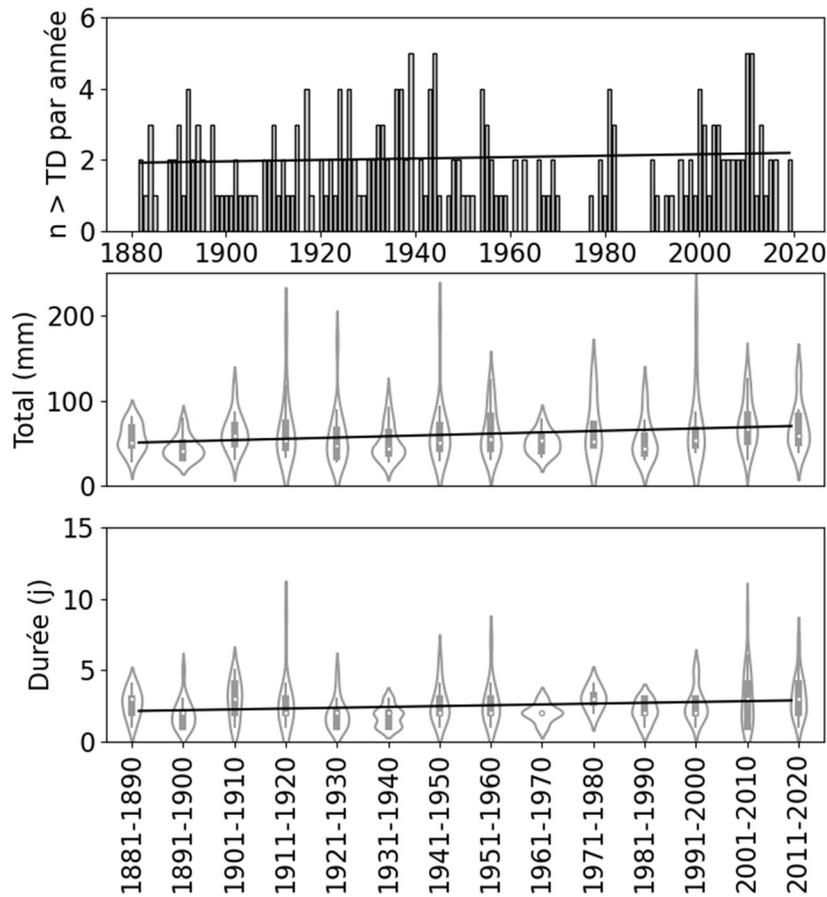


Figure 13. Tendances dans les données quotidiennes enregistrées à la station de Cap-Madeleine (1882-2020) pour les événements surpassant le seuil TD proposé

1.2.4 Tendances et projections climatiques

Pour évaluer si les tendances dans les données des projections climatiques sont les mêmes, les données de précipitations horaires du modèle CanRCM4 au Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment nord-américain (NA-CORDEX) (Mearns et al. 2017) ont été téléchargées pour les scénarios RCP 4.5 et 8.5 du GIEC pour cinq points de la grille nam-44 (Figure 14).

Une base de données des événements de précipitations a été montée de la même façon qu'avec les données de Cap-Madeleine : deux événements de pluie sont séparés par douze heures sans précipitations. Aussi, les données inférieures à 0,254 mm pour une heure ont été

remplacées par la valeur 0 pour faciliter cette délimitation. Les événements de précipitations surpassant les seuils pour chacun des cinq points ont été rassemblés dans une même base de données pour les analyses.

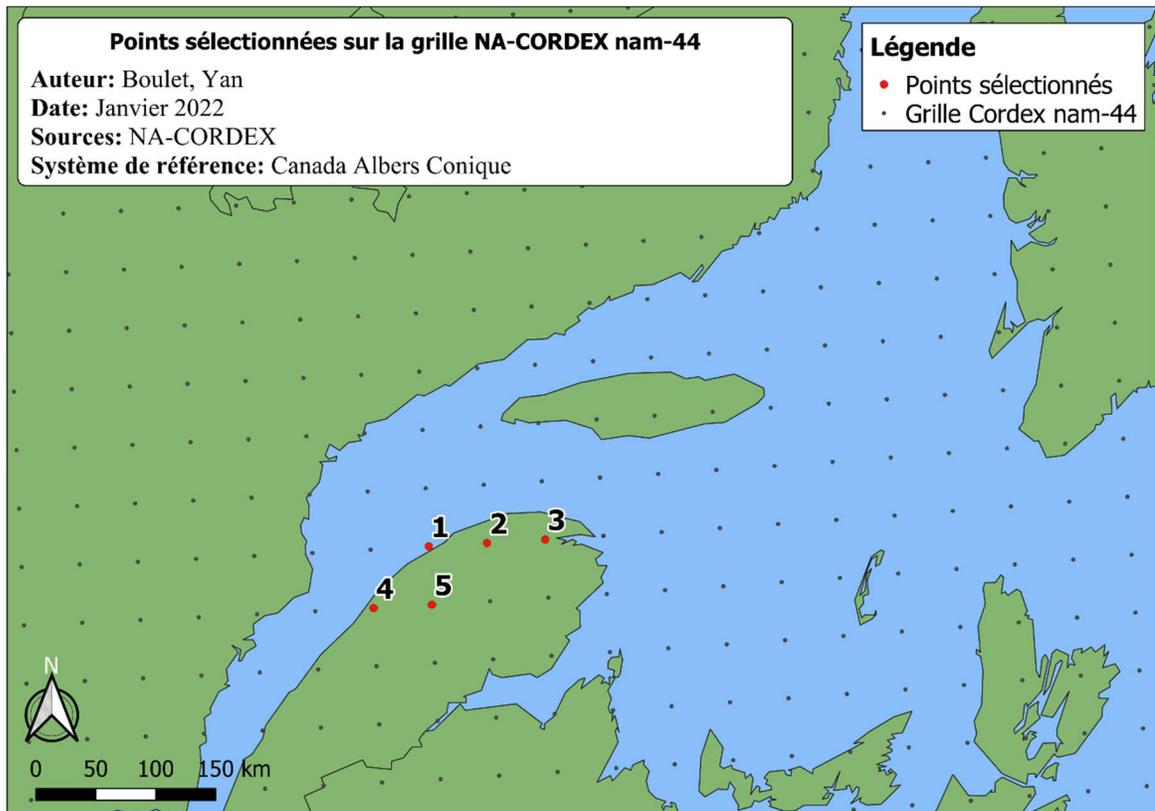


Figure 14. Carte de la grille nam-44 utilisée par NA-CORDEX et les cinq points sélectionnés pour les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5 du GIEC

La Figure 15 présente les tendances observées dans les précipitations horaires entre 2011 et 2100 pour les événements surpassant le seuil ID. Le Tableau 3 présente les taux de variation par décennie et pour l'entièreté de la couverture temporelle des projections. Dans les deux scénarios RCP, la hausse de la fréquence des événements est statistiquement significative. Il surviendrait plus du double d'événements surpassant le seuil ID par année d'ici 2100, peu importe lequel des scénarios est utilisé. Dans le cas du RCP 8.5, une hausse marquée de 3,78 mm/h de l'intensité maximale des événements est aussi à prévoir entre 2011 et 2100.

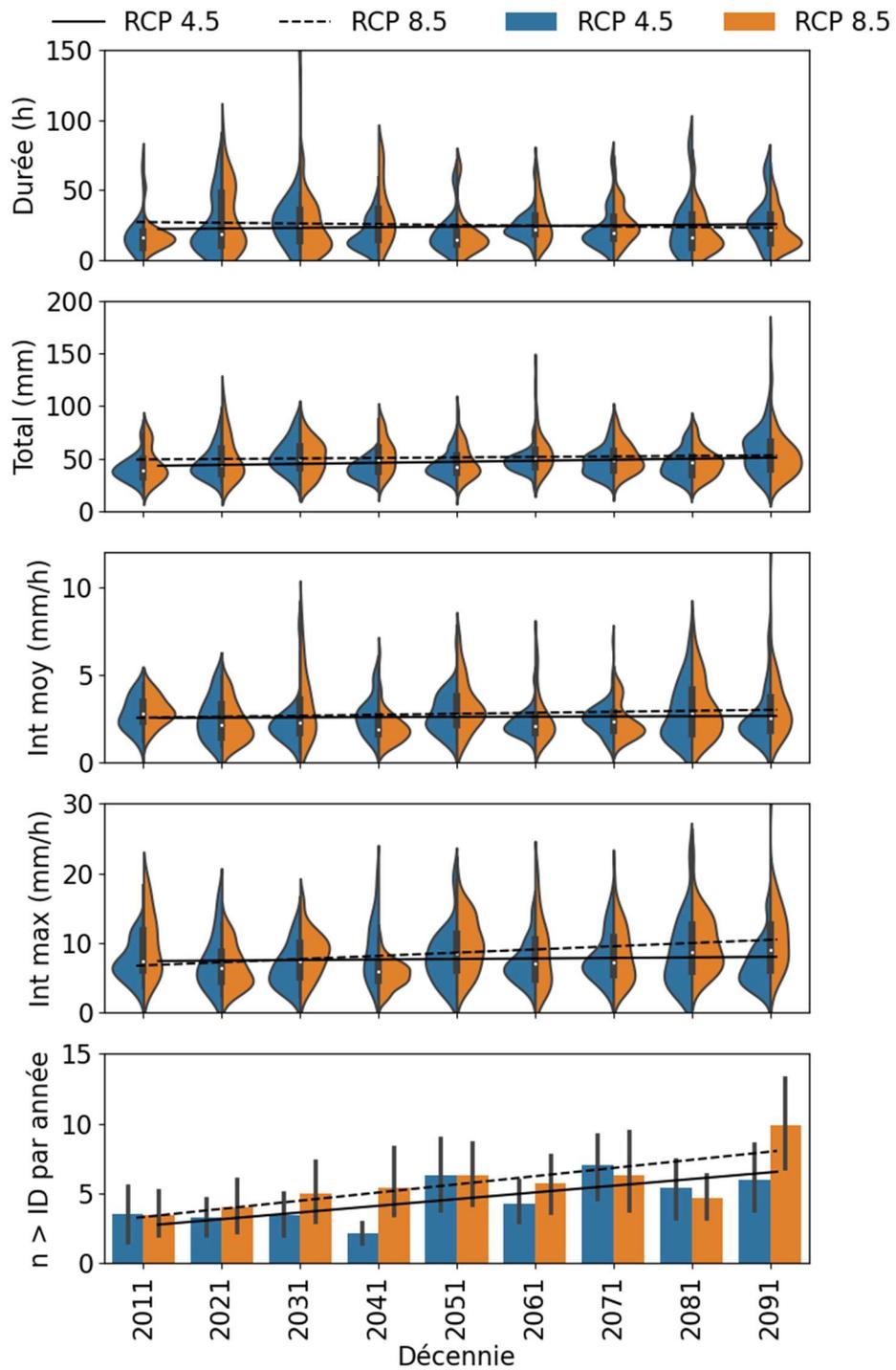


Figure 15. Variation des paramètres des événements surpassant le seuil ID proposé pour les données de projection de 2010 à 2100

Tableau 3

Variations par décennie et totales calculées à partir des pentes de régression linéaire pour les paramètres illustrés dans la Figure 15

Variable	RCP 4.5		RCP 8.5	
	\bar{x} par 10 ans	2011-2100	\bar{x} par 10 ans	2011-2100
Durée (h)	0,40	3,60	-0,48	-4,32
Total (mm)	0,90	8,10	0,45	4,05
Intensité moyenne (mm/h)	0,01	0,12	0,05	0,47
Intensité maximale (mm/h)	0,07	0,63	0,42*	3,78
Fréquence (n)	0,44**	3,96	0,54**	4,86

pvalue Mann-Kendall < *0,05 | **0,01

Les données horaires ont également été transformées en données quotidiennes pour effectuer la même analyse pour les événements surpassant le seuil TD (Figure 16). Dans ce cas, les événements de précipitations sont séparés par une journée non arrosée. Pour les deux scénarios du GIEC, une hausse importante de la fréquence des événements surpassant le seuil TD est observée (Tableau 4). La fréquence pour la décennie 2011-2020 se situe entre 2,5 et 3 pour les deux scénarios. Selon la courbe de régression linéaire, celle-ci augmenterait de 3,5 pour RCP 4.5 et de 4.59 pour RCP 8.5 à la décennie 2091-2100.

Tableau 4

Variations par décennie et totales calculées à partir des pentes de régression linéaire pour les paramètres illustrés dans la figure 12

Variable	RCP 4.5		RCP 8.5	
	par 10 ans	2011-2100	par 10 ans	2011-2100
Durée (j)	0,017	0,15	0,013	0,12
Total (mm)	0,91	8,19	0,80	7,20
Fréquence (n)	0,39*	3,51	0,51*	4,59

pvalue Mann-Kendall < *0,05

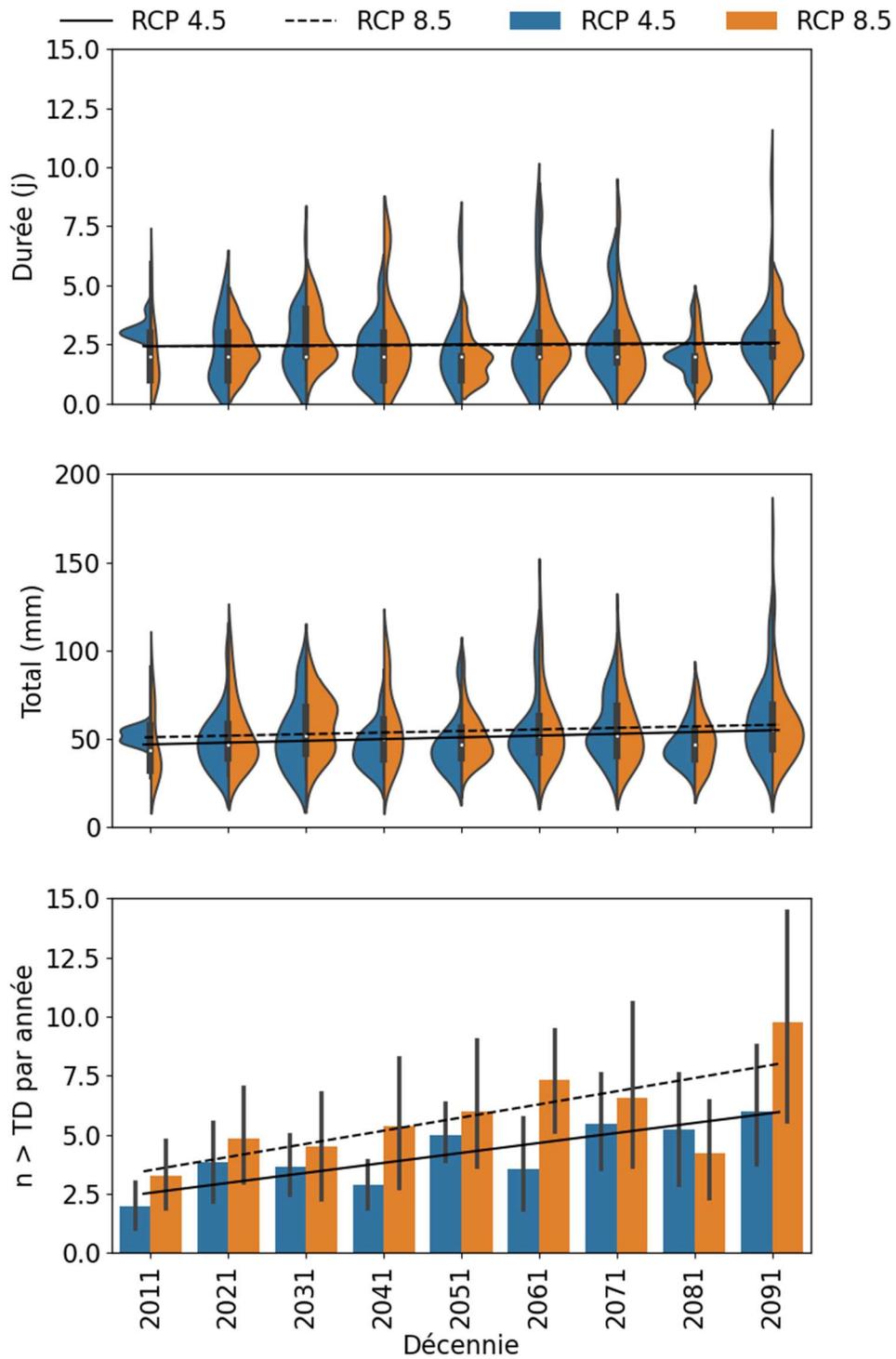


Figure 16. Variation des paramètres des événements surpassant le seuil TD proposé pour les données de projection de 2010 à 2100

1.2.5 Conclusion

La première partie de ce travail a permis de proposer des seuils de déclenchement d'aléas HGM adaptés au nord de la Gaspésie. La deuxième partie analyse les tendances séculaires à partir des données de la station de Cap-Madeleine. Elle met en évidence une augmentation de la durée et du total des précipitations lors d'événements extrêmes depuis la fin du 19^e siècle. Enfin, la dernière partie révèle que le nombre d'événements extrêmes sera en forte hausse à l'horizon de 2100.

Les seuils et les tendances observés pourront servir à limiter les impacts négatifs sur les résidents et les infrastructures en permettant aux autorités d'agir en amont des événements extrêmes pour avertir et protéger la population. Compte tenu de la variabilité spatiotemporelle des précipitations, ils ne peuvent être utilisés pour les événements de très forte intensité et de courte durée. La hausse de la fréquence des événements torrentiels surpassant les seuils proposés d'ici 2100 rend nécessaires la modification des schémas d'aménagement et l'adaptation des infrastructures pour protéger les résidents des aléas qui en découlent. La pertinence des données de projection climatique n'est pas de prévoir quand un événement extrême pourrait survenir. Toutefois, on peut en extraire des tendances qui permettent d'adapter la réponse des autorités face aux problèmes causés par les événements torrentiels. Puisque la fréquence des événements surpassant les deux seuils augmente de plus du double, il serait pertinent de le prendre en compte lors de la conception d'infrastructures (routes, ponts, ponceaux), que ce soit pour la restauration ou la construction nouvelle, ainsi que dans les schémas d'aménagement (cônes alluviaux, zones inondables). En effet, les problèmes associés aux infrastructures dysfonctionnelles peuvent aggraver le problème des crues torrentielles. Si un pont est emporté ou qu'un ponceau se comble de sédiments causant un refoulement de l'eau, et que la route qui y passait était le seul accès des résidents aux services essentiels, un événement torrentiel pourrait devenir catastrophique (Buffin-Bélanger et Héту 2008). Il importe aussi d'adapter les cartographies des zones inondables pour tenir compte des aléas HGM liés à ces événements (Maltais et al. 2022). Les probabilités que

surviennent ce type d'aléas augmenteront si les événements torrentiels sont plus fréquents, comme les données de projection semblent le montrer.

Comme les précipitations sont complexes à modéliser, il serait pertinent de combiner plusieurs modèles climatiques pour améliorer la robustesse des analyses liées aux projections, surtout que les tendances observées ne sont pas les mêmes dans les données mesurées et dans les projections climatiques. De plus, il serait intéressant d'intégrer les conditions antécédentes pour tenir compte de la teneur en eau du sol lors du déclenchement des aléas, comme l'ont fait Glade et al. (2000) et Leonarduzzi et Molnar (2020) pour améliorer la qualité des seuils proposés.

CHAPITRE 2

IMPACTS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LA RÉPONSE DES PETITS COURS D’EAU DU NORD DE LA GASPÉSIE

2.1 RÉSUMÉ EN FRANÇAIS DU DEUXIÈME ARTICLE

L'article intitulé « Impacts des changements climatiques sur la réponse des petits cours d'eau du nord de la Gaspésie » a été rédigé comme suite logique au premier article. Comme premier auteur, j'ai effectué la recension des écrits, planifié et réalisé les campagnes de terrain, produit les analyses de données et développé le modèle conceptuel. Les professeurs Thomas Buffin-Bélanger et Francis Gauthier ont participé aux discussions entourant la réalisation du projet et ont révisé l'article pour en améliorer la pertinence et le positionnement. Une publication est possible et envisagée, même si la démarche n'a pas encore été entamée.

