

Centre Eau Terre Environnement

ÉVALUATION DU POTENTIEL DE COLONISATION DE NOUVELLES RIVIÈRES AU NUNAVIK PAR LE SAUMON ATLANTIQUE (*SALMO SALAR*) EN RÉPONSE AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Par
Philippe Poulin

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de
Maître ès Sciences (M.Sc.)
en sciences de l'eau

Jury d'évaluation

Président du jury et
examineur interne

Eva Enders
INRS – Centre Eau Terre Environnement

Examineur externe

Julien April
Université Laval
Ministère de l'Environnement, de la Lutte
contre les changements climatiques, de la
Faune et des Parcs

Directeur de recherche

André Saint-Hilaire
INRS – Centre Eau Terre Environnement

Codirecteur de recherche

Normand E. Bergeron
INRS – Centre Eau Terre Environnement

REMERCIEMENTS

Cette maîtrise a été une opportunité pour approfondir mes connaissances sur les milieux aquatiques et m'initier au monde de la recherche, mais aussi un défi de taille pour apprendre la programmation et la modélisation. Je tiens à remercier mes directeurs, André St-Hilaire et Normand Bergeron, pour le partage de leurs connaissances, leur confiance et leur patience. Cette maîtrise a été réalisée grâce à la subvention de La Fondation pour la conservation du saumon atlantique que je remercie. Merci également au professeur Saeid Homayouni pour ses excellents cours de télédétection grâce auxquels j'ai développé une nouvelle passion, à Ujaval Gandhi pour les cours de programmation Python et de Google Earth Engine, à Claudine Boyer pour son aide avec la modélisation des températures de l'eau, à Anik Daigle pour ses conseils pertinents sur les données thermiques Landsat, à Véronique Dubos pour l'accueil à l'INRS, à mes collègues de travail Inuit à Kuujuaq pour le partage de leurs savoirs sur le saumon au Nunavik, à Eva Enders et Julien April pour l'évaluation de mon mémoire. Finalement, je suis grandement reconnaissant envers ma conjointe pour m'avoir encouragé à persévérer et soutenu tout au long de ce projet.



RÉSUMÉ

Au Nunavik, le saumon atlantique (*Salmo salar*) est à la limite nord de sa répartition avec les populations établies dans quatre grands bassins versants du sud de la baie d'Ungava. Il est absent des rivières plus au nord en raison des températures de l'eau trop froides. Cependant, en réponse à l'augmentation attendue des températures des rivières, causée par les changements climatiques, il est probable que l'espèce colonise de nouvelles rivières dans la région. Pour déterminer quelles rivières pourraient être colonisées d'ici la fin du siècle, des indicateurs thermiques ont été calculés à partir de la modélisation des températures de l'eau historiques et futures des rivières accessibles avec le modèle additif généralisé et des températures de l'eau estimées par télédétection thermique étant donné le faible nombre d'observations de température de l'eau. Les rivières du sud de la baie d'Ungava et le cours principal de la rivière Arnaud sont les plus susceptibles d'être colonisées par le saumon, car elles sont accessibles, proches des populations de saumon déjà établies et auront des indicateurs de croissance similaires à ceux des rivières à saumons actuelles du Nunavik peu importe les scénarios d'émission de gaz à effet de serre utilisés dans les simulations climatiques (ssp2-4.5 et ssp5-8.5). En revanche, il est moins probable que le saumon colonise des rivières de la baie d'Hudson, car plusieurs rivières sont inaccessibles et les populations anadromes de saumon sont beaucoup plus éloignées.

Mots-clés : saumon atlantique, Nunavik, changements climatiques, modélisation des températures en rivières, modèle additif généralisé, télédétection thermique Landsat, accessibilité des rivières, diffluence.

ABSTRACT

In Nunavik, Atlantic salmon (*Salmo salar*) reaches the northern limit of its distribution with populations established in four major watersheds in the southern part of Ungava Bay. It is absent from rivers further north as their water temperatures are too cold. With the expected increase of the river temperatures in response to climate change, colonization of new rivers in Nunavik by the species is possible. To determine which rivers might be colonized by the end of the century, thermal indicators were calculated based on the modeling of historical and future water temperatures of accessible rivers using a generalized additive model and water temperatures estimated by thermal remote sensing, given the limited number of water temperature observations. The rivers in the southern part of Ungava Bay and the main stem of the Arnaud River are the most likely to be colonized by salmon, as they are accessible, nearby already established salmon populations, and will have growth indicators similar to those of the current salmon rivers in Nunavik, regardless of the greenhouse gas emission scenarios used in the climate simulations (ssp2-4.5 and ssp5-8.5). It is less likely that salmon will colonize rivers in Hudson Bay, as several rivers are inaccessible and anadromous salmon populations are much further away.

Keywords : *Atlantic salmon, Nunavik, climate change, river temperature modeling, generalized additive model, Landsat thermal remote sensing, river accessibility, difffluence.*