2.2 IMPACTS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LA RÉPONSE DES PETITS COURS D’EAU DU NORD DE LA GASPÉSIE

2.2.1 Introduction

Bien que les inondations en plaines inondables des grandes rivières retiennent le plus d’attention compte tenu des enjeux et du nombre de personnes affectées, d’autres types d’inondations survenant dans les cours d’eau de tête posent un risque pour la population (Dumont et Buffin-Belanger 2022). C’est particulièrement le cas des crues torrentielles, des crues éclairs et des coulées de débris habituellement imprévisibles et souvent dévastatrices (Caine 1980; Innes 1983; Borga et al. 2014). Ces aléas résultent d’événements de précipitation de forte intensité dans les bassins versants à forte pente. De plus, les petits bassins versants sont généralement exclus des études concernant les impacts des changements climatiques sur la réponse hydrologique des cours d’eau, car très peu de données hydrométéorologiques les concernent (Tsegaw et al. 2020). Or, les perturbations climatiques projetées à l’échelle mondiale devraient provoquer une augmentation de l’intensité et de la fréquence des tempêtes responsables de ces crues (Walsh et al. 2016; Prein et al. 2017; Wasko et al. 2021). Des études abordant cette question ont été effectuées en Afrique (Worqlul et al. 2018; Kingston et Taylor 2010), en Europe (Köplin et al. 2012; Tsegaw et al. 2020; Moraga et al. 2021), en Amérique du sud (de Oliveira et al. 2019), aux États-Unis (Young et al. 2019; Chegwidden et al. 2020) et au Canada (Forbes et al. 2011; Rasouli et al. 2014). Parmi celles-ci, aucune ne porte sur des cours d’eau avec des contextes physiographique et climatique similaires au nord de la Gaspésie. Pourtant, à la lumière d’événements récents (Gauthier et al. 2015; Fortin et al. 2015; Héту et al. 2015), il est nécessaire de bien comprendre les impacts qu’auront les changements climatiques sur les réponses hydrologiques et morphologiques des petits cours d’eau dynamiques pour prendre des décisions éclairées sur la gestion des aléas et l’occupation du territoire.

Les rivières de la Gaspésie sont particulièrement sensibles aux aléas hydrogéomorphologiques (HGM), étant donné leurs contextes physiographique et climatique

(Maltais et al. 2022). C'est spécialement vrai pour le nord de la péninsule gaspésienne où la succession de vallées et de plateaux aux altitudes modestes (0-500m), de même que la distribution spatiale des dépôts sédimentaires témoignent de l'héritage laissé par les dernières glaciations sur la région (Hétu et Gray 1985; 2000). L'énergie du relief y est toutefois assez importante pour que les affluents des rivières principales jouent un rôle prépondérant dans la dynamique hydrosédimentaire de la région. Les aléas HGM qui se déclenchent lors d'événements de pluie importants permettent d'alimenter en sédiments d'abord les cours d'eau en tête de bassin versant comme les torrents. Ces derniers se jettent dans les rivières des vallées principales qui alimentent à leur tour le littoral du Saint-Laurent. Comme les sources de sédiments couvrent l'entièreté du territoire de façon relativement uniforme, les cours d'eau nord-gaspésiens sont considérablement dynamiques (Maltais et al. 2022).

La fréquence et l'intensité des cyclones de classe 4 et 5 sont en hausse depuis 1970 (Goldenberg et al. 2001; Vimont et Kossin 2007; M. E. Mann et Emanuel 2006; Saunders et Lea 2008), ceux-là mêmes se transformant en tempête post-tropicale avant de frapper l'est de la province, comme l'ont fait Arthur (2014), Dorian (2019), Ida (2021), et Lee (2023) dans la dernière décennie. Les données d'Ouranos issues des modèles CMIP6 (Lavoie et al. 2024) à l'horizon 2071-2100 pour le territoire gaspésien indiquent une hausse de la température moyenne et du total de précipitations annuelles, même selon le scénario d'émissions modérées (SSP2-4.5). Une diminution des précipitations solides en automne et au printemps est attendue alors qu'elles restent relativement stables pour la saison hivernale. Une augmentation des précipitations liquides pour toutes les saisons est à prévoir également. Le maximum de précipitations sur cinq jours sera aussi plus élevé entre avril et septembre. Le seuil de déclenchement des aléas HGM (Boulet et al. 2022) du nord de la Gaspésie devrait être dépassé plus fréquemment dans un contexte de changements climatiques où les événements de pluies torrentielles seront plus intenses et plus fréquents (Giorgi et al. 2019; Boulet et al. 2022).

L'objectif principal de cet article est d'exposer le rôle des changements climatiques anticipés sur les réponses hydrologiques et morphologiques des petits cours d'eau

dynamiques du nord de la Gaspésie. Pour y parvenir, les réponses hydrologiques de petits cours d'eau seront d'abord caractérisées dans les conditions climatiques actuelles à partir d'événements connus et documentés. Les données provenant de modèles climatiques pour la région permettront ensuite d'anticiper l'évolution des réponses hydrologiques de ces cours d'eau selon les projections climatiques. Finalement, une discussion sur les changements morphologiques engendrés par l'évolution des réponses hydrologiques permettra de proposer un modèle conceptuel des interactions anticipées et de faire des recommandations concrètes aux gestionnaires de ces cours d'eau et aux communautés riveraines.

2.2.2 Site d'étude

Les Appalaches structurant le paysage gaspésien se sont formées en deux temps, soit les orogénèses taconienne et acadienne au Paléozoïque (Landry et al. 2012). Les roches sédimentaires formant cette chaîne de montagnes sont fortement plissées et faillées. Le contexte géologique a permis le développement d'une succession de vallées et de plateaux atteignant des altitudes de 400 à 600 m où le tracé du réseau hydrographique est contrôlé par la structure géologique (Héту et Gray 1985). Les dépôts meubles qui recouvrent le territoire sont formés de colluvions (flancs et fonds de vallée), de dépôts alluviaux (plaines alluviales actuelles et anciennes, deltas), de dépôts marins et littoraux à l'intérieur de la limite du niveau marin relatif (40-75 m) et d'un manteau résiduel de till sur les hauts plateaux (Veillette et Cloutier 1993).

Le climat de la Gaspésie est contrasté parce que la région est affectée à la fois par des masses d'air provenant de l'arctique, de l'ouest du Canada, du sud des États-Unis et de la côte atlantique (Héту et Vandelac 1989). On peut ajouter aux conditions climatiques l'influence maritime du Saint-Laurent et orographique des Appalaches. Les étés y sont relativement chauds et les hivers froids (Fortin et al. 2015). Une quantité importante de précipitations s'abat sur la région à longueur d'année; généralement solides de novembre à avril et liquides de mai à octobre (Héту et Vandelac 1989). La Figure 17 montre les normales

climatiques (Environnement Canada) pour la ville de Sainte-Anne-des-Monts pour les années de 1981 à 2010.

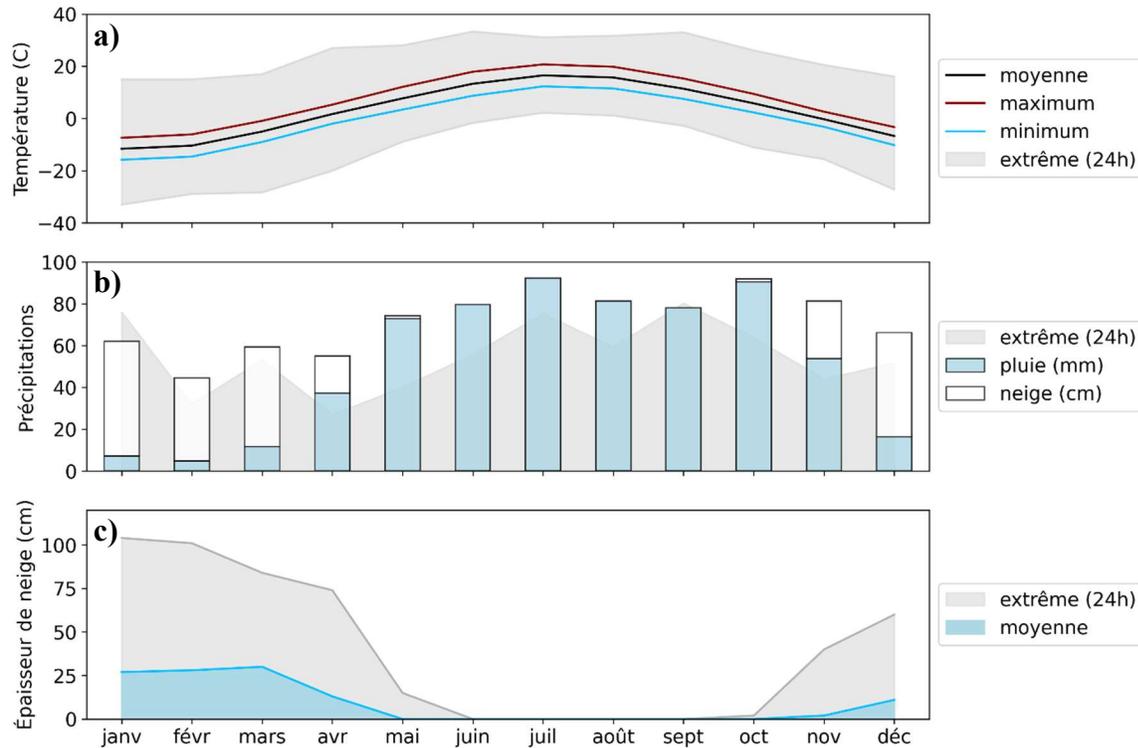


Figure 17. Normales climatiques à la station de Sainte-Anne-des-Monts (Environnement Canada) entre 1981 et 2010. En a) la température de l'air, b) les précipitations et c) la hauteur de neige.

La coulée à Layoutte est un affluent de la rivière Mont-Saint-Pierre qui coule dans le village du même nom dans la Municipalité Régionale de Comté (MRC) de la Haute-Gaspésie dans l'est de la province du Québec (Figure 18). Son bassin-versant à forte pente et majoritairement forestier draine une superficie de 7,5 km² et est orienté du sud-est au nord-ouest. Les sédiments transportés par le cours d'eau proviennent d'une couche de till mince qui recouvre les versants et les plateaux environnants. Ils sont mobilisés à la fois par des processus fluviaux et de versants, particulièrement lors de crues liées aux pluies torrentielles. On trouve à son embouchure un cône alluvial ayant été formé lors de la dernière déglaciation, dont une partie est encore aujourd'hui activée lors des crues.

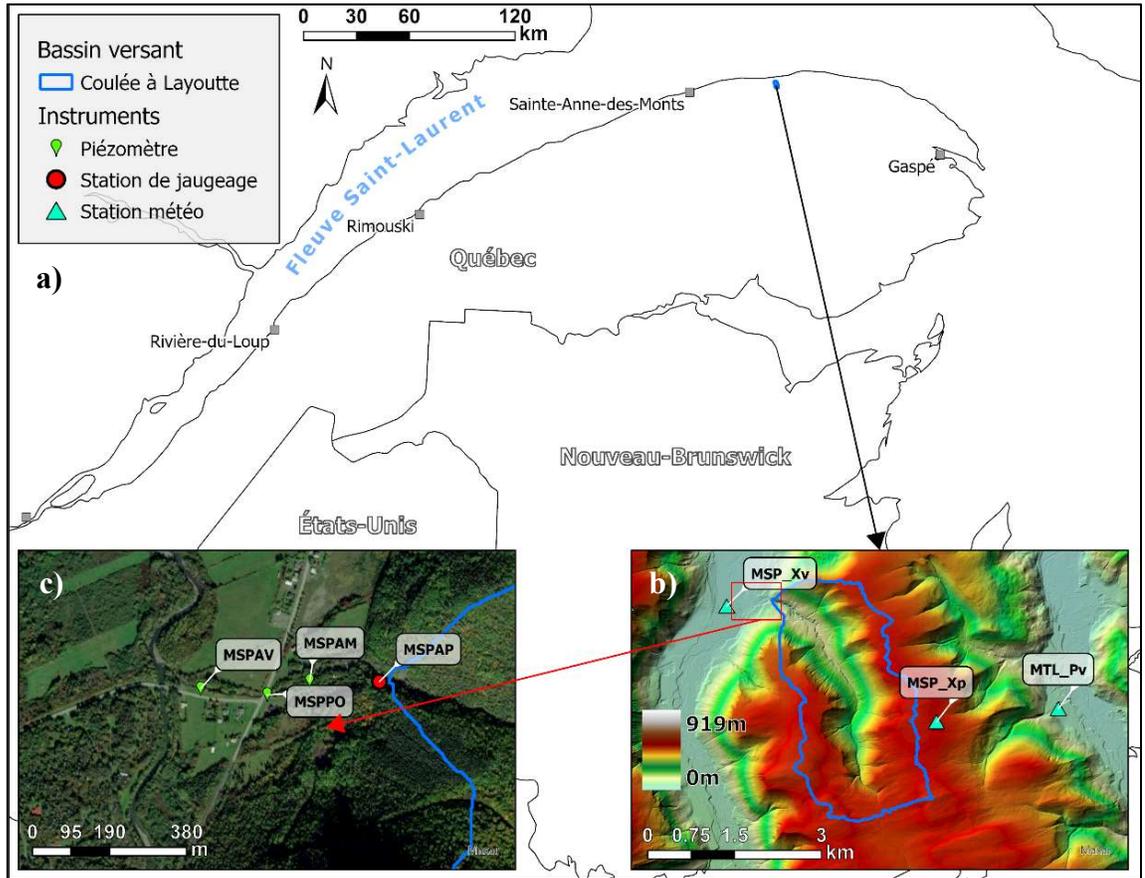


Figure 18. Carte de localisation de la région (a), du site d'étude (b) et du cône alluvial (c) de la coulée à Layouette

2.2.3 Méthodologie

Les petits cours d'eau du nord de la Gaspésie sont sous-instrumentés. On trouve quatre stations hydrométriques dans la région : les rivières York (1028 km²), Au Renard (69 km²), Dartmouth (962 km²) et Sainte-Anne (822 km²). La méthodologie présentée ici constitue le commencement d'analyses sur des données qui devraient s'étaler sur une plus longue période que les trois années utilisées lorsque des données historiques seront disponibles. Il est néanmoins important d'entamer le travail avec ce qui est disponible compte tenu des crues intenses des dernières années et des perturbations qu'apporteront les changements climatiques futurs.

2.2.3.1 Données hydrologiques

Un capteur de pression Onset a été installé à l'automne 2019 dans le lit du cours d'eau, à l'apex du cône alluvial (Figure 19a) pour documenter les fluctuations du niveau d'eau. À l'été 2021, trois autres capteurs identiques ont été installés dans des piézomètres le long du chenal, permettant alors de faire un suivi des niveaux d'eau de l'amont vers l'aval (Figure 19bcd). L'estimation des niveaux d'eau a été faite à partir de ces capteurs en soutirant la pression de l'air mesurée par le baromètre de la station météorologique dans la vallée de Mont-Saint-Pierre (Figure 20c), située à une distance de 70 à 500 mètres des capteurs de pression. Si la donnée de la station n'était pas disponible, les valeurs de pression de l'air venaient d'un autre capteur de pression Onset situé sur le cône alluvial.



Figure 19. Capteurs de pression installés sur le cône alluvial de la coulée à Layoutte: a) MSPAP b) MSPAM c) MSPPO d) MSPAV

Considérant le dynamisme du cours d'eau et les changements potentiels dans la section transversale ainsi que la forte incertitude des mesures de débits et leur petit nombre durant la période d'étude (4), les analyses de la réponse hydrologique sont faites sur les fluctuations de niveaux d'eau plutôt que celles des débits. Il faut donc tenir compte du fait que le niveau d'eau ne soit pas nécessairement proportionnel au débit dans les hydrogrammes de crue présentés, car la relation débit – niveau d'eau dépend de l'évolution de la forme de la section transversale du cours d'eau.

2.2.3.2 Données météorologiques

Les données météorologiques proviennent des stations du Laboratoire de Géomorphologie et de Gestion des Risques en Montagne (LGGRM) pour les données locales ou à résolution temporelle plus fine ($\Delta 15\text{min}$). Les trois stations utilisées sont MSP_Xv (Onset U30), MSP_Xp (Onset U30) et MTL_Pp (Onset microstation) (Figure 20). Elles sont toutes également munies de pluviomètres à bascule. Comme la station MTL_Pp a fonctionné en tout temps depuis 2019, elle a été préférée à MSP_Xv pour les données de précipitations et de températures. La station MSP_Xp permet de comparer les conditions à une altitude plus élevée (522 m) que MTL_Pp (43 m). Les stations MSP_Xv et MSP_Xp sont aussi équipées de capteurs de hauteur de neige. Pour les données historiques à une résolution temporelle plus grossière ($\Delta 1\text{h}$), les données de la station météorologique d'Environnement Canada située à Cap-Madeleine ont été utilisées. Cette dernière est située à 35 km à l'est de l'embouchure de la coulée à Layoutte.

2.2.3.3 Données climatiques

Pour mieux comprendre l'impact des changements climatiques sur la réponse hydrologique des cours d'eau, des analyses de tendances ont été effectuées sur des variables météorologiques. Les données utilisées provenaient de deux sources: les données historiques de la station de Cap-Madeleine (Environnement Canada) et les données de projections

climatiques de la North-American Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment (NA-CORDEX) (Mearns et al. 2017).

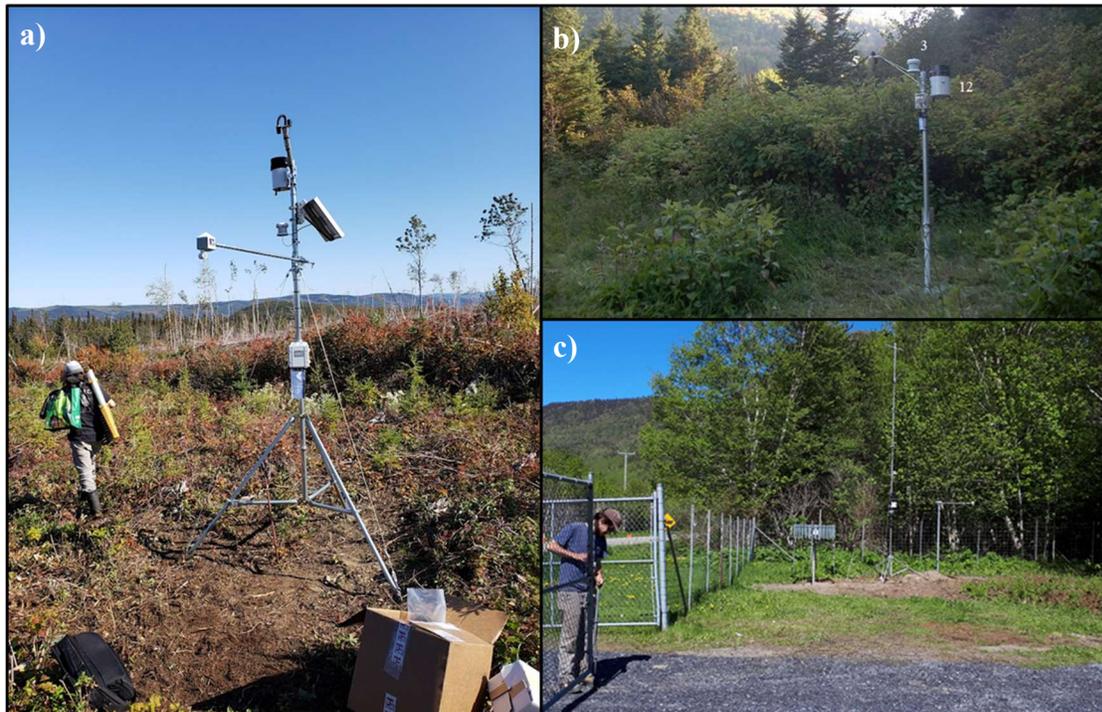


Figure 20. Stations météorologiques utilisées dans les analyses : a) MSP_Xp b) MTL_Pv c) MSP_Xv

Les données quotidiennes de la station météorologique de Cap-Madeleine sont récoltées depuis 1882, alors que des données horaires sont mesurées depuis 1967 pour certaines variables et périodes. Depuis 1996, toutes les données horaires sont disponibles. Lorsque des trous de données de courte durée sont présents, les valeurs de stations voisines ont été utilisées pour les combler selon l'ordre de priorité suivant: Sainte-Anne-des-Monts, Cap-Chat, Cap-des-Rosiers. Pour ce qui est des trous de données plus longs, par exemple lors du changement d'une station à prise de mesure manuelle vers une station automatisée (1994-1995), les données de réanalyse CERA-20C (Laloyaux et al. 2018) ayant un coefficient de détermination de 0,94 avec les données mesurées ont été utilisées dans les analyses concernant la température. Il n'était pas possible d'utiliser les données de réanalyse pour les

précipitations compte tenu de la variabilité spatiale des précipitations dans la région (Boulet et al. 2022); ces longues périodes sans données ont donc été exclues des analyses de tendance.

Les données de projection climatique sont issues de quatre simulations provenant d'une combinaison de trois modèles régionaux (CRCM4, HIRHAM5, RCA4.v1) et deux ensembles de simulation (CanESM2, EC-EARTH). Pour les analyses de tendance, les simulations des scénarios RCP 4.5 et 8.5 couvrant la période de 2010 à 2100 pour neuf points de grille de simulation (nam-44) (Figure 21) situés en périphérie de la station météorologique de Cap-Madeleine ont été utilisées.

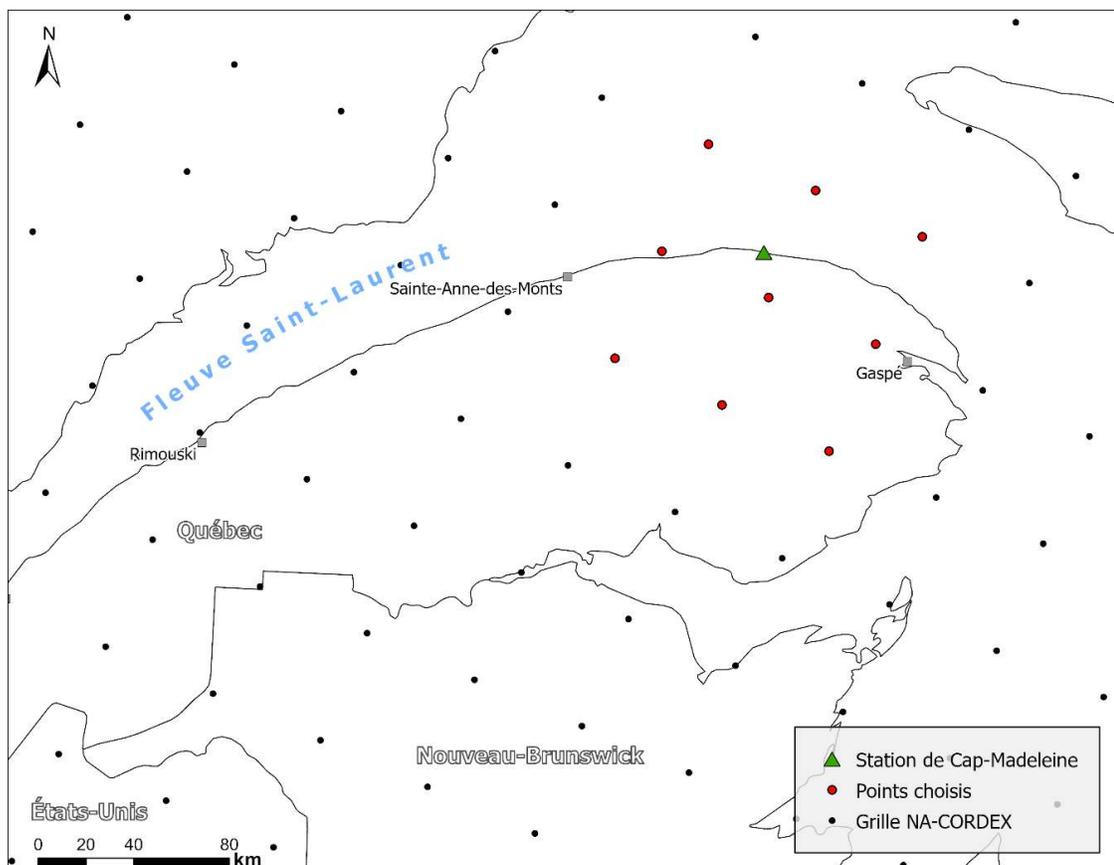


Figure 21. Localisation de la station météorologique de Cap-Madeleine (X) et des neuf points de grille NAM-44 NA-CORDEX sélectionnés (•) pour effectuer les analyses des tendances climatiques

Une pondération inverse de la distance pour obtenir une valeur unique à partir des neuf points a été appliquée sur les données. Le CRCM4 est le seul modèle offrant des données horaires de précipitations. Pour éviter d'atténuer les valeurs extrêmes liées à l'intensité des événements de précipitations, seul le point le plus près de la station de Cap-Madeleine a été conservé pour les analyses utilisant les précipitations horaires. Pour le reste, les résultats sont issus des données quotidiennes pondérées à partir des neuf points de grille.

Les variables climatiques analysées se divisent en trois groupes. Elles sont soit dérivées des données de température de l'air ou des données de précipitations estivales et hivernales (Tableau 5). Les seuils de ces variables ont été déterminés à partir d'une analyse de forêt d'arbres décisionnels basée sur de nombreux aléas déclenchés par les conditions hydrométéorologiques dans le nord de la Gaspésie (Gauthier et al. 2022). Les redoux sont identifiés lorsque les données de température moyenne quotidienne de l'air dépassent le point de congélation suivant une période sous 0 °C. Les variables identifiées permettent de s'intéresser aux redoux (fréquence, durée, intensité, magnitude, moment) et aux précipitations liquides (fréquence, intensité, quantité, durée, saison) ou solides (fréquence, quantité, saison). Pour éviter les biais d'analyse, les tests ont été faits de manière indépendante sur les données historiques et de projections climatiques. Des tests de Mann-Kendall ont permis d'identifier la présence ou non de tendance pour chacune des variables et le taux de variation a été obtenu par régression linéaire.

Tableau 5
Variables utilisées pour extraire les tendances climatiques

Température	Précipitations	
	<i>avril-octobre</i>	<i>décembre-avril</i>
Température moyenne sur 24h > 0,5°C	Total de pluie sur 24h > 10 mm	Total de neige sur 24h > 10 mm d'équivalent en eau
Température moyenne sur 48h > 0,5°C	Total de pluie sur 48h > 15 mm	Total de neige sur 24h > 15 mm d'équivalent en eau
Température moyenne sur 72h > 0,5°C	Total de pluie sur 72h > 20 mm	Total de neige sur 48h > 20 mm d'équivalent en eau
Durée moyenne des redoux (jours)	Intensité de la pluie > 1 mm/h sur 12h	Total de neige sur 72h > 25 mm d'équivalent en eau
Température maximale des redoux (°C)	Intensité de la pluie > 1 mm/h sur 8h	Total de pluie sur 24h > 1 mm
Degrés jours de dégel (DJD) maximal des redoux	Intensité de la pluie > 0,5 mm/h sur 24h	Total de pluie sur 24h > 5 mm
Premier jour julien où DJD > 5°C	Intensité de la pluie > 0,5 mm/h sur 48h	Total de pluie sur 24h > 1 mm
Premier jour julien où DJD > 25°C		
Premier jour julien où DJD > 100°C		
Premier jour julien du premier gel		

2.2.4 Résultats

2.2.4.1 Crues connues (2020-2022)

Les événements de crues connues ont été séparés en trois types. :

- 1) Les crues printanières provoquées par la hausse des températures faisant fondre la neige qui alimente le cours d'eau et recharge la nappe d'eau souterraine;
- 2) Les crues associées aux événements de pluie torrentielle survenant à l'été et l'automne lors de tempêtes;
- 3) Les crues associées à des redoux dont l'intensité et la durée sont suffisantes pour provoquer une réponse hydrologique dans le cours d'eau.

La Figure 22 illustre les fluctuations du niveau d'eau mesurées dans le tronçon de la coulée à Layoutte ainsi que les variables météorologiques durant la période d'avril 2020 à juin 2022. Les événements liés à une augmentation du niveau d'eau sont numérotés et sont divisés selon les trois types présentés ci-haut : les crues printanières (1, 4, 7), les événements associés aux redoux (2, 3) et les événements de pluie torrentielle (5, 6).

Pour la crue printanière de l'année 2020, les précipitations liquides du 1^{er} avril au 31 mai ont atteint 103 mm dans la vallée et 47 mm sur le plateau, alors que la normale se situe à 128 mm à Sainte-Anne-des-Monts (Figure 17). Dans la Figure 23, les trois pics de crues concordent avec des périodes chaudes alors que les deux premiers pics sont aussi en concomitance avec des événements de précipitations de faible intensité. La hauteur de neige devient nulle dans la deuxième semaine de mai dans la vallée et une semaine plus tard sur le plateau.

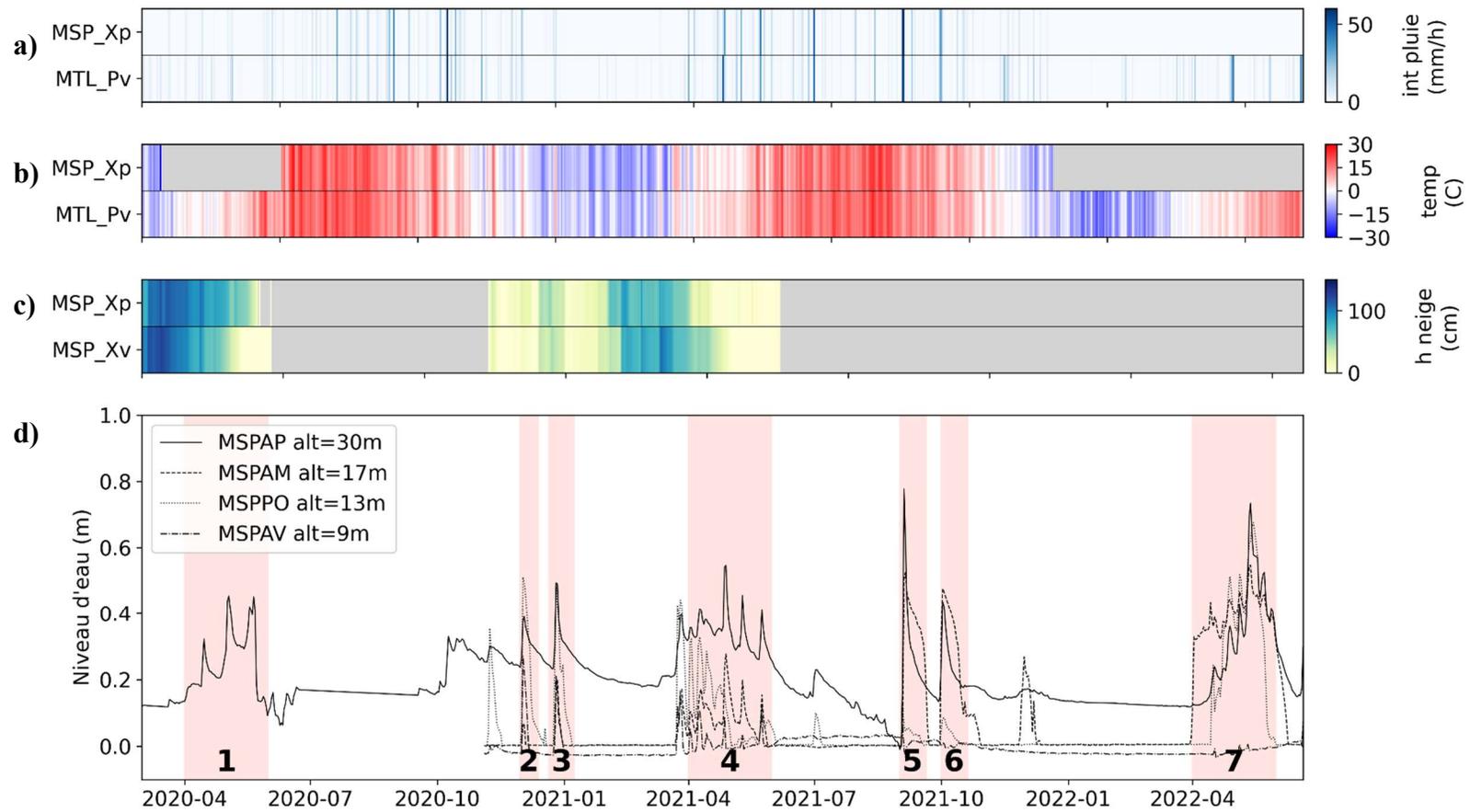


Figure 22. Données mesurées pour la coulée à Layouthe. En a) l'intensité des pluies, b) la température de l'air, c) la hauteur de neige et d) le niveau d'eau. Les zones en gris représentent les périodes où les données sont inexistantes.

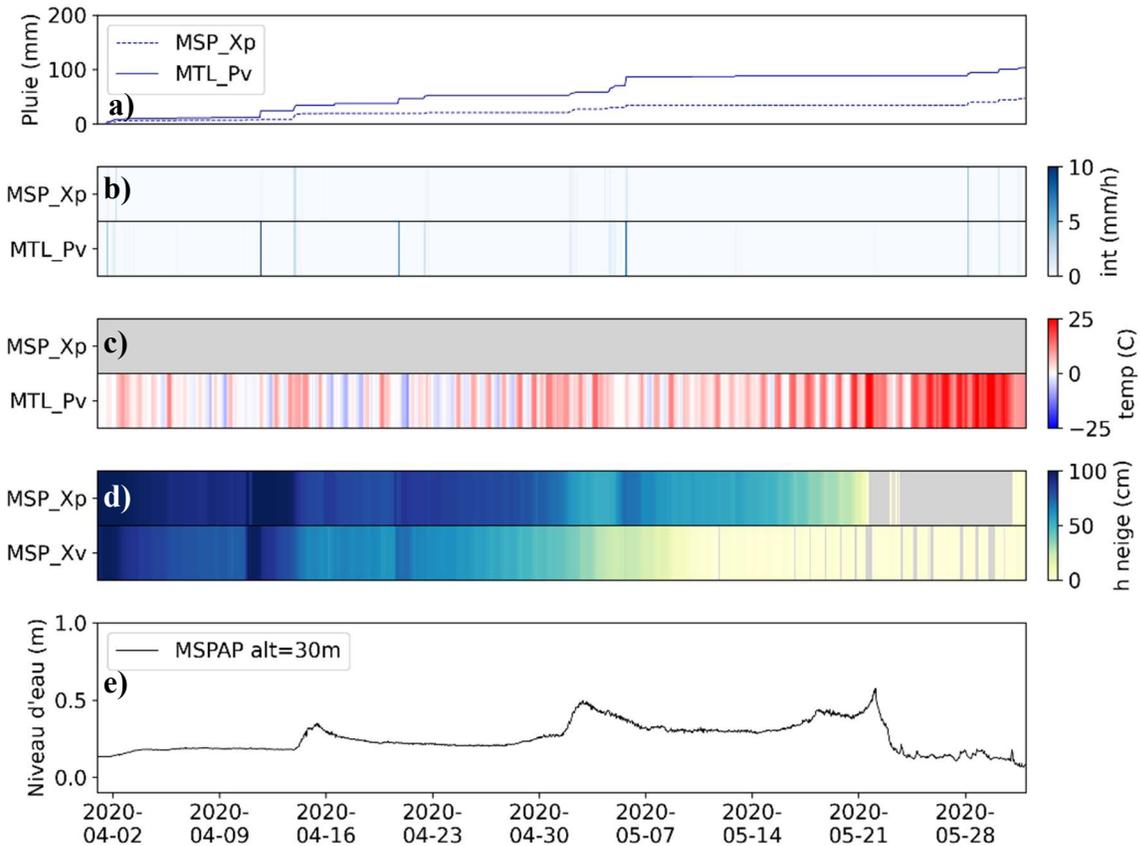


Figure 23. Réponse lors de la crue printanière de 2020. En a) courbe cumulée de la pluie, b) intensité de la pluie, c) température de l'air, d) hauteur de neige, e) niveau d'eau. Le capteur de température de la station MSP_Xp n'était pas fonctionnel pour la période couverte.

Pour ce qui est de la crue du printemps 2021 (Figure 24), les précipitations liquides entre le 1^{er} avril et le 31 mai ont plutôt atteint 306 et 272 mm dans la vallée et sur le plateau respectivement, soit plus du double de la normale. Aussi, on trouve un niveau de base plus élevé que l'année précédente tout au long de la crue. Dans ce cas-ci, les pics de crues concordent avec des événements de pluie plutôt que des périodes très chaudes. On retrouve une hauteur de neige nulle à la fin avril dans la vallée et à la mi-mai sur le plateau.

Lors de la crue printanière de 2022 (Figure 25), les trois nouveaux capteurs avaient été installés dans le chenal. Cependant, la batterie de la station météorologique située sur le plateau a cessé de fonctionner, malgré la présence d'un panneau solaire. Il n'y a donc pas de

données météorologiques en altitude pour 2022. Aussi, le capteur mesurant la hauteur de neige dans la vallée était défectueux pour cette période. Des précipitations liquides de 196 mm ont été mesurées dans la vallée, dont la majorité est tombée au début du mois de mai. La réponse du niveau du cours d'eau a été la plus forte enregistrée lors d'une crue printanière malgré le fait qu'une quantité plus faible de précipitations ait été enregistrée qu'en 2021. On soupçonne que les pics enregistrés à la mi-avril sont des artéfacts créés par le dégel de l'eau situé à l'intérieur du capteur; ils sont donc ignorés. Les variations du niveau d'eau sont comparables pour les trois capteurs situés le plus en amont alors que celui en aval enregistre un niveau d'eau quasi nul sauf quelques exceptions.

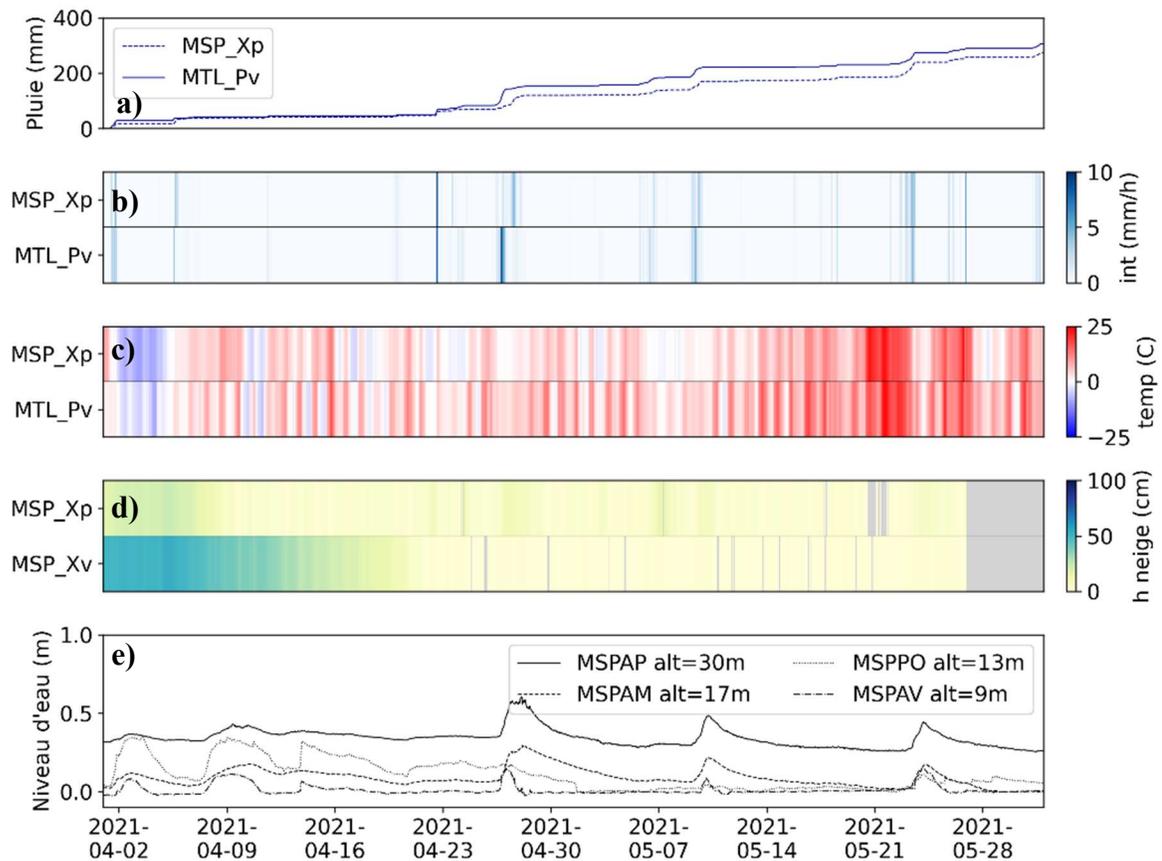


Figure 24. Réponse lors de la crue printanière de 2021. En a) courbe cumulée de la pluie, b) intensité de la pluie, c) température de l'air, d) hauteur de neige, e) niveau d'eau.