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	III
RÉSUMÉ	IV
ABSTRACT	V
TABLE DES MATIÈRES	VII
LISTE DES FIGURES.....	IX
LISTE DES TABLEAUX.....	XI
1 INTRODUCTION.....	1
1.1 MISE EN CONTEXTE	1
1.2 REVUE DE LITTÉRATURE.....	2
1.2.1 Répartition nordique du saumon atlantique dans le Nord canadien.....	2
1.2.1 Utilisation du réseau hydrographique par le saumon	9
1.2.2 Identifications des obstacles infranchissables	10
1.2.3 Impacts des changements climatiques sur la température des rivières	11
1.2.4 Impacts des changements climatiques sur les communautés piscicoles.....	12
1.2.5 Effets de la température de l'eau sur le saumon atlantique.....	13
1.2.6 Modélisation des températures des rivières	14
1.2.7 Données thermiques observées et estimées par télédétection	14
1.3 OBJECTIFS DE RECHERCHE	16
1.4 STRUCTURE DU MEMOIRE	17
2 ARTICLE	18
2.1 ABSTRACT.....	19
2.2 RÉSUMÉ.....	20
2.3 INTRODUCTION	22
2.4 METHOD AND DATA	25
2.4.1 Study site	25
2.4.2 Identification of the current Atlantic salmon presence in Nunavik	26
2.4.3 Identification of the accessible river network	26
2.4.4 River Temperature Modelling.....	28
2.5 RESULTS.....	35
2.5.1 Atlantic salmon presence in Nunavik	35
2.5.2 Accessible river network	38
2.5.3 River diffluences.....	39
2.5.4 River Temperature Modelling.....	40
2.6 DISCUSSION.....	48

2.6.1	<i>State of salmon presence in Nunavik</i>	48
2.6.2	<i>Nunavik rivers accessibility and connectivity</i>	50
2.6.3	<i>Modelling river temperature with Landsat thermal imagery</i>	51
2.6.4	<i>Salmon potential colonization of Nunavik rivers</i>	52
2.7	CONCLUSION.....	53
3	DISCUSSION GÉNÉRALE ET CONCLUSION	55
3.1	SYNTHÈSE	55
3.2	PERSPECTIVES DE TRAVAUX FUTURS	57
3.2.1	<i>Savoir traditionnel</i>	57
3.2.2	<i>Amélioration de l'estimation des températures de l'eau par télédétection</i>	57
3.2.3	<i>Évaluation de la qualité de l'habitat pour le saumon par télédétection</i>	58
3.2.4	<i>Autres espèces anadromes</i>	59
4	BIBLIOGRAPHIE.....	61

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 CAPTURES DE SAUMON ATLANTIQUE AU NUNAVUT LOCALISEES LORS D'ENTREVUES REALISEES DANS LES COMMUNAUTES. LES SYMBOLES NOIRS REPRESENTENT LES CAPTURES DE SAUMON REPERTORIEES PAR COMMUNAUTE (BILOUS & DUNMALL, 2020).	3
FIGURE 2 CARTE DE LOCALISATION DU TERRITOIRE A L'ETUDE, LE NUNAVIK, AVEC LA LOCALISATION DES RIVIERES A SAUMON	4
FIGURE 3 CARTE DES CAPTURES DE SAUMON ATLANTIQUE ADULTE ET JUVENILE A L'EXTERIEUR DES RIVIERES A SAUMON AVEC UN STATUT OFFICIEL DANS LE BASSIN HYDROGRAPHIQUE DE LA BAIE D'UNGAVA. EN GRIS SONT LES RIVIERES INACCESSIBLES IDENTIFIEES DANS LA LITTERATURE. LES POPULATIONS DE SAUMONS ETABLIES AU LABRADOR SONT EGALEMENT PRESENTEES.	6
FIGURE 4 CARTE DES CAPTURES DE SAUMON ATLANTIQUE DANS LE BASSIN HYDROGRAPHIQUE DE LA BAIE D'HUDSON. EN GRIS SONT LES RIVIERES INACCESSIBLES IDENTIFIEES DANS LA LITTERATURE. ..	7
FIGURE 5 GRADIENT THERMIQUE PERPENDICULAIRE À LA BERGE DES DONNÉES INFRAROUGE THERMIQUE DES SATELLITES LANDSAT. LA LIGNE NOIRE EST L'ÉTENDUE DE L'EAU À LA PRISE DE L'IMAGE. (MARTÍ-CARDONA ET AL., 2019)	16
FIGURE 6 MAP OF NUNAVIK	25
FIGURE 7 EXAMPLES OF THE OBSTACLES IDENTIFICATION WITH PICTURES, TOPOGRAPHIC DATA AND SATELLITE BASEMAP IMAGERY: A) IMPASSABLE WATERFALLS ON THE CLEARWATER RIVER (SOUTHERN HUDSON BAY); B) POTENTIAL IMPASSABLE LOW WATER LEVEL SECTION ON THE CUROT RIVER (SOUTHERN UNGAVA BAY)	28
FIGURE 8 EXAMPLE OF THE SELECTION OF A WATER SURFACE TEMPERATURE ESTIMATION SITE ON THE CANIAPISCAU RIVER JUST BELOW THE LIMESTONE FALLS USING THE (A) ESRI WORLD BASE MAP IMAGERY AND (B) THE GLOBAL SURFACE WATER PRODUCT (PEKEL <i>ET AL.</i> , 2016) TO CREATE (C) WATER MASKS FAR ENOUGH FROM NON-WATER PIXELS.	31
FIGURE 9 MAP OF ATLANTIC SALMON PRESENCES IN NUNAVIK WITH THE INACCESSIBLE RIVERS IDENTIFIED IN THE LITERATURE.	36
FIGURE 10 MAP OF THE IDENTIFIED OBSTACLES, WATERFALLS AND LOW WATER LEVEL SECTIONS, ON THE NUNAVIK MAIN RIVER NETWORK (STRAHLER ≥ 6)	38
FIGURE 11 DIFFLUENCES FOUND IN NUNAVIK: A) AN UNNAMED RIVER SPLIT BETWEEN THE GREAT WHALE AND LITTLE WHALE RIVERS, B) A PORTION OF THE UPPER INNUKSUAC RIVER DRAIN INTO THE LEAF RIVER AND C) A PORTION OF THE INNUKSUAC RIVER DRAIN INTO THE KOGALUC RIVER.	39
FIGURE 12 RMSE AND BIAS VALUES OF THE COMPARISON OF DAILY MEAN AIR TEMPERATURE ESTIMATED BY DAYMET AND ERA5-LAND AGAINST OBSERVED AIR TEMPERATURES AT 20 WEATHER STATIONS BETWEEN JUNE 1 TO SEPTEMBER 30.	40
FIGURE 13 COMPARISON OF HOURLY WATER TEMPERATURE ABSOLUTE DEVIATION FROM THE DAILY MEAN WATER TEMPERATURE MEASURED BASED ON 12,298 DAILY OBSERVATIONS AT 42 RIVTEMP LOCATIONS BETWEEN JULY 1 AND SEPTEMBER 31.	41
FIGURE 14 MAP OF THE MODELLED SITES (N = 94) SHOWING THE TYPE OF WATER TEMPERATURE USED FOR THE GAM MODELS AND THE RIVER ACCESSIBILITY.	43
FIGURE 15 EVOLUTION OF TWO THERMAL INDICATORS - GROWTH DAYS (7-22°C) AND MEAN SUMMER TEMPERATURE (JUL-SEP) – FOR 94 SITES OVER FOUR PERIODS FOR THE AVERAGE AIR TEMPERATURE OF THE CLIMATE MODELS WITH SSP2-4.5 AND SSP5-8.5 SCENARIOS.	44
FIGURE 16 MAPS OF THE SITES (IN PINK) THAT REACH MORE THAN 100 DAYS WITH TEMPERATURE ABOVE 7 °C AND A MEAN SUMMER TEMPERATURE (JUL-SEP) OF AT LEAST 11 °C BY PERIODS AND EMISSIONS SCENARIOS.	46