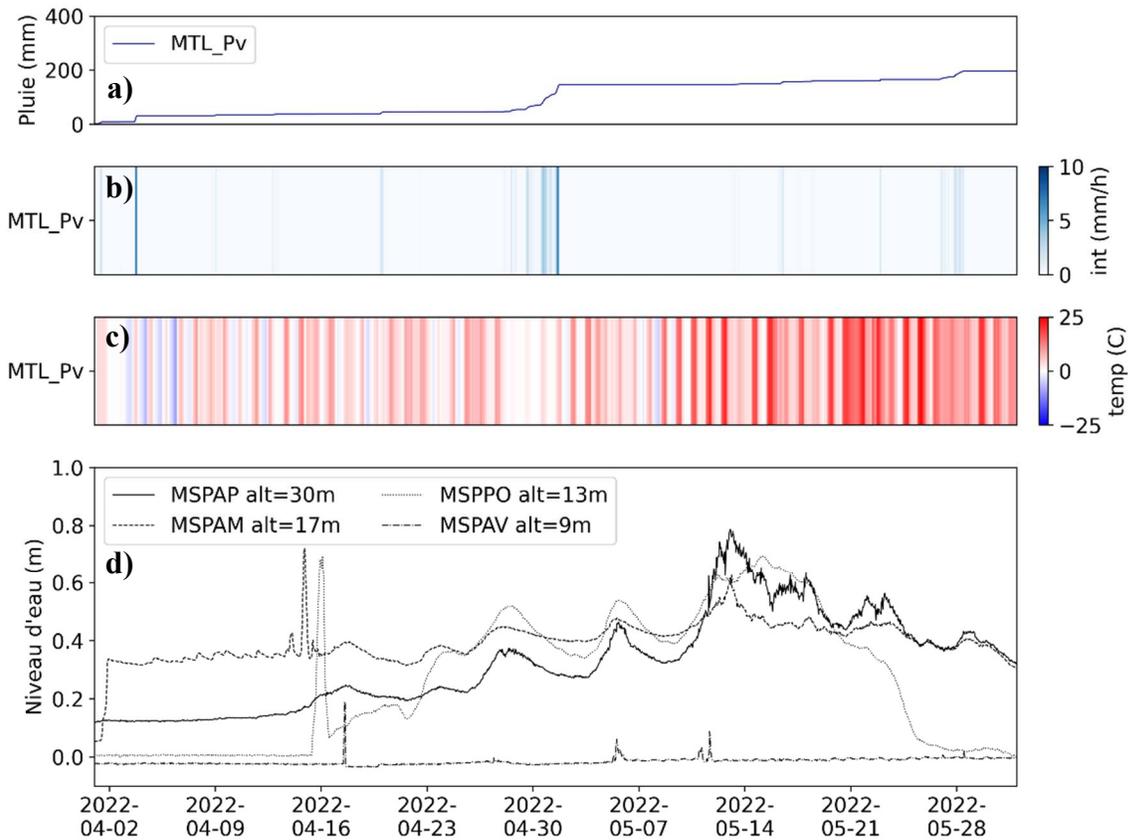


Figure 25. Réponse lors de la crue printanière de 2022. En a) courbe cumulée de la pluie, b) intensité de la pluie, c) température de l'air, d) niveau d'eau. La batterie de la station MSP_Xp a cessé de fonctionner l'hiver précédent malgré le panneau solaire qui l'alimentait.

L'événement de pluie torrentielle le plus marquant est la tempête post-tropicale Ida (Figure 26), qui a déversé une quantité de pluie exceptionnelle au début du mois de septembre 2021. Dans la vallée de Mont-Louis, la station a enregistré 241 mm (Ida=197 mm en 50 h) alors que celle située sur le plateau a reçu 272 mm (Ida=223 mm en 52 h) pour le mois de septembre. En comparaison, 73 mm sont tombés à la station de Cap-Madeleine du 4 au 6 juillet 2014 lors de la tempête Arthur qui a causé des dégâts considérables. Ida est responsable du niveau d'eau le plus élevé mesuré dans la coulée à Layoutte en trois ans de données. Pour les quatre capteurs, le niveau d'eau est monté rapidement. Pour les deux capteurs situés en aval, le niveau est redescendu en peu de temps alors qu'en amont on retrouve deux décrues

complètement différentes. Le capteur situé dans le lit du cours d'eau a enregistré une décrue graduelle jusqu'à revenir au niveau de base alors que, pour MSPAM, la décrue est d'abord lente jusqu'au 19 septembre avant de s'accélérer subitement jusqu'à devenir nulle au 21 septembre.

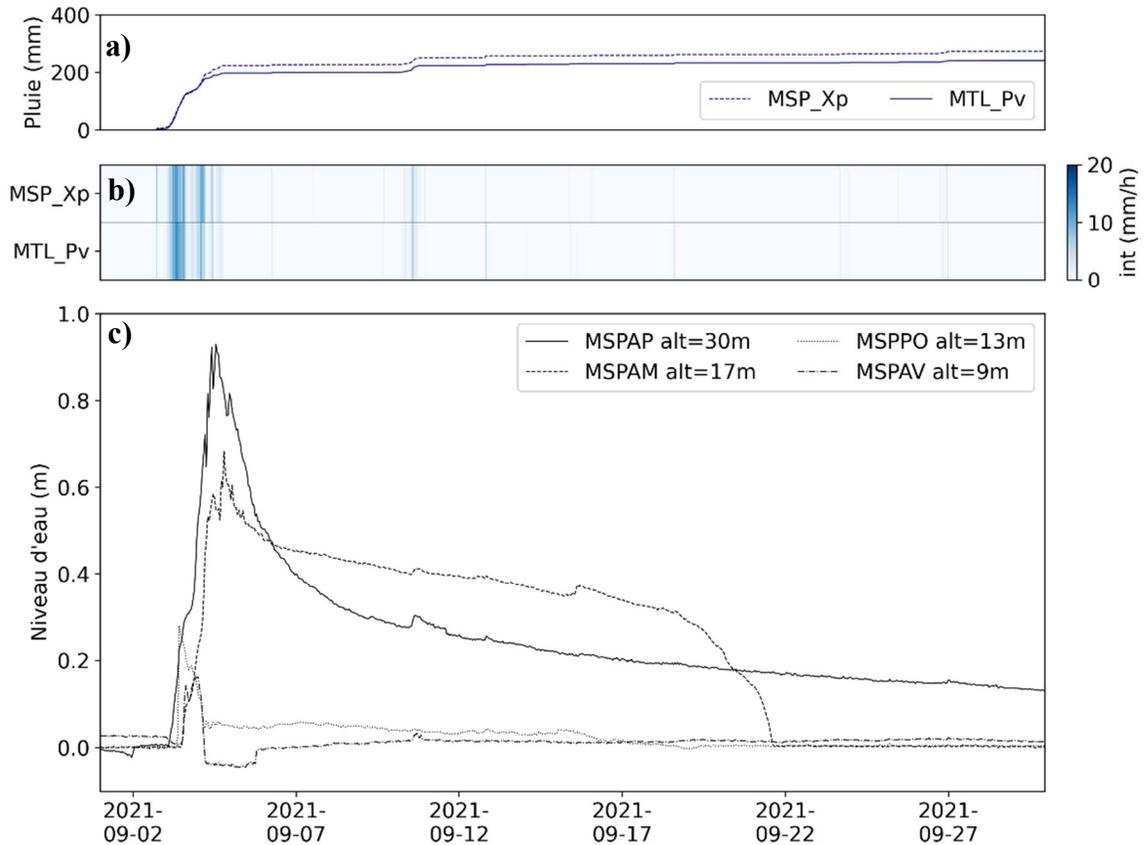


Figure 26. Réponse lors de la tempête post-tropicale Ida. En a) courbe cumulée de la pluie, b) intensité de la pluie, c) niveau d'eau.

Un mois après la tempête Ida, un événement de pluie de moindre envergure est survenu : 69 mm en 63h (Figure 27). Malgré une longue période sans précipitations significatives suivant cet événement, la décrue s'est échelonnée sur 2 semaines.

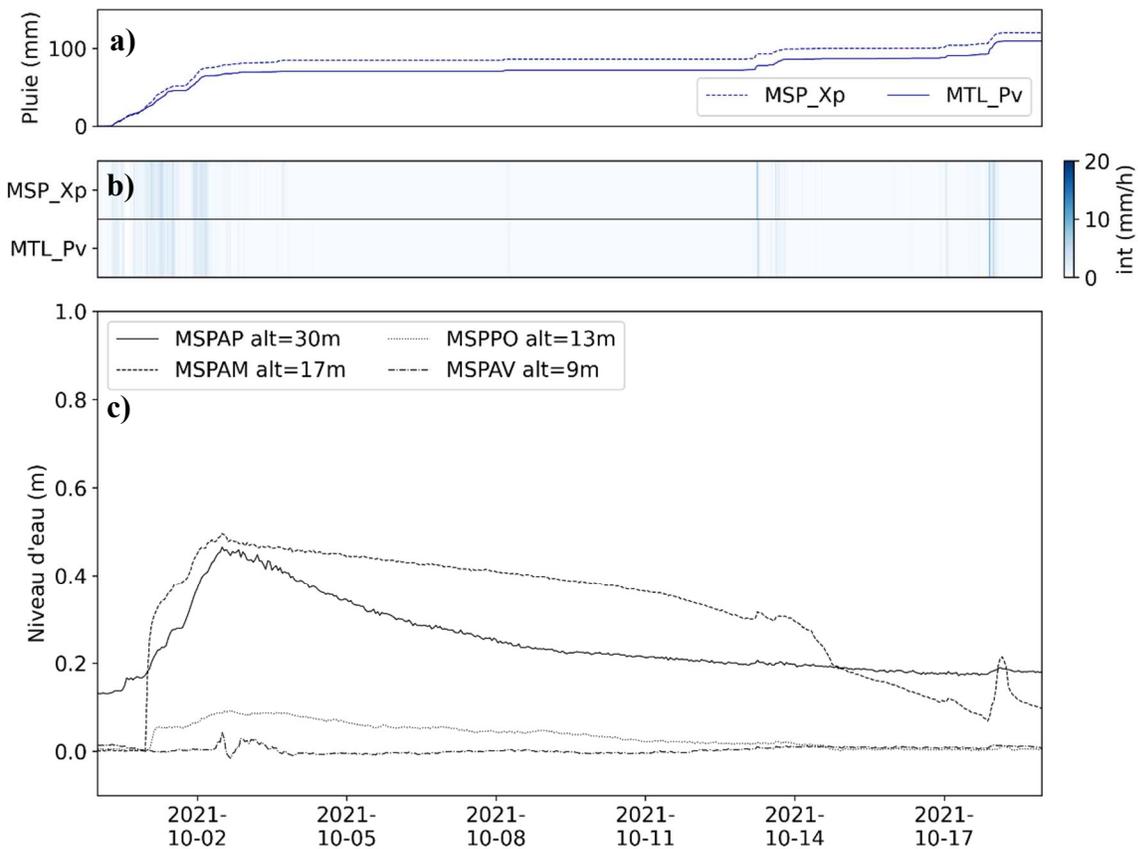


Figure 27. Réponse lors d'un événement survenu un mois après Ida. En a) courbe cumulée de la pluie, b) intensité de la pluie, c) niveau d'eau.

Pour les événements liés au redoux, le premier du mois de décembre 2020 se caractérise par une période de cinq jours où les températures dépassent largement les normales et où entre 27 et 30 mm de pluie sont tombés, ce qui a rapidement fait fondre la neige (Figure 28). Cette dernière avait une hauteur de 8 cm dans la vallée de Mont-Saint-Pierre et de 20 cm sur le plateau. La température a atteint plus de 16 degrés à 43 m d'altitude et plus de 12 degrés à 522 m. La neige avait disparu complètement après seulement 36h. L'événement a fait modestement monter le niveau d'eau à l'apex du cône alluvial alors que les capteurs plus en aval ont enregistré des niveaux d'eau plus élevés même que pendant la tempête Ida. Les valeurs maximales de niveau d'eau ont été atteintes environ au moment où la hauteur de neige est devenue nulle et la décrue s'est échelonnée sur environ une semaine.

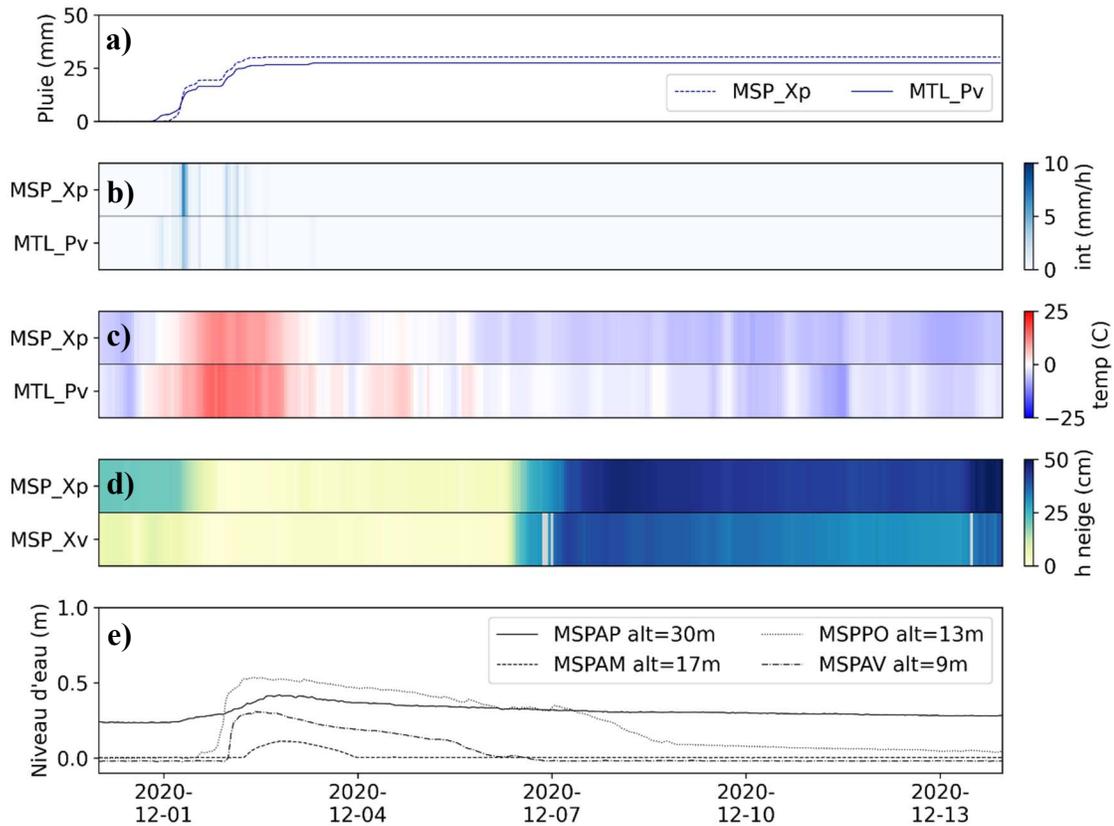


Figure 28. Réponse lors d'un redoux au début de mois de décembre 2020. En a) courbe cumulée de la pluie, b) intensité de la pluie, c) température de l'air, d) hauteur de neige, e) niveau d'eau.

Puis, trois semaines plus tard, une autre période de redoux de deux jours où les températures ont atteint 14 et 11 degrés en vallée et sur le plateau respectivement a affecté la région de la Gaspésie (Figure 29). À ce moment, le manteau neigeux était plus épais, soit de 32 cm dans la vallée et 35 cm sur le plateau. De 21 à 24 mm de pluie sont également tombés durant cette période, faisant ainsi fondre l'entièreté de la neige. Cette fois-ci, les quatre capteurs ont enregistré une hausse importante du niveau d'eau. Le pic de crue concorde avec le retour des températures au point de congélation et la décrue a duré environ une semaine.

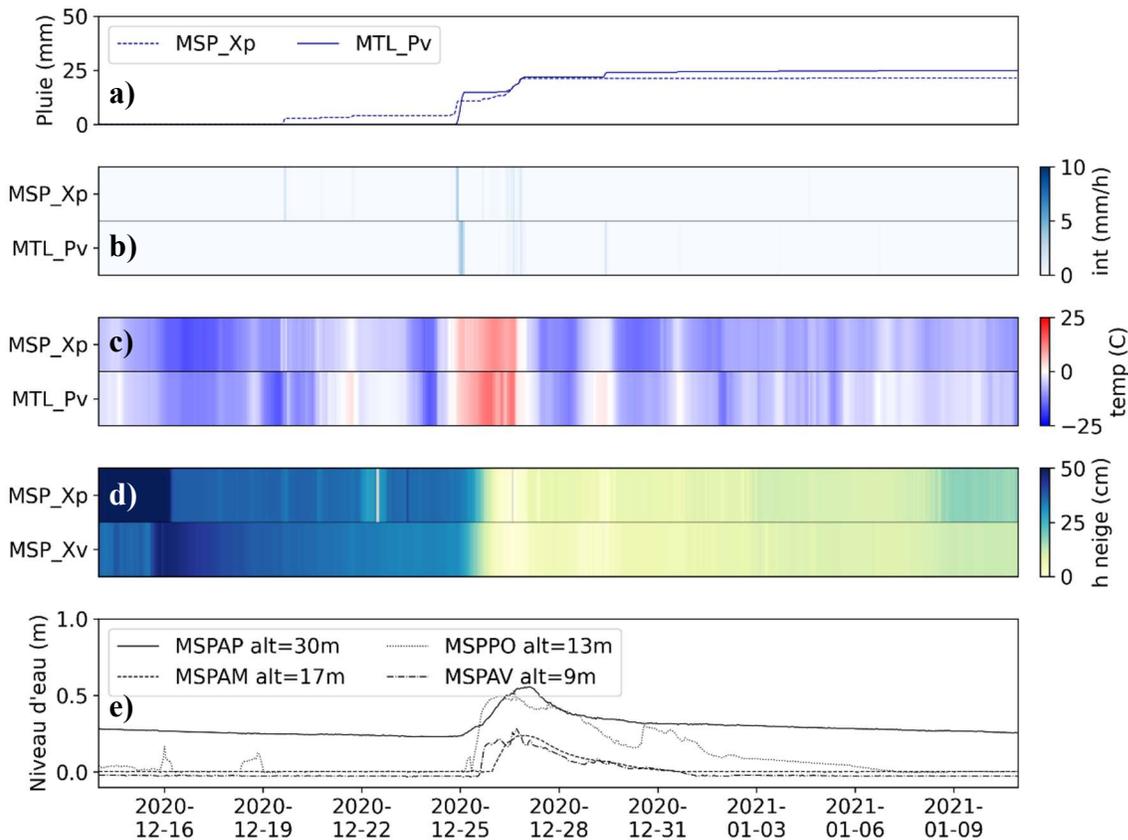


Figure 29. Réponse lors d'un redoux à la fin du mois de décembre 2020. En a) courbe cumulée de la pluie, b) intensité de la pluie, c) température de l'air, d) hauteur de neige, e) niveau d'eau.

2.2.4.2 Tendances climatiques historiques et prévisionnelles

Pour les données historiques de température, les tests de Mann-Kendall exposent des tendances significatives pour la fréquence des journées surpassant les seuils de températures pour toutes les durées entre décembre et mars à la station de Cap-Madeleine (Tableau 6). Les périodes de 24, 48 et 72h dont la température moyenne a surpassé le seuil de 0.5 °C sont plus fréquentes aujourd'hui qu'elles l'étaient en 1939 pour la saison hivernale (décembre-mars). Le premier jour julien où les Degrés Jours de Dégel (DJD) dépassent les seuils de 5, 25 et 100 °C survient plus tôt dans l'année, alors que le premier jour où la température moyenne est sous 0.5 °C arrive 12 jours plus tard en 2020 qu'en 1939.

Tableau 6

Tendances significatives issues des tests de Mann-Kendall effectués sur les données de température mesurées à la station météorologique de Cap-Madeleine. Les taux des changements sont dans les colonnes Δ 10 ans (moyenne par 10 ans) et 1939-2020 (totale).

Variables	Tendance	p*	Δ 10 ans	1939-2020
Nombre de jours où la température moyenne sur 24h > 0,5°C (déc-mars)	↗	0,000	0,23	1,9
Nombre de jours où la température moyenne sur 48h > 0,5°C (déc-mars)	↗	0,000	0,33	2,7
Nombre de jours où la température moyenne sur 72h > 0,5°C (déc-mars)	↗	0,000	0,12	0,9
Durée moyenne des redoux (jours) (déc-mars)	---	0,741	---	---
Température maximale des redoux (°C) (déc-mars)	---	0,365	---	---
DJD maximal des redoux (déc-mars)	---	0,274	---	---
Premier jour julien où DJD > 5°C	↘	0,033	-3,35	-27,2
Premier jour julien où DJD > 25°C	↘	0,020	-0,83	-6,7
Premier jour julien où DJD > 100°C	↘	0,001	-1,16	-9,4
Premier jour julien du premier gel	↗	0,001	1,45	11,8

* p-value Mann-Kendall : >0,05 | 0,05-0,01 | <0,01

Les tendances significatives issues des données historiques de précipitations concernent la fréquence des événements surpassant les seuils d'intensité au printemps entre 1976 et 2020, période où les données horaires de précipitations sont disponibles. C'est le cas pour les seuils de 1 mm/h sur 8h, 1 mm/h sur 12h et 0,5 mm/h sur 24 h (Tableau 7). Les tests

ont également montré que les événements de précipitations solides sont moins fréquents pendant l'hiver (décembre-avril), particulièrement pour les quantités plus élevées (Tableau 7). Deux tendances sont significatives pour les précipitations liquides hivernales. La fréquence des événements apportant une faible quantité de précipitations liquides (1 mm et 5 mm) est en hausse depuis 1882.

Selon les scénarios climatiques retenus, les tendances climatiques pour les données de précipitations sont plus mitigées que celles pour les températures (Tableau 8). Il semble y avoir une légère hausse de la fréquence des événements de pluie printaniers (avril-mai) pour le scénario RCP 8.5 seulement, alors qu'aucune tendance n'est significative pour le RCP 4.5. Toutefois, pour les deux scénarios, les événements de précipitations liquides au printemps seraient plus intenses en 2100 qu'en 2011. Pour ce qui est des précipitations estivales (juin-octobre), il n'y a pratiquement aucune tendance significative à l'exception de quelques seuils d'intensité pour le scénario RCP 8.5. Par contre, les tendances dans la fréquence des événements de précipitations pour la saison hivernale (décembre-avril) sont presque toutes significatives. Les événements de précipitations neigeuses ont une tendance à la baisse dans tous les modèles et pour les deux scénarios. C'est le contraire pour les événements de précipitations liquides qui seraient en hausse entre décembre et avril en 2100 par rapport à 2011.

Pour les données prévisionnelles, les tendances observées dans les modèles climatiques sont sans équivoque pour les données de températures (Tableau 9). Le nombre de jours surpassant le point de congélation entre décembre et mars augmente de plus de 30 et 70 entre 2011 et 2100 pour les scénarios RCP 4.5 et 8.5 respectivement. En outre, la durée moyenne et la température maximale des redoux augmentent significativement pour tous les modèles, sauf le RCA4v1_ICHEC pour le RCP 4.5, alors que tous les modèles ont des tendances significatives pour le RCP 8.5. Aussi, le premier jour julien où les degrés-jours de dégel (DJD) dépasse les seuils de 5, 25, et 100 degrés arrive plus tôt dans tous les modèles, alors que le premier jour julien où la température moyenne atteint le point de congélation en automne est plus tard en saison de 5 à 7 jours.

Tableau 7

Tendances significatives issues des tests de Mann-Kendall effectués sur les données de précipitations mesurées à la station météorologique de Cap-Madeleine. Les taux des changements sont dans les colonnes à la droite de la valeur p.

Variables	Tendance	p*	Δ 10 ans	1882-2020	1967-2020	1976-2020
Total de pluie sur 24h > 10 mm (avr-mai)	---	0,748	0,00	0,04	---	---
Total de pluie sur 48h > 15 mm (avr-mai)	---	0,299	0,04	0,54	---	---
Total de pluie sur 72h > 20 mm (avr-mai)	---	0,372	-0,04	-0,57	---	---
Intensité de la pluie > 1 mm/h sur 12h (avr-mai)	↗	0,001	0,99	---	---	4,36
Intensité de la pluie > 1 mm/h sur 8h (avr-mai)	↗	0,043	0,67	---	---	2,96
Intensité de la pluie > 0,5 mm/h sur 24h (avr-mai)	↗	0,000	0,75	---	---	3,32
Intensité de la pluie > 0,5 mm/h sur 48h (avr-mai)	---	0,516	0,07	---	---	0,32
Total de pluie sur 24h > 10 mm (juin-oct)	---	0,298	0,07	0,98	---	---
Total de pluie sur 48h > 15 mm (juin-oct)	---	0,167	0,20	2,77	---	---
Total de pluie sur 72h > 20 mm (juin-oct)	---	0,323	0,19	2,64	---	---
Intensité de la pluie > 1 mm/h sur 12h (juin-oct)	---	0,052	1,28	---	6,76	---
Intensité de la pluie > 1 mm/h sur 8h (juin-oct)	---	0,186	0,87	---	4,61	---
Intensité de la pluie > 0,5 mm/h sur 24h (juin-oct)	---	0,326	0,54	---	2,84	---
Intensité de la pluie > 0,5 mm/h sur 48h (juin-oct)	---	1,000	0,02	---	0,11	---
Total de neige sur 24h > 10 mm d'équivalent en eau (déc-avr)	↘	0,013	-0,21	-2,87	---	---
Total de neige sur 24h > 15 mm d'équivalent en eau (déc-avr)	↘	0,001	-0,17	-2,36	---	---
Total de neige sur 48h > 20 mm d'équivalent en eau (déc-avr)	↘	0,038	-0,11	-1,49	---	---
Total de neige sur 72h > 25 mm d'équivalent en eau (déc-avr)	↘	0,010	-0,23	-3,22	---	---
Total de pluie sur 24h > 1 mm (déc-avr)	↗	0,000	0,61	8,36	---	---
Total de pluie sur 24h > 5 mm (déc-avr)	↗	0,003	0,18	2,50	---	---
Total de pluie sur 24h > 1 mm (déc-avr)	---	0,405	0,06	0,87	---	---

* p-value Mann-Kendall : >0,05 | 0,05-0,01 | <0,01

Tableau 8

Tendances climatiques issues des tests de Mann-Kendall effectués sur les données de précipitations quotidiennes (HIRHAM5, RCA4v1_CanESM2, RCA4v1_ICHEC) et horaires (CanRCM4) des projections climatiques. La colonne 2011-2100 contient la valeur des changements observés.

Variables	CRCM4						HIRHAM5		CanESM2		ICHEC	
	RCP4.5			RCP8.5			4,5	8,5	4,5	8,5	4,5	8,5
	Tendance	*p	2011-2100	Tendance	*p	2011-2100						
Total de pluie sur 24h > 10 mm (avr-mai)	---	0,168	1,2	---	0,071	1,7	---	---	---	---	---	↗
Total de pluie sur 48h > 15 mm (avr-mai)	---	0,443	1,0	↗	0,049	2,9	---	↗	↗	---	---	---
Total de pluie sur 72h > 20 mm (avr-mai)	---	0,439	1,3	↗	0,018	4,0	---	↗	↗	↗	---	---
Intensité de la pluie > 1 mm/h sur 12h (avr-mai)	↗	0,000	2,2	↗	0,001	2,4						
Intensité de la pluie > 1 mm/h sur 8h (avr-mai)	↗	0,008	1,5	↗	0,005	1,7						
Intensité de la pluie > 0,5 mm/h sur 24h (avr-mai)	---	0,111	0,6	↗	0,025	0,9						
Intensité de la pluie > 0,5 mm/h sur 48h (avr-mai)	↗	0,015	0,6	---	0,423	0,5						
Total de pluie sur 24h > 10 mm (juin-oct)	---	0,585	-0,4	---	0,721	1,3	---	---	---	---	---	---
Total de pluie sur 48h > 15 mm (juin-oct)	---	0,883	-0,5	---	0,481	2,5	---	---	---	---	---	---
Total de pluie sur 72h > 20 mm (juin-oct)	---	0,840	-0,3	---	0,313	2,8	---	---	---	---	---	---
Intensité de la pluie > 1 mm/h sur 12h (juin-oct)	---	0,791	1,6	↗	0,017	3,5						
Intensité de la pluie > 1 mm/h sur 8h (juin-oct)	---	0,844	0,9	↗	0,022	3,3						
Intensité de la pluie > 0,5 mm/h sur 24h (juin-oct)	---	0,544	1,0	↗	0,013	2,3						
Intensité de la pluie > 0,5 mm/h sur 48h (juin-oct)	---	0,175	0,6	---	0,127	0,7						
Total de neige sur 24h > 10 mm d'équivalent en eau (déc-avr)	↘	0,000	-3,3	↘	0,000	-4,1	↘	↘	↘	↘	---	↘
Total de neige sur 24h > 15 mm d'équivalent en eau (déc-avr)	↘	0,017	-1,1	↘	0,000	-1,6	↘	↘	---	↘	---	↘
Total de neige sur 48h > 20 mm d'équivalent en eau (déc-avr)	↘	0,011	-1,0	↘	0,000	-1,9	↘	↘	↘	↘	---	↘
Total de neige sur 72h > 25 mm d'équivalent en eau (déc-avr)	---	0,097	-0,3	↘	0,000	-3,2	↘	↘	↘	↘	---	↘
Total de pluie sur 24h > 1 mm (déc-avr)	↗	0,000	23,2	↗	0,000	34,6	↗	↗	↗	↗	---	↗
Total de pluie sur 24h > 5 mm (déc-avr)	↗	0,000	12,8	↗	0,000	18,0	↗	↗	↗	↗	---	↗
Total de pluie sur 24h > 1 mm (déc-avr)	↗	0,000	8,6	↗	0,000	10,4	↗	↗	↗	↗	---	↗

* p-value Mann-Kendall : >0,05 | 0,05-0,01 | <0,01

Tableau 9

Tendances climatiques issues des tests de Mann-Kendall effectués sur les données de température des projections climatiques. La colonne 2011-2100 contient la valeur des changements observés.

Variables	CRCM4						HIRHAM5		CanESM2		ICHEC	
	RCP4.5			RCP8.5			4,5	8,5	4,5	8,5	4,5	8,5
	Tendance	*p	2011-2100	Tendance	*p	2011-2100						
Nombre de jours où la température moyenne sur 24h > 0,5°C (déc-mars)	↗	0,000	38,3	↗	0,000	73,2	↗	↗	↗	↗	↗	↗
Nombre de jours où la température moyenne sur 48h > 0,5°C (déc-mars)	↗	0,000	42,4	↗	0,000	78,7	↗	↗	↗	↗	↗	↗
Nombre de jours où la température moyenne sur 72h > 0,5°C (déc-mars)	↗	0,000	44,7	↗	0,000	85,1	↗	↗	↗	↗	↗	↗
Durée moyenne des redoux (jours) (déc-mars)	↗	0,000	1,0	↗	0,000	2,7	↗	↗	↗	↗	↗	↗
Température maximale des redoux (°C) (déc-mars)	---	0,350	0,2	↗	0,000	1,0	↗	↗	↗	↗	---	↗
DJD maximal des redoux (déc-mars)	↗	0,000	77,4	↗	0,000	175,5	↗	↗	↗	↗	---	↗
Premier jour julien où DJD > 5°C	↘	0,000	-4,2	↘	0,001	-6,5	↘	↘	↘	↘	↘	↘
Premier jour julien où DJD > 25°C	↘	0,000	-18,3	↘	0,000	-21,8	↘	↘	↘	↘	↘	↘
Premier jour julien où DJD > 100°C	↘	0,000	-11,1	↘	0,000	-26,8	↘	↘	↘	↘	↘	↘
Premier jour julien du premier gel	↗	0,000	4,9	↗	0,000	7,3	↗	↗	↗	↗	↗	↗

* p-value Mann-Kendall : >0,05 | 0,05-0,01 | <0,01

2.2.5 Discussion

2.2.5.1 Impacts des changements climatiques sur la réponse hydrologique

Les stations hydrométriques du Centre d'Expertise Hydrique du Québec (CEHQ) du Nord de la Gaspésie (Sainte-Anne-des-Monts, York, Dartmouth) montrent un débit médian printanier largement supérieur aux débits automnaux. C'est aussi le cas pour le débit maximal atteint, même si la différence est de moindre amplitude. L'atlas hydroclimatique du Québec méridional (MELCCFP 2022) pointe vers une baisse des débits printaniers dans une majorité des rivières de la région (très probable) et une augmentation des débits estivaux et automnaux

(probable) d'ici 2100. Les données indiquent aussi qu'il est probable que le débit journalier maximal annuel de récurrence 5, 10, 20, 100 et 350 ans soient plus élevés dans les rivières principales. Il n'y a pas de consensus pour le débit journalier maximal de récurrence 2 ans. Par contre, comme les données de l'atlas ne tiennent pas compte des cours d'eau d'une superficie inférieure à 50 km² et que les données dans les plus petits cours d'eau sont quasi inexistantes, il faut inférer des conséquences à partir des données récoltées entre 2020 et 2023 et des projections climatiques.

Selon les données des printemps 2020, 2021 et 2022, la réponse hydrologique printanière est fortement induite par l'intrant en eau apporté par la fonte de la neige. En 2020 et 2022, les pics de crue sont survenus en même temps que des périodes plus chaudes alors qu'en 2021, ils étaient surtout liés à des événements de précipitations liquides qui ont accéléré la fonte. Le premier pic de crue printanier est arrivé plus tard en 2021 qu'en 2020. Les hauteurs d'eau atteintes lors des deux années ont été relativement similaires. Pourtant, les contextes météorologiques de ces deux crues étaient très différents: la hauteur de neige au premier avril était deux et cinq fois plus élevée dans la vallée et sur le plateau respectivement pour l'année 2020. Cette différence est expliquée par les deux périodes de redoux de décembre 2020 qui ont fait fondre l'entièreté de la neige tôt en saison. Cependant, les températures en avril 2021 étaient plus élevées que l'année précédente, apportant plutôt des précipitations liquides qui ont accéléré la fonte de la neige. Pour les trois ans de données, la réponse des niveaux d'eau à une crue printanière la plus forte a été enregistrée en 2022, même si les précipitations liquides étaient inférieures à celles de 2021. Ce pic de crue a été atteint à la deuxième semaine de mai après cinq jours consécutifs particulièrement chauds.

Les tendances extraites des données historiques de Cap-Madeleine indiquent que le printemps est plus hâtif aujourd'hui qu'il l'était en 1939, puisque les seuils de DJD sont dépassés plus tôt. Aussi, les périodes de redoux entre décembre et mars sont de plus en plus fréquentes alors que les tempêtes de neige le sont de moins en moins. Les événements de pluie en hiver sont également plus fréquents. Les mêmes tendances sont présentes dans les données de projections climatiques. Les crues printanières devraient donc diminuer en

intensité puisque la neige, qui représente l'intrant principal au printemps, sera évacuée du système plus fréquemment en hiver.

Le nord de la Gaspésie devrait connaître de deux à trois fois plus d'événements surpassant le seuil de déclenchement d'aléas hydrogéomorphologiques de la région d'ici 2100 (Boulet et al. 2022). De plus, comme les cyclones de très forte intensité devraient être plus fréquents, il sera de plus en plus probable de voir plusieurs événements torrentiels se succéder entre juillet et octobre. Un tel scénario n'est pas souhaitable. En effet, la réponse des cours d'eau aux événements torrentiels dépend non seulement de l'intensité et la quantité des précipitations, mais aussi des conditions antécédentes à l'événement. Aux États-Unis, les inondations à l'échelle régionale seraient plus probables de survenir dans des conditions antécédentes humides alors que les inondations locales peuvent se produire malgré des conditions antécédentes sèches (Brunner et Dougherty 2022). Toutefois, Bennett et al. (2018) ont montré que la relation entre le volume de l'inondation et les précipitations dépend fortement des conditions antécédentes du sol ; ces dernières pouvant faire augmenter le volume de l'inondation de plus de 50% pour des bassins versants aux superficies variées (étendue de 7 à 2670 km², médiane de 225 km²).

Les données récoltées dans la coulée à Layoutte semblent aussi illustrer l'importance des conditions antécédentes dans la réponse hydrologique. Par exemple, la tempête post-tropicale Ida de septembre 2021 a amené des précipitations hors normes dans le nord de la Gaspésie (> 200 mm) sans causer autant de dégâts que la tempête Arthur en 2014 (73 mm). L'explication la plus plausible est que le système a été capable d'absorber les précipitations apportées par Ida à cause du contexte hydrogéologique. D'abord, Arthur a affecté la péninsule gaspésienne tôt en saison (début juillet) alors que le niveau de l'eau souterraine n'avait pas encore atteint l'étiage suite à la crue printanière. Ensuite, le mois d'août précédent Ida a été très sec: 20 mm de pluie sont tombés alors que la normale se situe à 81 mm à Saint-Anne-des-Monts. Ce n'était pas le cas pour le mois de juin 2014, alors que les précipitations ont atteint 81 mm. Dans ces conditions, il est évident que la capacité des sols à absorber les précipitations apportées par la tempête était limitée lors d'Arthur et idéale au moment d'Ida.

L'importance des conditions antécédentes sur la réponse de la coulée à Layoutte est aussi révélée dans l'événement illustré à la Figure 27. Un événement de pluie de faible intensité, mais de longue durée, a entraîné une réponse importante des niveaux d'eau, particulièrement sur la portion amont du cône alluvial (MSPAP, MSPAM). La décrue s'est échelonnée sur une quinzaine de jours, la même durée que lors d'Ida, lors de cet événement de moindre envergure. On peut supposer qu'une succession d'événements torrentiels rapprochés et intenses pourrait accentuer le risque pour les résidents et les infrastructures situés à proximité des torrents.

Les Figure 28 et Figure 29 illustrent les crues que peuvent causer les redoux importants en hiver, comme c'est arrivé deux fois en décembre 2020. Dans les deux cas, des systèmes dépressionnaires ont apporté des précipitations liquides en quantité importante (> 20 mm) alors qu'il y avait de la neige au sol. Les niveaux d'eau ont rapidement augmenté aux quatre capteurs malgré le fait que la neige ait complètement disparu avant que les températures ne reviennent sous le point de congélation. Un événement comparable avec un peu plus de neige au sol aurait le potentiel de hausser les niveaux d'eau de manière plus importante encore.

Les données historiques de Cap-Madeleine montrent une hausse de la fréquence des périodes de redoux en hiver depuis 1939. Les modèles de projections climatiques indiquent non seulement une hausse de la fréquence, mais aussi de la durée et de l'intensité des périodes de redoux d'ici 2100. Ces redoux feront en sorte de limiter l'épaisseur du manteau neigeux tout au long de l'hiver. Les événements de pluie en hiver seraient aussi plus fréquents selon les deux sources de données. Il y aurait donc plus d'événements de pluie sur neige qui peuvent causer des crues importantes (Musselman et al. 2018). La diminution attendue de la quantité de neige en hiver et la hausse des températures lors des redoux feront en sorte que ces crues hivernales seraient plus intenses qu'elles peuvent l'être aujourd'hui. En effet, de la pluie sur un manteau neigeux plus chaud et plus mince apporte une plus grande contribution d'eau de fonte que sur un manteau neigeux épais et froid (Jennings et al. 2018; Brandt et al. 2022).