FIGURE 17 COMPARISON OF THE OPTIMAL GROWTH TEMPERATURE INDICATOR (DAYS WITH TEMPERATURE BETWEEN 16 – 20 °C) FOR PERCENTILES 10 (P10), 90 (P90) AND MEAN (M) RESULTS OF THE CLIMATE SIMULATIONS FOR THE 1981 – 2010 PERIOD AND THE 2071 – 2100 PERIOD UNDER THE SSP2-4.5 AND SSP5-8.5 EMISSIONS SCENARIOS.....	47
FIGURE 18 DAYS WITH THERMAL STRESS FOR ATLANTIC SALMON FOR THE 2071-2100 PERIOD UNDER THE 90 TH PERCENTILE OF THE CLIMATE PROJECTIONS WITH THE SSP5-8.5 EMISSIONS SCENARIO.....	48

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 1 LISTE DES COURS D'EAU OU DES SAUMONS ATLANTIQUES (<i>SALMO SALAR</i>) ADULTES ANADROMES ET NON ANADROMES ONT ETE CAPTURES DANS DES BASSINS VERSANTS SANS STATUT OFFICIEL DE RIVIERE A SAUMON.	8
TABLEAU 2 DETAILS DES PRINCIPAUX MODELES NUMERIQUES D'ELEVATION DISPONIBLES GRATUITEMENT AU NUNAVIK	11
TABLEAU 3 DETAILS DES SATELLITES AVEC UN CAPTEUR THERMIQUE AYANT UNE HAUTE RESOLUTION (< 200 M). ADAPTE DE KUENZER ET AL. (2013)	15
TABLE 4 DATA USED TO IDENTIFY THE POTENTIAL OBSTACLES TO THE FISH PASSAGE ON NUNAVIK MAIN RIVER NETWORK.....	27
TABLE 5 DETAILS OF THE LANDSAT MISSIONS AND THE MINIMUM RIVER WIDTH TO ESTIMATE WATER SURFACE TEMPERATURE BASED ON HANDCOCK <i>ET AL.</i> (2006) RECOMMENDATIONS.....	30
TABLE 6 LIST OF THE ATLANTIC SALMON THERMAL INDICATORS AGGREGATED FOR EACH PERIOD (1981 - 2010, 2011 - 2040, 2041 - 2070, 2071 - 2100).....	35
TABLE 7 LIST OF ADULT ATLANTIC SALMON PRESENCE OUTSIDE OF THE OFFICIAL SALMON RIVERS	37
TABLE 8 COMPARISON OF THE SPOT LANDSAT WATER SURFACE TEMPERATURES (WST) ESTIMATIONS (> 7 °C) AGAINST OBSERVED DAILY MEAN WATER TEMPERATURE AT 18 RivTEMP SITES. THE DISTANCE BETWEEN THE THERMOGRAPH AND THE WST ESTIMATION SITE IS GIVEN AS WELL WITH THE NUMBER OF CONCOMITANT DATA (N).....	42
TABLE 9 METRICS PERFORMANCES OF THE 94 GAM MODELS BY TYPE OF WATER TEMPERATURE USED AS INPUT.	43
TABLE 10 AVERAGE THERMAL INDICATORS OVER THE HISTORICAL PERIOD (1981-2010) PRESENTING THE MINIMUM, MEAN AND MAXIMUM VALUE ENCOUNTERED AT 36 SITES LOCATED ON THE 4 SALMON RIVERS WITH THE PERCENTILE 10 (P10), 90 (P90) AND MEAN (M) RESULTS OF THE CLIMATE SIMULATIONS. THE AVERAGE PER RIVER IS ALSO GIVEN.	45

1 INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte

Avec les changements climatiques, il est attendu que la température des rivières augmente (Botero-Acosta *et al.*, 2022; Hedger *et al.*, 2013; Jonsson & Jonsson, 2009; Santiago *et al.*, 2020; Van Vliet *et al.*, 2013). Pour le saumon atlantique (*Salmo salar*), une espèce d'eau froide qu'on retrouve en Amérique du Nord et en Europe, cela entraînera un stress supplémentaire sur leurs populations dont plusieurs ont déjà été perturbées grandement par les activités anthropiques (Thorstad *et al.*, 2021). Plusieurs études s'intéressent donc aux stress thermiques (Elliott & Elliott, 2010; Elliott, 1991; Wilbur *et al.*, 2020), aux refuges thermiques (Dugdale *et al.*, 2013; Frechette *et al.*, 2018) et aux manières d'adapter les réglementations de la pêche sportive pour réduire l'impact de l'augmentation de la température de l'eau sur le saumon (DFO, 2012; Leeuwen *et al.*, 2020).

En revanche, à la limite nordique de la répartition du saumon atlantique, l'augmentation de la température des rivières pourrait être bénéfique pour l'espèce avec une augmentation de la saison de croissance (Nielsen *et al.*, 2013). De plus, de nouvelles rivières plus nordiques pourraient être colonisées par le saumon en réponse aux changements climatiques, car il est attendu que les aires de répartition des populations de poissons se déplacent vers le nord (Dunmall *et al.*, 2016; Jonsson & Jonsson, 2009; Nielsen *et al.*, 2013).

Les populations de saumon atlantique dans les quatre grands bassins versants du sud de la Baie d'Ungava au Nunavik, soit les rivières aux Feuilles, Koksoak, à la Baleine et George, sont les plus nordiques en Amérique après l'unique population de saumon du Groenland dans la rivière Kapisillit (Hedeholm *et al.*, 2018). Il n'y aurait pas de saumons atlantiques dans les rivières plus au nord du Nunavik, car la température de l'eau n'y serait pas assez chaude suffisamment longtemps pour permettre l'établissement de populations (Power *et al.*, 2008; Salonijs, 1973). Donc, avec le réchauffement des cours d'eau, les rivières plus au nord du Nunavik pourraient être colonisées par le saumon atlantique en Amérique du Nord étant donné leur proximité avec des populations déjà établies.

Le projet de maîtrise s'articule autour de cette possibilité de colonisation de nouvelles rivières au Nunavik par le saumon. Pour commencer, le maximum d'études et d'articles scientifiques sur le saumon au Nunavik a été compilé pour amasser le plus d'informations disponibles sur l'espèce au Nunavik et principalement sur sa répartition. Une évaluation de l'habitat disponible pour le

saumon au Nunavik a été effectuée en identifiant les cours d'eau qui sont sans obstacle et conséquemment, potentiellement accessibles pour le saumon. Le volet principal de ce projet de maîtrise porte sur les températures de l'eau des rivières du Nunavik historiques et futures pour vérifier quelles rivières auront des températures adéquates pour le saumon d'ici la fin du siècle. Les températures ont été modélisées majoritairement en faisant une calibration à partir de données de télédétection thermiques mesurées par les satellites Landsat.

1.2 Revue de littérature

1.2.1 Répartition nordique du saumon atlantique dans le Nord canadien

Dans le Nord canadien, le saumon atlantique est commun dans les zones côtières de la mer du Labrador et de la baie d'Ungava ainsi que présent sporadiquement dans le détroit d'Hudson et la baie de Baffin (Andrews & Coffey, 2009; Bilous & Dunmall, 2020). Au Nunavut, plusieurs captures de saumons adultes ont été mentionnées lors d'entrevues avec des membres des communautés (Figure 1), principalement en mer et quelques-unes en eau douce surtout près de Coral Harbour et de Clyde River, mais aucune population établie n'a été identifiée (Bilous & Dunmall, 2020). Certaines mentions sont très nordiques, ce qui n'est pas surprenant étant donné que le saumon peut migrer en mer jusqu'au Groenland dans la baie de Baffin. Toutefois, d'autres mentions davantage à l'ouest, notamment près des communautés de Kugluktuk, Cambridge Bay, Kugaaruk et Resolute, sont plus surprenantes. Cela pourrait être expliqué potentiellement par une confusion avec des saumons du Pacifique (*Oncorhynchus spp.*). En effet, ceux-ci sont davantage observés dans l'Arctique canadien ces dernières années (Dunmall *et al.*, 2018; Nielsen *et al.*, 2013).

Au Labrador, le saumon atlantique est présent en rivière jusqu'à environ 57° Nord (Figure 3) avec une population dans le ruisseau Webb (Anderson, 1985; Andrews & Coffey, 2009). Le saumon serait absent (aucune mention) des rivières plus au nord du Labrador (Anderson, 1985), mais aucune étude ne s'est penchée sur les raisons de cette absence (Andrews & Coffey, 2009). La population la plus nordique de saumon atlantique au Canada est établie dans la rivière aux Feuilles (58°N) au Nunavik (Lee & Power, 1976).