L'importance du cône alluvial dans la réponse hydrologique des cours d'eau torrentiels est observable lorsqu'on compare la réponse des niveaux d'eau des quatre capteurs lors de la crue printanière de 2021, des redoux de décembre 2020 et des deux événements de l'automne 2021. Au printemps, le niveau de la nappe d'eau souterraine est élevé puisqu'elle est rechargée par la fonte de la neige; le système est alors saturé. En hiver, l'eau présente dans le sol gèle et fait diminuer la capacité d'infiltration. Si un redoux survient, combiné à un événement de pluie important comme en décembre 2020, l'eau des précipitations et de la fonte nivale ne peut s'infiltrer et ruisselle en surface. C'est pour cette raison que les quatre capteurs ont enregistré une réponse forte au printemps et lors des redoux. Le contraire est observé lors de la tempête Ida. Les niveaux d'eau ont augmenté rapidement aux deux capteurs situés les plus en amont alors qu'ils sont restés bas dans la portion aval du cône alluvial. La tempête Ida a frappé après une période de sécheresse importante et il semble que le niveau de la nappe était suffisamment bas pour limiter les dégâts. L'eau a pu s'infiltrer entre les capteurs MSPAM et le pied du cône alluvial. Généralement, les cours d'eau à cône alluvial situés dans des environnements humides et tempérés répondent rapidement aux événements de précipitations ou aux hausses de débit parce qu'ils rechargent constamment l'aquifère du cône par infiltration à l'apex (Blackburn et al. 2021). La connexion entre le cours d'eau et les aquifères se fait plus rapidement qu'en milieu aride où elle se produit seulement lorsque les précipitations surpassent le taux d'infiltration du chenal (Goodrich et al. 2018). Il semble que le rôle des cônes alluviaux du nord de la Gaspésie dans la réponse hydrologique lors d'événements de crue dépende des conditions antécédentes à l'événement. Après des conditions particulièrement sèches, ils peuvent jouer le rôle de tampon dans la réponse en permettant à l'eau de s'infiltrer dans le chenal, atténuant les impacts potentiels sur les personnes et les infrastructures, comme pendant Ida. Au contraire, si la connexion entre le chenal et les aquifères est déjà présente, un événement intense peut avoir des impacts catastrophiques (Arthur).

2.2.5.2 Interactions entre la réponse hydrologique et la morphologie

La modification des réponses hydrologique et sédimentaire des cours d'eau torrentiels aura un impact non négligeable sur les cours d'eau des vallées principales. Les changements morphologiques qui peuvent se produire dépendent d'abord du transit sédimentaire vers le cours d'eau via les versants ou ses berges et à l'intérieur du chenal. Si aucun sédiment n'est mobilisé, l'eau s'écoulera sans avoir d'impact morphologique significatif. Puisque les sources de sédiments sont multiples et omniprésentes dans le nord de la Gaspésie, les cours d'eau de la région ne devraient pas manquer de sédiments à mobiliser à moyen terme.

Les confluences de cours d'eau sont reconnues comme des points chauds de changements morphologiques à l'échelle des réseaux de drainage (Czuba et Fofoula-Georgiou 2015). Le concept de liens sédimentaires introduit par Rice et Church (1998) lie l'apport en sédiments grossiers des tributaires à la distribution spatiale des tailles granulométriques amont – aval dans les rivières : un affinage graduel jusqu'au prochain lien sédimentaire. Les changements morphologiques à l'intérieur des petits cours d'eau à cône alluvial et en aval de ce dernier devraient donc être observables dans trois zones distinctes : en amont du cône alluvial, sur le cône et dans la rivière principale.

a) *EN AMONT DU CÔNE ALLUVIAL*

Deux sources principales de sédiments alimentent le cours d'eau en amont du cône alluvial : les dépôts de versant bordant le chenal et les berges du cours d'eau. Lors d'événements torrentiels, des aléas hydrogéomorphologiques (HGM), tels que les glissements de terrain superficiels ou les coulées de débris peuvent être déclenchés sur les versants à forte pente. Le contexte physiographique y est favorable puisqu'on trouve sur les versants une couche de till relativement mince déposée sur le roc ; l'interface entre les deux couches représente une zone d'écoulement préférentielle favorisant le déclenchement de ces aléas. Si l'intensité de l'événement de pluie dépasse le taux d'infiltration de la couche de till,

l'eau qui ne peut s'infiltrer ruisselle et peut aussi éroder en surface ou provoquer l'incision d'un nouveau chenal sur le versant.

Le développement d'un réseau de drainage plus étoffé diminue le temps de réponse du cours d'eau et peut augmenter la compétence et la capacité de l'écoulement dans le chenal. En effet, la canalisation de l'eau dans les nouveaux chenaux et l'augmentation de la quantité d'eau qui ruisselle directement sur le roc suite au déclenchement d'aléas HGM augmentent la sensibilité du bassin versant aux pluies torrentielles. Comme ces dernières sont généralement causées par des tempêtes post-tropicales qui seront plus fréquentes d'ici 2100 et que les seuils de déclenchement d'aléas HGM seront dépassés de 2 à 3 fois plus souvent (Boulet et al. 2022), il est probable qu'il y ait une accélération du transit sédimentaire du versant vers le chenal dans les cours d'eau torrentiels.

En Gaspésie, les crues printanières représentent le débit maximal atteint dans l'année dans les bassins versants où une station hydrométrique est installée (CEHQ). Cependant, malgré des conditions antécédentes atténuant la réponse hydrologique, le niveau d'eau le plus élevé mesuré en trois ans dans la partie amont du cône de la coulée à Layouthe concorde plutôt avec la tempête Ida. La hausse de la fréquence des tempêtes du même type et la diminution du temps de réponse des bassins versants devraient faire augmenter les débits de pointe des cours d'eau torrentiels dans le nord de la Gaspésie. L'augmentation de la capacité et de la compétence de l'écoulement feront en sorte que le cours d'eau pourrait mobiliser un volume plus grand de sédiments de plus grande taille. Une hausse des débits de pointe dans des cours d'eau ne pouvant pratiquement pas s'inciser pourrait aussi entraîner une augmentation de la largeur du cours d'eau et un apport sédimentaire accru des berges vers le chenal. Ces processus d'érosion peuvent ensuite causer une migration latérale qui a le potentiel de déstabiliser les versants et provoquer des mouvements de masses là où c'est possible. L'espace de mobilité de ces cours d'eau est toutefois limité par la proximité des versants qui les confinent.

b) *SUR LE CÔNE ALLUVIAL*

Un cône alluvial est une forme complexe construite sur une longue période par un cycle d'aggradation et d'avulsion à l'embouchure d'un bassin versant à forte pente. Les processus menant à sa construction amènent une diversité de tailles granulométriques qui se superposent par la migration des chenaux d'écoulement. La conductivité hydraulique des différentes strates est donc hétérogène et complexe. Les couches aux tailles plus grossières représentent des zones préférentielles d'écoulement ou d'infiltration, alors que les couches plus fines favorisent la migration latérale de l'écoulement de subsurface.

Les cônes alluviaux sont des zones d'accumulation de sédiments expliquées par la perte de compétence et de capacité du cours d'eau à la rupture de pente entre la vallée et la plaine alluviale de la rivière principale. L'intensité des processus d'aggradation et d'avulsion sur les cônes alluviaux est dictée par l'importance de l'apport sédimentaire provenant de l'amont. Puisque ce dernier devrait s'intensifier, il est probable que la mobilité des petits cours d'eau augmente sur les cônes alluviaux et provoque une intensification des processus déjà actifs. Un apport sédimentaire élevé combiné à une forte compétence peut provoquer une progradation du cône vers l'aval (Harvey 2012). Si la compétence de l'écoulement n'est pas suffisante, les processus de déposition de sédiments prendront le dessus et la probabilité d'avulsion sera plus élevée (Harvey 2012).

c) *DANS LA VALLÉE PRINCIPALE*

On trouve souvent à la confluence des petits cours d'eau à forte pente et des rivières dans lesquelles ils se jettent un banc de confluence (Figure 30) qui témoigne de l'importance des premiers dans la dynamique sédimentaire des deuxièmes et de la différence de compétence de l'écoulement des deux cours d'eau. Rice et Church (1998) ont mis de l'avant la notion de liens sédimentaires : un affinage de la taille granulométrique des sédiments composant le lit des rivières entre les différentes sources sédimentaires. Comme les tributaires représentent une importante source de sédiments pour les rivières du nord de la

Gaspésie, l'augmentation de leur apport sédimentaire devrait contribuer à augmenter la mobilité des rivières de la région. En effet, la croissance du banc de confluence pousse l'écoulement de la rivière sur sa berge concave et favorise la migration latérale du chenal à la confluence (Savi et al. 2020). Une modification de la sinuosité du tracé d'un tronçon de rivière peut aussi avoir des impacts morphologiques en aval (Howard et Knutson 1984) et en amont (Ikeda et al. 1981). Sur un territoire au relief important comme le nord de la Gaspésie, où les petits cours d'eau tributaires contribuent déjà au dynamisme des rivières des vallées principales (Mazgareanu et al. 2020), il est essentiel d'intégrer les effets des changements climatiques sur la dynamique sédimentaire pour une planification préventive et responsable de la gestion du territoire et des aléas.

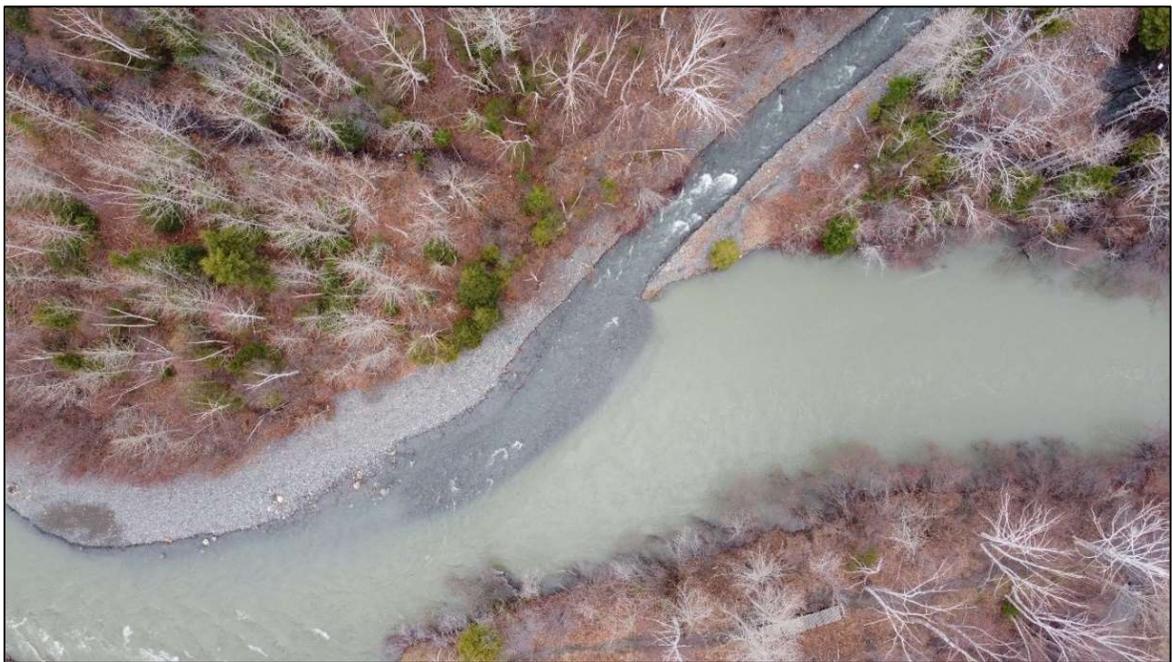


Figure 30. Banc de confluence de la coulée à Layouette dans la rivière Mont-Saint-Pierre

2.2.5.3 Modèle conceptuel

Que ce soit la balance de Lane (Lane 1955) ou la trinité de Leeder (Leeder 1983), les modèles conceptuels facilitent la transmission de connaissances et la compréhension de processus dans les milieux académiques, les firmes privées et les instances

gouvernementales. Bien que ce travail n'ait pas la prétention d'être dans le même groupe que ces deux exemples, il vise les mêmes objectifs. En utilisant des composantes d'un autre modèle conceptuel (le cycle hydrologique) et en intégrant des éléments de la dynamique sédimentaire, des données météorologiques et de projections climatiques, le modèle conceptuel proposé (Figure 32) permet d'initier des réflexions essentielles sur l'avenir de l'aménagement du territoire en exposant les impacts potentiels des changements climatiques sur la réponse hydrologique et la morphologie des cours d'eau torrentiels du nord de la Gaspésie. Les analyses ayant mené à ce modèle conceptuel arrivent aux mêmes conclusions que celles effectuées dans [Hirschberg et al. \(2021\)](#) en ce qui concerne la température, les précipitations et la capacité de transport des cours d'eau dans un contexte de changements climatiques. Toutefois, ces derniers concluent d'une diminution du recrutement de sédiments pour les altitudes inférieures à 2000 m et d'une augmentation pour les altitudes supérieures au même seuil. La différence entre les deux modèles peut sans doute être expliquée par le contexte physiographique qui diffère entre leur site d'étude et le nord de la Gaspésie. En effet, le seul processus de météorisation pris en compte dans la recharge sédimentaire de leur modèle est la cryoclastie, puisqu'ils sont en milieu alpin où les pentes sont élevées et la végétation ne couvre que 56% du bassin versant. D'ailleurs, la vallée d'Illgraben est reconnue pour avoir un débit solide (provenant principalement de coulées de débris) surpassant les standards alpins par deux ordres de magnitude ([Bennett et al. 2018](#)). Il est donc ardu de comparer les deux environnements lorsqu'il est question de transport sédimentaire.

Le modèle illustre également les perturbations anthropiques affectant la réponse hydrologique ou ayant le potentiel d'augmenter la sensibilité aux changements climatiques ([Young et al. 2019](#)) dans l'objectif d'informer les décideurs des impacts potentiels de la planification des interventions forestières et dans les cours d'eau. En effet, les plateaux du nord de la Gaspésie ont subi plusieurs interventions forestières dans les dernières années (Figure 31). Les perturbations forestières, qu'elles soient naturelles ou anthropiques, augmentent la connectivité sédimentaire entre les versants et le chenal dans les bassins versants forestiers ([Jautzy et al. 2021](#)). Aussi, les interventions visant à contrôler l'écoulement (ouvrages de protection, dragage, linéarisation) affectent la géométrie de la

section transversale des cours d'eau en imposant des dimensions qui ne sont pas naturelles. Dans le nord de la Gaspésie, ces interventions sont monnaie courante puisque les sédiments sont disponibles, l'énergie de relief y est forte et les résidences et les infrastructures routières sont construites à proximité des cours d'eau. Toutefois, en modifiant la section transversale, le cours d'eau s'ajustera avec le temps soit en profondeur (incision, aggradation), soit en largeur (érosion des berges) pour atteindre ses dimensions naturelles qui entraîneront de nouvelles interventions.

Malgré la documentation des torrents faite par le Conseil de l'Eau du Nord de la Gaspésie (CENG) et les entretiens réguliers des cours d'eau effectués par les municipalités, les inondations torrentielles sur les cônes alluviaux et les aléas HGM continuent de se produire et d'affecter les résidents et les infrastructures routières du nord de la Gaspésie. Les nouvelles conditions hydrométéorologiques à venir nécessitent que les petits cours d'eau soient davantage pris en compte dans la planification de l'aménagement et de la gestion du territoire, de même que dans l'adaptation aux changements climatiques. Le modèle proposé peut servir à la fois pour améliorer la compréhension des processus HGM présents dans les petits cours d'eau, mais aussi comme outil de réflexion pour orienter les actions à prendre à court terme pour limiter l'exposition des enjeux déjà présents sur le territoire aux aléas HGM et aux inondations qui y sont déclenchés. Un tel modèle permet l'intégration des composantes climatiques, hydrologiques et morphologiques dans un format pédagogique et éclairant pour les gestionnaires du territoire qui n'ont pas toujours accès à une expertise permettant d'aborder la question de la gestion des petits cours d'eau, des aléas qui y sont associés et des potentiels impacts des changements climatiques sur leur réponse lors d'événements de crue. Malgré le fait que les données pour les petits cours d'eau soient pratiquement inexistantes, la proposition de ce modèle conceptuel permet de faire une analyse préliminaire qui servira à guider les futurs travaux qui devront être faits pour en préciser les composantes. Toutefois, la prise en compte des petits cours d'eau dans l'aménagement et la gestion du territoire doit se faire dès maintenant.

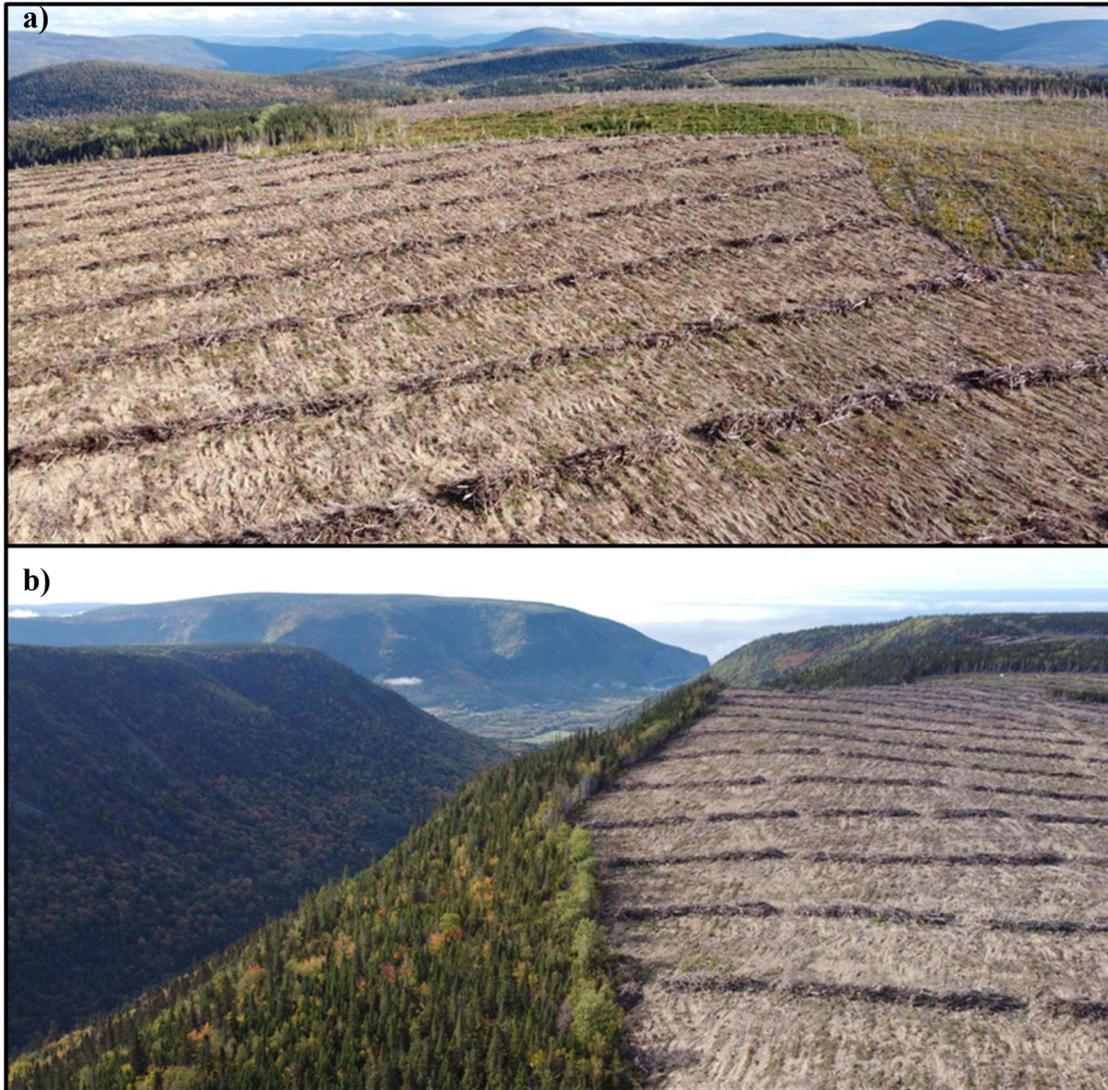


Figure 31. Photos du plateau entre Mont-Saint-Pierre et Mont-Louis a) Vers le sud b) Vers le nord-ouest en bordure de la coulée à Layoutte