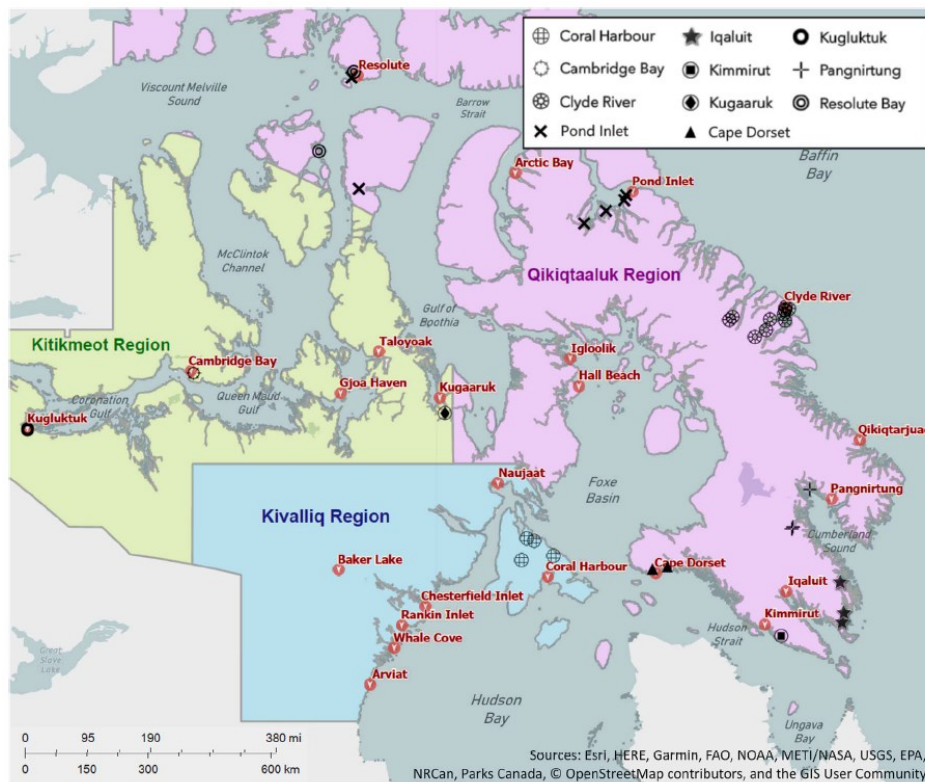


Figure 1 Captures de saumon atlantique au Nunavut localisées lors d'entrevues réalisées dans les communautés. Les symboles noirs représentent les captures de saumon répertoriées par communauté (Bilous & Dunmall, 2020).

1.2.1.1 Répartition et particularités du saumon atlantique dans le bassin de la baie d'Ungava

Au Nunavik, les populations de saumon atlantique anadromes sont établies dans seulement quatre grands bassins versants du sud de la baie d'Ungava (Rivières aux Feuilles, Koksoak, à la Baleine et George). Ces rivières et quelques tributaires ont le statut légal de rivière à saumon auprès du Gouvernement du Québec (Figure 2). Ces bassins versants sont caractérisés par un climat continental subpolaire selon la classification de Köppen-Geiger et sont localisés dans trois sous-zones de végétation : 1) principalement la toundra forestière, 2) la forêt boréale ouverte au sud des bassins versants des rivières Koksoak et à la Baleine ainsi que 3) la toundra arbustive pour une partie du bassin de la rivière aux Feuilles plus élevée en latitude et la partie est du bassin versant de la rivière George plus élevée en altitude (Morneau *et al.*, 2021).

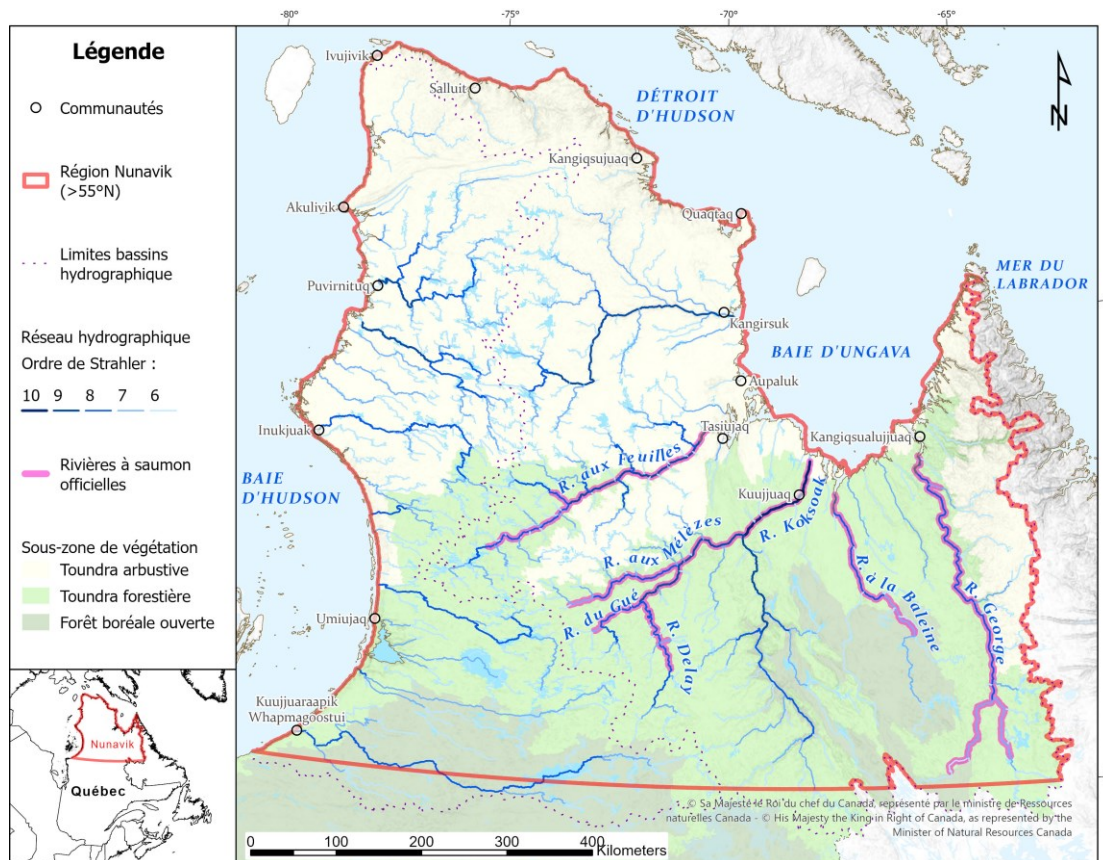


Figure 2 Carte de localisation du territoire à l'étude, le Nunavik, avec la localisation des rivières à saumon

Il n'y a présentement aucune pêche commerciale du saumon atlantique au Nunavik, le saumon y est pêché par les Inuit et les pêcheurs sportifs. En plus de la pêche de subsistance du saumon par les Inuit, qui l'utilisaient beaucoup historiquement comme nourriture pour les chiens de traineaux (Power, 1958b), les Inuit ont aussi pêché commercialement le saumon atlantique au moyen de filets maillants pour la Compagnie de la Baie d'Hudson à partir de 1881 sur la rivière Koksoak et de 1885 sur les rivières à la Baleine et George. Cette période a été marquée par une diminution des stocks de saumons jusqu'à la fin de la pêche commerciale dans les années 1930 (Dunbar, 1952). Une deuxième pêche commerciale opérée par les Inuit a été en vigueur sur les rivières Koksoak et à la Baleine à partir de 1961 jusqu'à la fin des années 90 et, encore une fois, les captures ont diminué tout au long de cette période (Le Jeune, 1992; Power & Le Jeune, 1976). L'état actuel des populations de saumon atlantique de l'Ungava est inconnu (COSEWIC, 2011).

Le système de la rivière Koksoak a été particulièrement étudié, notamment à la suite du détournement d'une partie (36 900 km²) du bassin supérieur de la rivière Caniapiscan en 1983, déjà inaccessible en raison des chutes du Calcaire (Power, 1958a), vers le complexe

hydroélectrique La Grande (Roy & Messier, 1989). En effet, dans le bassin versant de la rivière Koksoak (Figure 3), plusieurs sites d'alevinage et de taconnage ont été caractérisés (Belzile *et al.*, 1982; Belzile *et al.*, 1984; Côté *et al.*, 1979; FaunENord, 2017). Plusieurs obstacles infranchissables ont également été identifiés (Belzile *et al.*, 1984; Côté *et al.*, 1979; Le Jeune, 1981; Le Jeune & Shooner, 1982; Power, 1958a) ainsi que la présence de ouananiche en amont d'obstacles : dans le lac Aigneau et dans la rivière Caniapiscou (Power, 1958a).

Les populations de saumon de l'Ungava adoptent différentes stratégies migratoires, qui sont identifiées par la lecture des marques de croissance des écailles des saumons. Il y a : 1) des saumons marins qui vont migrer et s'alimenter en mer, pour une période de 1 à 5 ans (Thorstad *et al.*, 2011), 2) des ouananiches qui vont rester en eaux douces, même s'il n'y a aucun obstacle à la migration, 3) des saumons estuariens qui vont s'alimenter dans l'estuaire l'été, y passer l'hiver ou revenir en eaux douces pour l'hiver et 4) des saumons mixtes qui vont adopter un mélange des 3 comportements précédents durant leur cycle de vie (Belzile *et al.*, 1990; Brûlé, 2022; Robitaille, 1984). Ces comportements ont particulièrement été étudiés dans la rivière Koksoak, mais seraient présents également dans les autres rivières de l'Ungava (Brûlé, 2022). Les patrons de migrations estuarienne et mixte, uniques aux saumons de l'Ungava, n'ont pas été beaucoup étudiés et les causes exactes ne sont pas connues (Brûlé, 2022). Une hypothèse est que la température de la baie d'Ungava reste trop froide trop longtemps au printemps, ce qui empêcherait les saumons d'aller en mer jusqu'à tard dans la saison, lorsque la température remonte à 4°C, et une proportion de saumons ne migrerait alors pas en mer et resterait seulement dans l'estuaire (Lee & Power, 1976; Power, 1981). Toujours est-il que les conditions climatiques sévères expliqueraient vraisemblablement ces comportements de migration estuarienne et mixte (Brûlé, 2022; Power, 1981; Robitaille *et al.*, 1986). De plus, les températures froides des rivières de l'Ungava entraînent une autre particularité à ces populations : la croissance des tacons est plus lente, la smoltification plus tardive (après 3 à 7 ans) et les smolts plus gros que les populations méridionales (Lee & Power, 1976; Power, 1958a).

À l'exception des quatre grands bassins versants des rivières à saumon, la présence de fraie de saumon atlantique anadrome n'a été documentée nulle part ailleurs au Nunavik. Toutefois, il est capturé occasionnellement dans plusieurs autres rivières de la baie d'Ungava (Tableau 1 et Figure 3), en eaux douces, notamment dans toutes les rivières entre Kuujjuaq et Kangiqsualujuaq (Dunbar & Hildebrand, 1952) ainsi que dans la rivière Bérard près de Tasiujaq et la rivière Koroc près de Kangiqsualujuaq (Dubos *et al.*, 2023a).

En mer, le saumon au Nunavik est commun dans la baie d'Ungava, présent dans le détroit d'Hudson (Andrews & Coffey, 2009; Bilous & Dunmall, 2020). Il est donc possible, par exemple, de capturer du saumon près de Kangiqsujaq et dans l'estuaire de la rivière Arnaud à Kangirsuk.