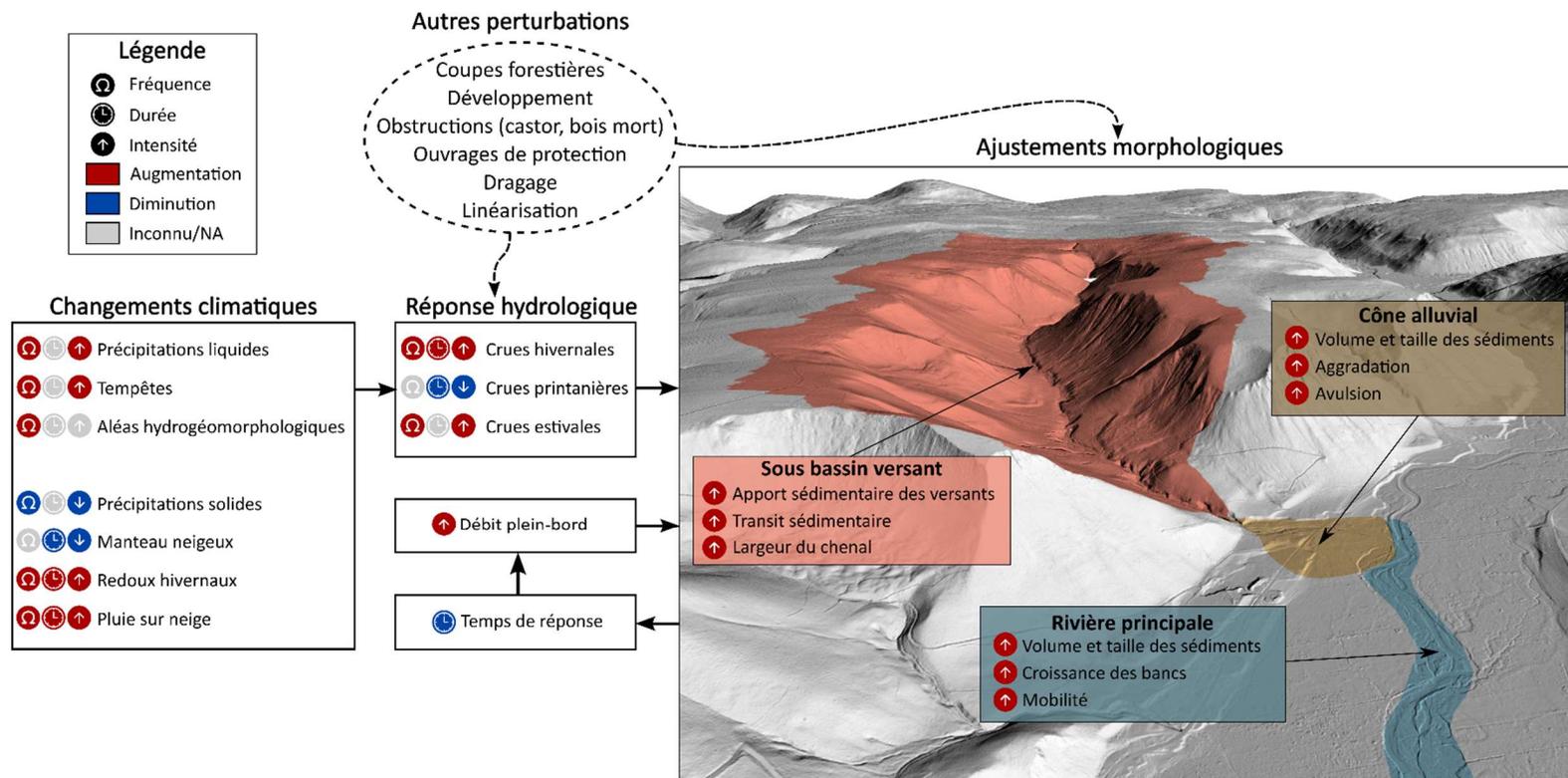


Figure 32. Modèle conceptuel proposé pour illustrer l'impact des changements climatiques sur les réponses hydrologiques et morphologiques des cours d'eau torrentiels du nord de la Gaspésie

Puisque les changements climatiques se produiront à une échelle qui dépasse largement la région étudiée, le modèle peut aider à poser des actions concrètes à l'échelle locale et régionale pour limiter la sensibilité des petits cours d'eau à leurs impacts, dont voici quelques exemples :

1. Sensibiliser les résidents aux risques posés par les crues torrentielles ;
2. Favoriser la conservation du couvert végétal sur les plateaux, les versants et en bordure des cours d'eau pour améliorer la résilience des systèmes ;
3. Lorsque possible, adapter les ponts et ponceaux traversant les cours d'eau torrentiels et les rivières affectées en tenant compte des impacts futurs soit en faisant des études tenant compte du climat futur ou en surdimensionnant l'ouvrage ;
4. Cesser la construction de résidences sur les cônes alluviaux ayant un potentiel d'activité ;
5. Limiter les interventions mécaniques dans les cours d'eau seulement lorsque c'est absolument nécessaire (protection de résidences ou de routes) ;
6. Tenir compte des dimensions naturelles des cours d'eau lorsqu'une intervention a lieu.

À plus long terme, les résidences déjà construites en bordure des torrents pourraient être déplacées ou adaptées pour faire face aux impacts des changements climatiques sur les inondations sur les cônes alluviaux qui sont déjà problématiques. En effet, les perturbations climatiques à venir ne feront qu'exacerber un problème déjà existant qui doit être pris en compte dans le développement du territoire et l'implantation d'infrastructures adaptées aux conditions hydrogéomorphologiques actuelles et à venir.

2.2.6 Conclusion

Les inondations ayant frappé le nord de la Gaspésie ces dernières décennies ont affecté les résidents et les infrastructures de manière importante. Les petits cours d'eau torrentiels sensibles aux événements de précipitations intenses ont causé des dégâts considérables, notamment lors de la tempête Arthur en 2014. La caractérisation d'événements connus dans les conditions climatiques actuelles et l'extraction de tendances dans les projections ont permis d'exposer une augmentation de la fréquence et de l'intensité de plusieurs composantes climatiques d'ici 2100 qui auront un effet sur les réponses hydrologique et morphologique des petits bassins versants du nord de la Gaspésie. En effet, les changements climatiques devraient entraîner une augmentation de la fréquence et de l'intensité des crues hivernales et estivales et une diminution de l'intensité des crues printanières. Les tempêtes seront plus fréquentes et intenses, ce qui fera augmenter le débit morphogène dans les petits cours d'eau du nord de la Gaspésie. La modification de la dynamique hydrosédimentaire entraînera des ajustements morphologiques de la tête du bassin versant jusqu'à la rivière principale dans laquelle le torrent se jette.

Les résultats obtenus et les éléments de discussion soulevés ont été intégrés dans un modèle conceptuel pouvant être utilisé comme outil préliminaire pour la gestion et l'aménagement du territoire des régions au contexte similaire au nord de la Gaspésie. Il s'agit d'un outil préliminaire parce que le manque d'instruments et de données permettant le suivi des petits cours d'eau fait en sorte de limiter les analyses pouvant être faites.

Pour améliorer la qualité du modèle, il serait nécessaire d'instrumenter plusieurs petits cours d'eau torrentiels avec des stations de jaugeage et de s'assurer de la proximité de stations météorologiques pour les analyses hydrologiques. Une caractérisation des sources de sédiments, comme une cartographie des dépôts de surface, de même qu'une analyse de la connectivité et du transport sédimentaire permettrait de mieux comprendre les processus ayant cours à la surface des cônes alluviaux et dans les cours d'eau. En attendant, la situation

nécessite des actions immédiates et le modèle conceptuel présenté plus haut permet de les initier dans un système de gouvernance qui prend souvent du temps à se mettre en marche.

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'énergie du relief, la nature et la disponibilité des sédiments ainsi que le contexte climatique du nord de la Gaspésie sont en grande partie responsables de la mobilité des rivières drainant le territoire. Le rôle de lien sédimentaire joué par les petits cours d'eau est essentiel à cette dynamique qui permet le maintien de la qualité des eaux de surface et d'une diversité de morphologies et d'habitats. Cependant, le déclenchement d'aléas HGM dans les bassins versants des petits cours d'eau du nord de la Gaspésie pose un risque pour les résidents et les infrastructures qui sont à proximité. Les changements climatiques vont avoir des impacts importants sur la dynamique hydrosédimentaire de la région. Il est donc essentiel de prendre en compte l'impact des petits cours d'eau sur cette dernière dans l'aménagement et la gestion du territoire, mais également d'évaluer les effets potentiels des changements climatiques projetés dans la planification de l'aménagement.

À l'échelle du Québec, l'instrumentation est largement insuffisante pour permettre une analyse fine de l'impact des changements climatiques sur la réponse des petits cours d'eau. En Gaspésie, la situation est encore pire alors seulement quelques instruments de mesure sont installés. De plus, ceux-ci sont situés en périphérie, près de la côte. Les deux chapitres articles proposés représentent l'initiation d'une réflexion sérieuse sur le sujet, bien que déductive compte tenu des limites imposées par les données disponibles.

Le premier chapitre article propose un seuil de déclenchement d'aléas HGM causés par des événements de pluie torrentielle adapté au nord de la Gaspésie. Ce seuil a permis d'isoler les événements déclencheurs des données de projections climatiques de précipitations et d'en extraire les tendances. Une augmentation de la fréquence de ces événements est observée pour les deux scénarios d'émissions (RCP4.5, RCP8.5). Plusieurs infrastructures devant permettre le libre passage de l'eau, comme les ponceaux, posent déjà un problème dans les conditions actuelles en se comblant de sédiments lors d'événements de crues. On sait que les

infrastructures dysfonctionnelles aggravent les problèmes liés aux crues torrentielles, qui seront plus fréquentes selon les projections climatiques.

L'utilisation du seuil de déclenchement peut permettre d'agir en amont d'événements importants en posant par exemple les actions suivantes :

- Avertissement aux résidents exposés ;
- Mise en place d'une patrouille pendant les événements torrentiels ;
- Planification d'interventions mécaniques permettant le libre passage de l'eau si le risque est avéré.

Par contre, la résolution spatiotemporelle des données de précipitations ne permet pas l'application du seuil et de la méthode pour les événements de très forte intensité et de courte durée, comme les cellules orageuses. Aussi, les données de précipitations des projections climatiques au pas de temps horaire n'étant disponibles que pour un seul modèle, la robustesse des analyses pourrait être améliorée en y ajoutant des données d'autres modèles lorsqu'elles seront disponibles. Enfin, l'identification des événements déclencheurs depuis 1979 dépend d'observations sur le terrain ; leur nombre est donc probablement sous-estimé, puisque certains ont pu avoir lieu sans qu'il y ait d'observateur présent.

Le deuxième chapitre article aborde la question de la dynamique hydrosédimentaire des petits cours d'eau du nord de la Gaspésie. Trois types d'événements de crues ont pu être mesurés dans la coulée à Layouthe : des crues printanières, des crues torrentielles, des crues causées par des redoux. Dans ce cas précis, le niveau d'eau le plus élevé mesuré est associé à une tempête post-tropicale (Ida) alors que les rivières atteignent généralement leur pic de crue au printemps. Les tendances calculées sur des paramètres hydrométéorologiques extraits des projections climatiques indiquent que l'intensité des crues printanières devrait diminuer alors que l'intensité et la fréquence des crues estivales, automnales et hivernales devraient augmenter. Cette modification du régime hydrologique causée par les changements climatiques a le potentiel de faire augmenter le débit morphogène du cours d'eau et de

modifier la dynamique hydrosédimentaire à l'échelle régionale. Le modèle conceptuel proposé illustre les ajustements morphologiques potentiels qui pourraient être observés.

En se basant sur ce modèle conceptuel, des recommandations sont émises dans une perspective de gestion et d'occupation du territoire pour limiter les impacts potentiels sur les résidents et les infrastructures. Comme les actions visant à atténuer l'intensité des changements climatiques doivent être prises à l'échelle globale, les recommandations tiennent plutôt compte du fait que les perturbations anthropiques augmentent la sensibilité des petits bassins versants aux changements climatiques pour accompagner les gestionnaires régionaux et municipaux.

Toutefois, l'absence de données historiques dans les petits cours d'eau, l'instrumentation d'un seul bassin versant affluent, bien que représentatif, et le faible nombre d'événements de crues mesurés limite l'étendue d'application d'un tel modèle. Le deuxième chapitre article pour objectif de sensibiliser et d'encourager le déploiement d'instruments, l'application de méthodes de suivi dans les petits cours d'eau et la prise en compte de la dynamique hydrosédimentaire actuelle et future dans la conception, la restauration et la construction des infrastructures et dans l'aménagement du territoire. L'intégration des conditions antécédentes (précipitations antérieures, teneur en eau du sol, sol gelé ou non, etc.) dans le développement des seuils de déclenchement et les analyses liées à la réponse hydrologique permettrait sans doute d'améliorer la compréhension des processus et le modèle conceptuel proposé.

En abordant les changements climatiques en deux temps, soit leurs impacts sur les événements de pluies torrentielles responsables du déclenchement des aléas HGM (1) et sur les réponses hydrologique et morphologique des petits cours d'eau (2), les résultats présentés dans ce mémoire permettent d'établir les bases d'une vision globale de la dynamique des petits cours d'eau et de l'importance de leur rôle dans la dynamique fluviale de la région. Les événements extrêmes frappent l'imaginaire lorsqu'ils affectent les populations, mais les processus qui leur sont associés ont cours même lorsque ce n'est pas le cas. La route que parcourt les sédiments, de la tête des sous bassins versants à l'embouchure des rivières se jetant dans les estuaires en passant par de multiples formes à plusieurs échelles spatiales et

temporelles est fonction de la connectivité sédimentaire. Des rivières dynamiques drainent le nord de la Gaspésie, une région à la connectivité sédimentaire forte et couverte de sources de sédiments abondantes et mobilisables par les écoulements compétents des petits cours d'eau à forte pente. Le rôle fondamental que ces derniers jouent dans la dynamique hydrosédimentaire rend indispensable leur intégration dans les discussions liées à l'adaptation aux changements climatiques.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Attal, Mikaël. 2017. « Linkage Between Sediment Transport and Supply in Mountain Rivers ». Dans *Gravel-Bed Rivers*, 329-53. John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781118971437.ch12>.
- Bennett, Bree, Michael Leonard, Yu Deng, et Seth Westra. 2018. « An empirical investigation into the effect of antecedent precipitation on flood volume ». *Journal of Hydrology* 567 (décembre):435-45. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.10.025>.
- Blackburn, Joel, Jean-Christophe Comte, Gez Foster, et Christopher Gibbins. 2021. « Hydrogeological Controls on the Flow Regime of an Ephemeral Temperate Stream Flowing across an Alluvial Fan ». *Journal of Hydrology* 595 (avril):125994. <https://doi.org/10/gnp2rq>.
- Borga, Marco, Markus Stoffel, Lorenzo Marchi, Francesco Marra, et Matthias Jakob. 2014. « Hydrogeomorphic Response to Extreme Rainfall in Headwater Systems: Flash Floods and Debris Flows ». *Journal of Hydrology* 518 (octobre):194-205. <https://doi.org/10/f6mvmc>.
- Bouchard, Marianne, et Maxime Boivin. 2023. « Dynamiques hydrogéomorphologiques historiques et actuelles d'une rivière perturbée par les activités de la drave et analyse des impacts d'un démantèlement de barrage ». *Canadian Geographies / Géographies canadiennes*. <https://doi.org/10.1111/cag.12851>.
- Boulet, Yan, Thomas Buffin-Belanger, Francis Gauthier, et Bernard Héту. 2022. « Seuils de précipitation, variabilité spatiotemporelle et tendances climatiques dans les pluies torrentielles en Haute-Gaspésie, Québec ». Dans *Cloutier, C., Turmel, D., Maghoul, P., et Locat, A., 2022. Comptes rendus de la 8e Conférence canadienne sur la géotechnique et les risques naturels: des géosciences innovantes pour demain., Québec, 668 pages. ISBN 978-2-9821051-0-2.*, 405-15. Québec, Canada.
- Brandt, W. Tyler, Kayden Haleakala, Benjamin J. Hatchett, et Ming Pan. 2022. « A Review of the Hydrologic Response Mechanisms During Mountain Rain-on-Snow ». *Frontiers in Earth Science* 10 (avril). <https://doi.org/10.3389/feart.2022.791760>.
- Brunner, Manuela I., et Erin M. Dougherty. 2022. « Varying Importance of Storm Types and Antecedent Conditions for Local and Regional Floods ». *Water Resources Research* 58 (12): e2022WR033249. <https://doi.org/10.1029/2022WR033249>.
- Buffin-Bélanger, T., et B. Héту. 2008. « Les risques d'inondation sur les cônes alluviaux dans l'est du Québec ». Dans *Comptes rendus de la 4ième Conférence canadienne sur les géorisques : des causes à la gestion*, 359-66. Québec: Presse de l'Université Laval.
- Buffin-Bélanger, Thomas. 2009. « The Study of Fluvial Hazards Using the Hydrogeomorphological Method : An Illustrated Exemple for the Valley of Rivière-

- Au-Renard, Quebec ». Affiche présenté à CANQUA-CGRG Biennial Meeting, Vancouver, mai 3.
- Caine, Nel. 1980. « The Rainfall Intensity - Duration Control of Shallow Landslides and Debris Flows ». *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography* 62 (1-2): 23-27. <https://doi.org/10/ggvxb4>.
- Caron Fournier, Emilie. 2009. « Stratigraphie, sédimentologie et dynamique d'un petit cône alluvial holocène du nord de la Gaspésie. » Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Rimouski.
- Chegwidden, Oriana S., David E. Rupp, et Bart Nijssen. 2020. « Climate Change Alters Flood Magnitudes and Mechanisms in Climatically-Diverse Headwaters across the Northwestern United States ». *Environmental Research Letters* 15 (9): 094048. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab986f>.
- Ciach, Grzegorz J., et Witold F. Krajewski. 2006. « Analysis and modeling of spatial correlation structure in small-scale rainfall in Central Oklahoma ». *Advances in Water Resources* 29 (10): 1450-63. <https://doi.org/10/cvwh4q>.
- Conseil de l'eau du Nord de la Gaspésie. 2016. *Plan directeur de l'eau*.
- Crosta, Giovanni, et P. Frattini. 2001. « Rainfall thresholds for triggering soil slips and debris flow ». *Proceedings of the 2nd EGS Plinius Conference on Mediterranean Storms*, janvier, 463-87.
- Czuba, Jonathan A., et Efi Foufoula-Georgiou. 2015. « Dynamic Connectivity in a Fluvial Network for Identifying Hotspots of Geomorphic Change ». *Water Resources Research* 51 (3): 1401-21. <https://doi.org/10.1002/2014WR016139>.
- Davis, Robert S. 2001. « Flash Flood Forecast and Detection Methods ». Dans *Severe Convective Storms*, édité par Charles A. Doswell, 481-525. Meteorological Monographs. Boston, MA: American Meteorological Society. https://doi.org/10.1007/978-1-935704-06-5_12.
- Downing, J.A., J.J. Cole, C.M. Duarte, J.J. Middelburg, J.M. Melack, Y.T. Prairie, P. Kortelainen, R.G. Striegl, W.H. McDowell, et L.J. Tranvik. 2012. « Global abundance and size distribution of streams and rivers ». *Inland Waters* 2 (4): 229-36. <https://doi.org/10.5268/IW-2.4.502>.
- Drejza, Susan, Pascal Bernatchez, Guillaume Marie, et Stéphanie Friesinger. 2019. « Quantifying road vulnerability to coastal hazards: Development of a synthetic index ». *Ocean & Coastal Management* 181 (novembre):104894. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.104894>.
- Dumais, Pierre. 2000. « The La Martre and Mitis Late Paleoindian Sites: A Reflection on the Peopling of Southeastern Quebec ». *Archaeology of Eastern North America* 28:81-112.
- Dumont, Frédérique, et Thomas Buffin-Belanger. 2022. « Portrait des risques liés aux inondations dans les bassins versants des rivières Mitis et Coaticook à partir des données d'aide financière versée à la suite d'inondations depuis 1990 ». Dans *Les inondations au Québec*, Buffin-Bélanger, T., Maltais, D., Gauthier, M., 131-50. Science régionale. Presses de l'Université du Québec.