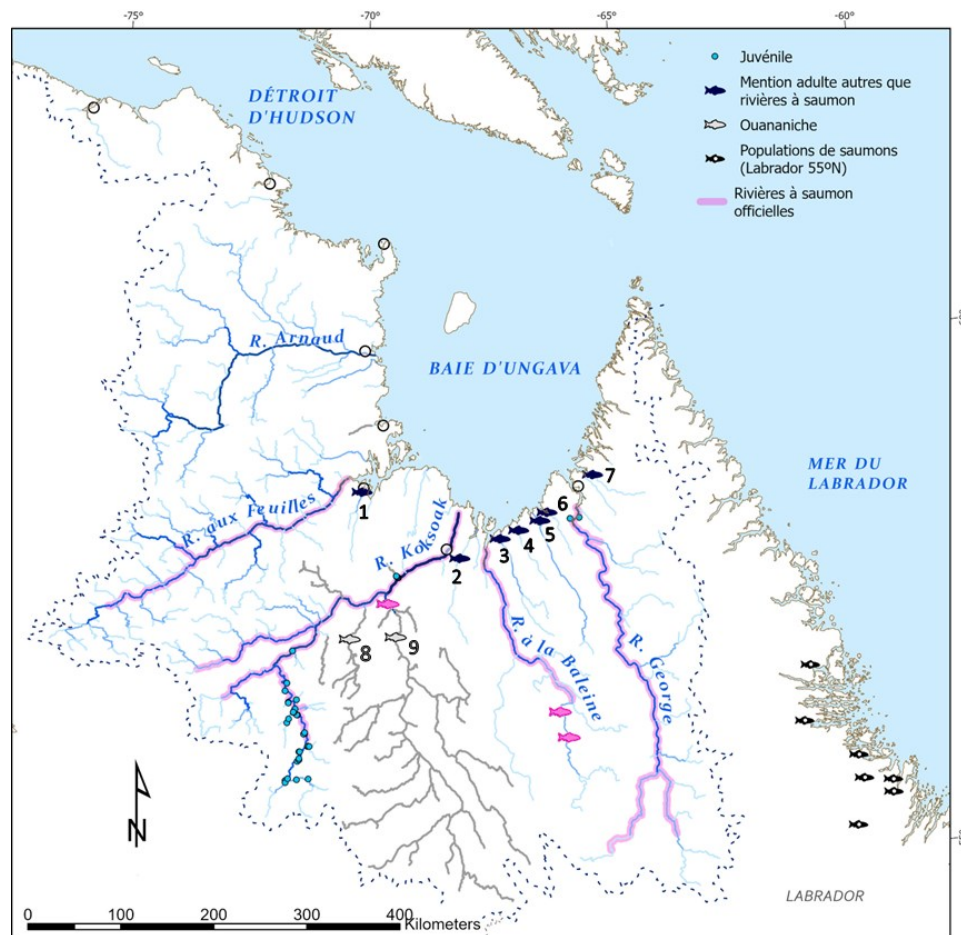


Figure 3 Carte des captures de saumon atlantique adulte et juvénile à l'extérieur des rivières à saumon avec un statut officiel dans le bassin hydrographique de la baie d'Ungava. En gris sont les rivières inaccessibles identifiées dans la littérature. Les populations de saumons établies au Labrador sont également présentées.

1.2.1.2 Répartition et particularités du saumon atlantique dans le bassin de la baie d'Hudson

Du côté de la baie d'Hudson, le saumon atlantique est pratiquement absent (Figure 4). Une petite population de ouananiche habite dans l'estuaire de la rivière Nastapoka, d'une longueur de 1,4 km, en eaux saumâtres au pied d'une chute infranchissable (Hydro-Québec, 1993; Legendre, 1990; Morin, 1991). On retrouve aussi une population de ouananiche en amont de ces chutes

dans la rivière et une autre dans le lac Kakiattualuk où de la fraie de ouananiche a été confirmée (Hydro-Québec, 1993). Ces trois populations sont séparées par des chutes infranchissables et les ouananiches peuvent donc seulement descendre la rivière. La population dans l'estuaire est considérée comme de la ouananiche, car malgré le fait qu'elle ait accès à la mer et qu'elle ne s'y alimente pas, l'analyse des écailles de ces individus ne démontre pas de signe de smoltification ni de croissance associée à une migration marine (Hydro-Québec, 1993; Legendre, 1990). Il n'y a encore jamais eu de confirmation de fraie dans l'estuaire, la présence de cette population dans l'estuaire pourrait s'expliquer simplement par des individus provenant de l'amont. C'est d'ailleurs la position du Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs du Québec (April *et al.*, 2023).