- Dunne, Thomas, Weihua Zhang, et Brian F. Aubry. 1991. « Effects of Rainfall, Vegetation, and Microtopography on Infiltration and Runoff ». *Water Resources Research* 27 (9): 2271-85. <https://doi.org/10/cxhv57>.
- Dust, David, et Ellen Wohl. 2012. « Conceptual model for complex river responses using an expanded Lane's relation ». *Geomorphology* 139 (février). <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.10.008>.
- Fallu, Jean-Marie. 2004. *Une histoire d'appartenance: La Gaspésie*. Les Éditions GID. Vol. 7. Sainte-Foy (Québec).
- Finn, Debra S., Núria Bonada, Cesc Múrria, et Jane M. Hughes. 2011. « Small but mighty: headwaters are vital to stream network biodiversity at two levels of organization ». *Journal of the North American Benthological Society* 30 (4): 963-80. <https://doi.org/10.1899/11-012.1>.
- Forbes, Katharine A., Stefan W. Kienzle, Craig A. Coburn, James M. Byrne, et Joseph Rasmussen. 2011. « Simulating the Hydrological Response to Predicted Climate Change on a Watershed in Southern Alberta, Canada ». *Climatic Change* 105 (3): 555-76. <https://doi.org/10.1007/s10584-010-9890-x>.
- Fortin, G, B Hétu, F Gauthier, et D Germain. 2015. « Extrêmes météorologiques et leurs impacts géomorphologiques: le cas de la Gaspésie ». *Proceedings of the Association Internationale de Climatologie, Liège, Belgique*, 469-74.
- Gauthier, Francis, Guillaume Fortin, Thomas Buffin-Bélanger, Maxime Boivin, Bernard Hétu, Antoine Morissette, et Daniel Germain. 2015. « Les aléas naturels reliés à l'occurrence de la tempête post-tropicale Arthur du 4 au 6 juillet 2014 : caractéristiques des précipitations et ses enseignements ». Dans .
- Gauthier, Francis, Jacob Laliberté, Tom Birien, Yan Boulet, Francis Meloche, et Thomas Buffin-Bélanger. 2022. « Influence des variables météorologiques et des changements climatiques sur l'occurrence, la fréquence et la magnitude des mouvements de versant (avalanche de neige, chute de blocs de glace et chute de pierre) affectant certains tronçons des routes 132 et 198 dans le nord de la Gaspésie ». Rapport final 798. Université du Québec à Rimouski.
- Giorgi, Filippo, Francesca Raffaele, et Erika Coppola. 2019. « The Response of Precipitation Characteristics to Global Warming from Climate Projections ». *Earth System Dynamics* 10 (1): 73-89. <https://doi.org/10/gng67v>.
- Glade, T., M. Crozier, et P. Smith. 2000. « Applying Probability Determination to Refine Landslide-Triggering Rainfall Thresholds Using an Empirical "Antecedent Daily Rainfall Model" ». *Pure and Applied Geophysics* 157 (6): 1059-79. <https://doi.org/10/bxk27q>.
- Goldenberg, Stanley, Christopher Landsea, Alberto Mestas-Nunez, et William Gray. 2001. « The Recent Increase in Atlantic Hurricane Activity: Causes and Implication ». *Science* 293 (juillet):474-79. <https://doi.org/10/d9b56j>.
- Goodrich, D.c., W.g. Kepner, L.r. Levick, et P.j. Wigington Jr. 2018. « Southwestern Intermittent and Ephemeral Stream Connectivity ». *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 54 (2): 400-422. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12636>.

- Guzzetti, Fausto, Silvia Peruccacci, Mauro Rossi, et Colin Stark. 2007. « Rainfall thresholds for the initiation of landslides in Central and Southern Europe ». *Meteorology and Atmospheric Physics* 98 (décembre):239-67. <https://doi.org/10/fq4wkj>.
- . 2008. « The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: An update ». *Landslides* 5 (février):3-17. <https://doi.org/10/cmntjn>.
- Harvey, Adrian M. 2012. « The Coupling Status of Alluvial Fans and Debris Cones: A Review and Synthesis ». *Earth Surface Processes and Landforms* 37 (1): 64-76. <https://doi.org/10.1002/esp.2213>.
- Hayhoe, Katharine, Cameron Wake, Bruce Anderson, Xin-Zhong Liang, Edwin Maurer, Jinhong Zhu, James Bradbury, Art DeGaetano, Anne Marie Stoner, et Donald Wuebbles. 2008. « Regional Climate Change Projections for the Northeast USA ». *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 13 (5): 425-36. <https://doi.org/10/b9rhgf>.
- Héту, Bernard, et James Gray. 1985. « Le modelé glaciaire du centre de la Gaspésie septentrionale, Québec ». *Géographie physique et Quaternaire* 39 (1): 47-66. <https://doi.org/10.7202/032584ar>.
- . 2000. « Les étapes de la déglaciation dans le nord de la Gaspésie (Québec) : les marges glaciaires des dryas ancien et récent ». *Géographie physique et Quaternaire* 54 (1): 5-40. <https://doi.org/10.7202/004831ar>.
- Héту, Bernard, Antoine Morissette, Francis Gauthier, Guillaume Fortin, Daniel Germain, Thomas Buffin-Bélanger, et Maxime Boivin. 2015. « Les aléas naturels reliés à l'occurrence des fortes pluies en Gaspésie depuis 1979 : torrentialité, coulées de débris et glissements superficiels ». Dans .
- Héту, Bernard, et Pierre Vandelac. 1989. « La dynamique des éboulis schisteux au cours de l'hiver, Gaspésie septentrionale, Québec ». *Géographie physique et Quaternaire* 43 (3): 389-406. <https://doi.org/10/ghd6bc>.
- Hirschberg, Jacob, Simone Fatichi, Georgina L. Bennett, Brian W. McArdell, Nadav Peleg, Stuart N. Lane, Fritz Schlunegger, et Peter Molnar. 2021. « Climate Change Impacts on Sediment Yield and Debris-Flow Activity in an Alpine Catchment ». *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 126 (1): e2020JF005739. <https://doi.org/10.1029/2020JF005739>.
- Hotaling, Scott, Debra S. Finn, J. Joseph Giersch, David W. Weisrock, et Dean Jacobsen. 2017. « Climate Change and Alpine Stream Biology: Progress, Challenges, and Opportunities for the Future ». *Biological Reviews* 92 (4): 2024-45. <https://doi.org/10.1111/brv.12319>.
- Howard, Alan D., et Thomas R. Knutson. 1984. « Sufficient Conditions for River Meandering: A Simulation Approach ». *Water Resources Research* 20 (11): 1659-67. <https://doi.org/10.1029/WR020i011p01659>.
- Ikeda, Syunsuke, Gary Parker, et Kenji Sawai. 1981. « Bend Theory of River Meanders. Part 1. Linear Development ». *Journal of Fluid Mechanics* 112 (novembre):363-77. <https://doi.org/10.1017/S0022112081000451>.
- Innes, John L. 1983. « Debris Flows ». *Progress in Physical Geography: Earth and Environment* 7 (4): 469-501. <https://doi.org/10.1177/030913338300700401>.

- Jautzy, Timothée, Maxime Maltais, et Thomas Buffin-Bélanger. 2021. « Interannual Evolution of Hydrosedimentary Connectivity Induced by Forest Cover Change in a Snow-dominated Mountainous Catchment ». *Land Degradation & Development* 32 (7): 2318-35. <https://doi.org/10.1002/ldr.3902>.
- Jeannotte, Richard, Donald Jeannotte, Danielle E. Cyr, et Troy Jerome. 2016. *Nta'tugwaqanminen Our Story: Evolution of the Gespe'gewa'gi Mi'gmaq*. Fernwood Publishing.
- Jennings, Keith S., Taylor S. Winchell, Ben Livneh, et Noah P. Molotch. 2018. « Spatial Variation of the Rain–Snow Temperature Threshold across the Northern Hemisphere ». *Nature Communications* 9 (1): 1148. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-03629-7>.
- Keim, R. F., A. E. Skaugset, et M. Weiler. 2006. « Storage of Water on Vegetation under Simulated Rainfall of Varying Intensity ». *Advances in Water Resources* 29 (7): 974-86. <https://doi.org/10/fgwbmq>.
- Kendall, M.G. 1948. *Rank correlation methods*. Rank correlation methods. Oxford, England: Griffin.
- Kingston, D. G., et R. G. Taylor. 2010. « Sources of Uncertainty in Climate Change Impacts on River Discharge and Groundwater in a Headwater Catchment of the Upper Nile Basin, Uganda ». *Hydrology and Earth System Sciences* 14 (7): 1297-1308. <https://doi.org/10.5194/hess-14-1297-2010>.
- Köplin, N., B. Schädler, D. Viviroli, et R. Weingartner. 2012. « Relating Climate Change Signals and Physiographic Catchment Properties to Clustered Hydrological Response Types ». *Hydrology and Earth System Sciences* 16 (7): 2267-83. <https://doi.org/10.5194/hess-16-2267-2012>.
- Krajewski, Witold F., Grzegorz J. Ciach, et Emad Habib. 2003. « An analysis of small-scale rainfall variability in different climatic regimes ». *Hydrological Sciences Journal* 48 (2): 151-62. <https://doi.org/10/bdgrcc>.
- Laloyaux, Patrick, Eric de Boisseson, Magdalena Balmaseda, Jean-Raymond Bidlot, Stefan Broennimann, Roberto Buizza, Per Dalhgren, et al. 2018. « CERA-20C: A Coupled Reanalysis of the Twentieth Century ». *Journal of Advances in Modeling Earth Systems* 10 (5): 1172-95. <https://doi.org/10.1029/2018MS001273>.
- Landry, Bruno, Jean Beaulieu, Michel Gauthier, Marc Lucotte, Matthieu Moingt, Serge Occhietti, Daniele L. Pinti, et Marco Quirion. 2012. *Notions de géologie 4e édition*. Modulo. Montréal.
- Lane, E.W. 1955. « The importance of fluvial morphology in hydraulic engineering ». *American Society of Civil Engineers Proceedings Separate* 81 (745): 1-17.
- Lavoie, Juliette, Pascal Bourgault, Trevor James Smith, Travis Logan, Martin Leduc, Louis-Philippe Caron, Sarah Gammon, et Marco Braun. 2024. « An Ensemble of Bias-Adjusted CMIP6 Climate Simulations Based on a High-Resolution North American Reanalysis ». *Scientific Data* 11 (1): 64. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02855-z>.
- Leeder, M. R. 1983. « On the Interactions between Turbulent Flow, Sediment Transport and Bedform Mechanics in Channelized Flows ». Dans *Modern and Ancient Fluvial Systems*, 3-18. John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781444303773.ch1>.

- Leonarduzzi, Elena, et Peter Molnar. 2020. « Deriving Rainfall Thresholds for Landsliding at the Regional Scale: Daily and Hourly Resolutions, Normalisation, and Antecedent Rainfall ». *Natural Hazards and Earth System Sciences* 20 (11): 2905-19. <https://doi.org/10/gn34z3>.
- Leonarduzzi, Elena, Peter Molnar, et Brian W. McArdell. 2017. « Predictive Performance of Rainfall Thresholds for Shallow Landslides in Switzerland from Gridded Daily Data ». *Water Resources Research* 53 (8): 6612-25. <https://doi.org/10/gbxs2r>.
- Lopez-Cantu, Tania, Andreas F. Prein, et Constantine Samaras. 2020. « Uncertainties in Future U.S. Extreme Precipitation From Downscaled Climate Projections ». *Geophysical Research Letters* 47 (9): e2019GL086797. <https://doi.org/10/gnvxsb>.
- Ly, Sarann, Catherine Charles, et Aurore Degré. 2013. « Different Methods for Spatial Interpolation of Rainfall Data for Operational Hydrology and Hydrological Modeling at Watershed Scale. A Review ». *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.*, 15.
- MacDonald, Lee H., et Drew Coe. 2007. « Influence of Headwater Streams on Downstream Reaches in Forested Areas ». *Forest Science* 53 (2): 148-68. <https://doi.org/10.1093/forestscience/53.2.148>.
- Maltais, Maxime. 2019. « Évolution spatiale et temporelle de la dynamique du bois mort en rivière, Mont-Louis, Gaspésie ». Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Rimouski. <http://rgdoi.net/10.13140/RG.2.2.23150.15685>.
- Maltais, Maxime, Thomas Buffin-Belanger, et Maxime Boivin. 2022. « Aléas fluviaux des cours d'eau mobiles dans l'Est du Québec ». Dans *Les inondations au Québec*, Buffin-Bélanger, T., Maltais, D., Gauthier, M., 59-86. Science régionale. Presses de l'Université du Québec.
- Mann, Henry B. 1945. « Nonparametric Tests Against Trend ». *Econometrica* 13 (3): 245-59. <https://doi.org/10.2307/1907187>.
- Mann, Michael E., et Kerry A. Emanuel. 2006. « Atlantic Hurricane Trends Linked to Climate Change ». *Eos, Transactions American Geophysical Union* 87 (24): 233-41. <https://doi.org/10/dzfq9>.
- Marra, F., Elisa Destro, Efthymios I. Nikolopoulos, Davide Zoccatelli, Jean Dominique Creutin, Fausto Guzzetti, et Marco Borga. 2017. « Impact of Rainfall Spatial Aggregation on the Identification of Debris Flow Occurrence Thresholds ». *Hydrology and Earth System Sciences* 21 (9): 4525-32. <https://doi.org/10/gbxmss>.
- Marra, F., E. I. Nikolopoulos, J. D. Creutin, et M. Borga. 2016. « Space–time organization of debris flows-triggering rainfall and its effect on the identification of the rainfall threshold relationship ». *Journal of Hydrology* 541:246-55. <https://doi.org/10/f885pd>.
- Mazgareanu, Iulia, Pascale M. Biron, et Thomas Buffin-Bélanger. 2020. « A fuzzy GIS model to determine confluence morphological sensitivity to tributary inputs at the watershed scale ». *Geomorphology* 357 (mai):107095. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107095>.
- Mearns, Linda, Seth McGinnis, Daniel Korytina, Raymond Arritt, Sébastien Biner, Melissa Bukovsky, Hsin-I Chang, et al. 2017. « The NA-CORDEX Dataset ». netCDF. [object Object]. <https://doi.org/10.5065/D6SJ1JCH>.

- MELCC. 2022. « Données de l'Atlas hydroclimatique méridional 2022 ». Québec: Direction de l'expertise hydrique.
- Moraga, Jorge Sebastián, Nadav Peleg, Simone Fatichi, Peter Molnar, et Paolo Burlando. 2021. « Revealing the impacts of climate change on mountainous catchments through high-resolution modelling ». *Journal of Hydrology* 603 (décembre):126806. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126806>.
- Musselman, Keith N., Flavio Lehner, Kyoko Ikeda, Martyn P. Clark, Andreas F. Prein, Changhai Liu, Mike Barlage, et Roy Rasmussen. 2018. « Projected Increases and Shifts in Rain-on-Snow Flood Risk over Western North America ». *Nature Climate Change* 8 (9): 808-12. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0236-4>.
- Napoli, Anna, Alice Crespi, Francesco Ragone, Maurizio Maugeri, et Claudia Pasquero. 2019. « Variability of orographic enhancement of precipitation in the Alpine region ». *Scientific Reports* 9 (1): 13352. <https://doi.org/10/ghvh7j>.
- Oliveira, Vinícius Augusto de, Carlos Rogério de Mello, Samuel Beskow, Marcelo Ribeiro Viola, et Raghavan Srinivasan. 2019. « Modeling the effects of climate change on hydrology and sediment load in a headwater basin in the Brazilian Cerrado biome ». *Ecological Engineering* 133 (août):20-31. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.04.021>.
- Parsons, A. J., et P. M. Stone. 2006. « Effects of Intra-Storm Variations in Rainfall Intensity on Interrill Runoff and Erosion ». *CATENA* 67 (1): 68-78. <https://doi.org/10/bwsff3>.
- Peel, M. C., B. L. Finlayson, et T. A. McMahon. 2007. « Updated World Map of the Köppen-Geiger Climate Classification ». *Hydrology and Earth System Sciences* 11 (5): 1633-44. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>.
- Pelletier, Tommy Simon. 2012. « Le barachois de Mont-Louis, un témoin privilégié des pêcheries sédentaires dans le Canada de la Nouvelle-France ». Mémoire de maîtrise en archéologie, Québec: Université Laval.
- Prein, Andreas F., Changhai Liu, Kyoko Ikeda, Stanley B. Trier, Roy M. Rasmussen, Greg J. Holland, et Martyn P. Clark. 2017. « Increased Rainfall Volume from Future Convective Storms in the US ». *Nature Climate Change* 7 (12): 880-84. <https://doi.org/10.1038/s41558-017-0007-7>.
- Rasouli, Kabir, John W. Pomeroy, J. Richard Janowicz, Sean K. Carey, et Tyler J. Williams. 2014. « Hydrological Sensitivity of a Northern Mountain Basin to Climate Change ». *Hydrological Processes* 28 (14): 4191-4208. <https://doi.org/10.1002/hyp.10244>.
- Rice, Stephen, et Michael Church. 1998. « Grain Size along Two Gravel-Bed Rivers: Statistical Variation, Spatial Pattern and Sedimentary Links ». *Earth Surface Processes and Landforms* 23 (4): 345-63. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199804\)23:4<345::AID-ESP850>3.0.CO;2-B](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199804)23:4<345::AID-ESP850>3.0.CO;2-B).
- Saunders, Mark A., et Adam S. Lea. 2008. « Large Contribution of Sea Surface Warming to Recent Increase in Atlantic Hurricane Activity ». *Nature* 451 (7178): 557-60. <https://doi.org/10/fqk66m>.
- Savi, Sara, Stefanie Tofelde, Andrew D. Wickert, Aaron Bufe, Taylor F. Schildgen, et Manfred R. Strecker. 2020. « Interactions between Main Channels and Tributary Alluvial Fans: Channel Adjustments and Sediment-Signal Propagation ». *Earth Surface Dynamics* 8 (2): 303-22. <https://doi.org/10.5194/esurf-8-303-2020>.

- Strahler, Arthur N. 1952. « Dynamic Basis of Geomorphology ». *Geological Society of America Bulletin* 63 (9): 923. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1952\)63\[923:DBOG\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1952)63[923:DBOG]2.0.CO;2).
- Syed, Kamran H., David C. Goodrich, Donald E. Myers, et Soroosh Sorooshian. 2003. « Spatial Characteristics of Thunderstorm Rainfall Fields and Their Relation to Runoff ». *Journal of Hydrology* 271 (1-4): 1-21. <https://doi.org/10/d6ttnn>.
- Tsegaw, Aynalem T., Marie Pontoppidan, Erle Kristvik, Knut Alfredsen, et Tone M. Muthanna. 2020. « Hydrological Impacts of Climate Change on Small Ungauged Catchments – Results from a Global Climate Model–Regional Climate Model–Hydrologic Model Chain ». *Natural Hazards and Earth System Sciences* 20 (8): 2133-55. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-2133-2020>.
- Vaz, Teresa, José Luís Zêzere, Susana Pereira, Sérgio Cruz Oliveira, Ricardo A. C. Garcia, et Ivânia Quaresma. 2018. « Regional Rainfall Thresholds for Landslide Occurrence Using a Centenary Database ». *Natural Hazards and Earth System Sciences* 18 (4): 1037-54. <https://doi.org/10/gdc5d2>.
- Veillette, J. J., et M. Cloutier. 1993. « Géologie des formations en surface, Gaspésie, Québec ». Carte. Gaspésie: Natural Resources Canada. <https://ostrnrcan-dostrnrcan.canada.ca/handle/1845/194893>.
- Vimont, Daniel J., et James P. Kossin. 2007. « The Atlantic Meridional Mode and Hurricane Activity ». *Geophysical Research Letters* 34 (7). <https://doi.org/10/bcj5z6>.
- Walsh, Kevin J.E., John L. McBride, Philip J. Klotzbach, Sethurathinam Balachandran, Suzana J. Camargo, Greg Holland, Thomas R. Knutson, et al. 2016. « Tropical Cyclones and Climate Change ». *WIREs Climate Change* 7 (1): 65-89. <https://doi.org/10.1002/wcc.371>.
- Wasko, Conrad, Rory Nathan, Lina Stein, et Declan O’Shea. 2021. « Evidence of shorter more extreme rainfalls and increased flood variability under climate change ». *Journal of Hydrology* 603 (décembre):126994. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126994>.
- Wickert, Andrew D., John M. Martin, Michal Tal, Wonsuck Kim, Ben Sheets, et Chris Paola. 2013. « River Channel Lateral Mobility: Metrics, Time Scales, and Controls ». *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 118 (2): 396-412. <https://doi.org/10.1029/2012JF002386>.
- Wohl, Ellen. 2017. « The Significance of Small Streams ». *Frontiers of Earth Science* 11 (3): 447-56. <https://doi.org/10.1007/s11707-017-0647-y>.
- Worqlul, Abeyou Wale, Yihun Taddele Dile, Essayas Kaba Ayana, Jaehak Jeong, Anwar Assefa Adem, et Thomas Gerik. 2018. « Impact of Climate Change on Streamflow Hydrology in Headwater Catchments of the Upper Blue Nile Basin, Ethiopia ». *Water* 10 (2): 120. <https://doi.org/10.3390/w10020120>.
- Young, David, Nicolas Zégre, Pamela Edwards, et Rodrigo Fernandez. 2019. « Assessing streamflow sensitivity of forested headwater catchments to disturbance and climate change in the central Appalachian Mountains region, USA ». *Science of The Total Environment* 694 (décembre):133382. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.188>.