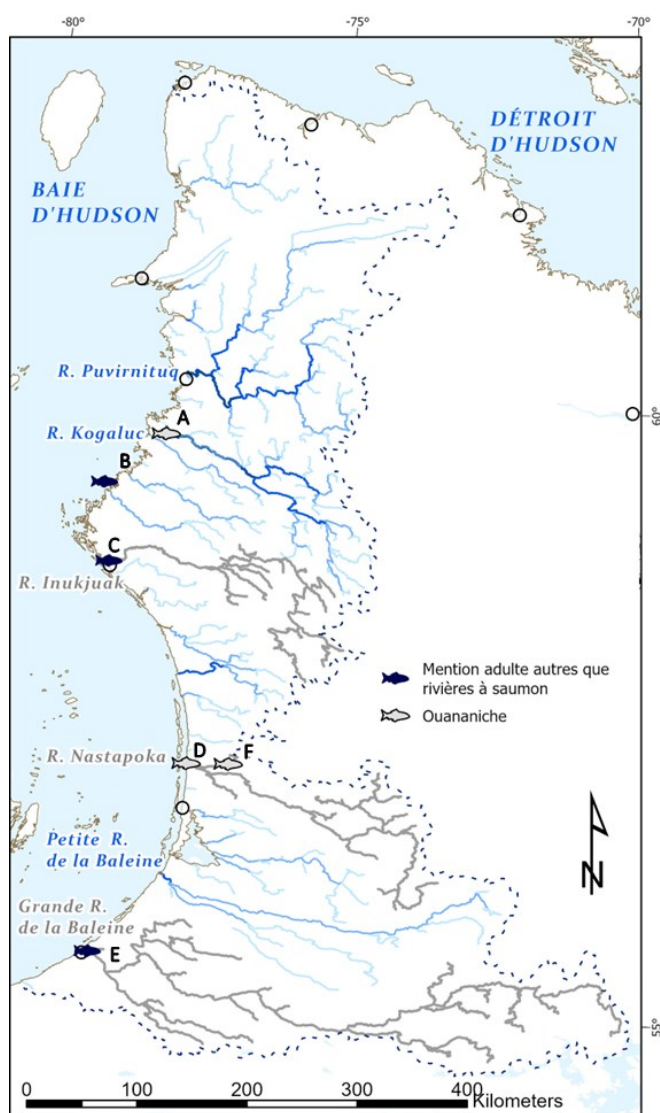


Figure 4 Carte des captures de saumon atlantique dans le bassin hydrographique de la baie d'Hudson. En gris sont les rivières inaccessibles identifiées dans la littérature.

Un spécimen a également été capturé dans la rivière Kogaluc et a été identifié comme non-anadrome à la suite de l'analyse de ses écailles qui démontraient d'ailleurs des cernes de croissance très rapprochés associés à une croissance très lente en eaux froides (Legendre, 1990). D'autres captures ont été répertoriées : dans la rivière Innuksuac (Legendre, 1990; Morin, 1991; St-Pierre *et al.*, 2010), dans l'embouchure de la rivière Grande Baleine (Legendre, 1990) et dans l'Anse à l'Erreur (Morin, 1991). Toutefois, aucune lecture d'écailles n'a été réalisée sur ces spécimens pour déterminer s'il s'agissait de saumons anadromes ou non.

Ces quelques populations de *Salmo salar* du côté de la baie d'Hudson seraient des vestiges de la recolonisation postglaciaire du saumon à un moment où les bassins hydrographiques de l'Ungava pouvaient être connectés avec ceux de l'Hudson (Morin, 1991). Cette absence du saumon atlantique dans la baie d'Hudson est particulièrement intrigante et inexplicquée (Legendre, 1990). D'ailleurs, aucune capture de saumon atlantique n'a été répertoriée du côté ouest de la baie d'Hudson au Nunavut (Bilous & Dunmall, 2020) et aucune étude n'a rapporté de captures de l'espèce à la baie James.

Tableau 1 Liste des cours d'eau où des saumons atlantiques (*Salmo salar*) adultes anadromes et non anadromes ont été capturés dans des bassins versants sans statut officiel de rivière à saumon.

Bassin hydrographique	Type	ID	Emplacement	Références
Baie d'Ungava	Adulte	1	Rivière Bérard	Dubos <i>et al.</i> (2023a)
		2	Rivière False	Dunbar et Hildebrand (1952)
		3	Rivière Marralik	Dunbar et Hildebrand (1952); Durkalec <i>et al.</i> (2020)
		4	Rivière Tuttutuq	Dunbar et Hildebrand (1952)
		5	Rivière Qurlutuq	Dunbar et Hildebrand (1952)
		6	Rivière Lagrevé	Dunbar et Hildebrand (1952)
	Ouananiche (pas accès à la mer)	7	Rivière Koroc	Cunjak <i>et al.</i> (1986); Dubos <i>et al.</i> (2023a)
		8	Lac Aigneau	Power (1958a)
		9	Rivière Caniapiscou (amont Chute du Calcaire)	Power (1958a)
Baie d'Hudson	Adulte/Ouananiche ¹	A	Rivière Kogaluc	Legendre (1990)
		B	Anse à l'Erreur	Morin (1991)
		C	Rivière Innuksuac	Legendre (1990); Morin (1991); St-Pierre <i>et al.</i> (2010)
		D	Rivière Nastapoka	Hydro-Québec (1993); Legendre (1990); Morin (1991)
		E	Grande rivière de la Baleine	Legendre (1990)
		F	Lac Kakiattualuk	Hydro-Québec (1993)
	Ouananiche (pas accès à la mer)			

¹ Sur la côte de l'Hudson, tous les spécimens dont l'anadromie a été vérifiée (ceux des rivières Kogaluc et Nastapoka) ont été identifiés comme ouananiche.

1.2.1 Utilisation du réseau hydrographique par le saumon

Le saumon atlantique est principalement une espèce de milieu lotique : les géniteurs frayent en rivière et les tacons s'alimentent en rivière également (Gibson, 1993; Rimmer *et al.*, 1983; Thorstad *et al.*, 2010). Le saumon peut aussi utiliser les habitats lacustres, principalement pour l'alimentation des juvéniles. Cela a été particulièrement documenté pour des populations de saumon atlantique à Terre-Neuve (Bourgeois & O'Connell, 1988; Dempson *et al.*, 2004) et en Scandinavie (Erkinaro & Erkinaro, 1998; Halvorsen & Jørgensen, 1996). Il y aurait une meilleure croissance et survie des juvéniles de saumon atlantique dans des bassins versants où il y a une présence importante d'habitats lacustres (Dempson *et al.*, 2004; Klemetsen *et al.*, 2003; O'Connell & Ash, 1993). Les smolts seraient donc plus gros lors de la dévalaison et auraient également une meilleure survie en mer (Dempson *et al.*, 2004; Klemetsen *et al.*, 2003).

Dans l'Arctique, les lacs pourraient être un élément essentiel à la survie et à l'établissement des populations de saumon atlantique en tant que 1) potentiels sites de fraye, ce qui pourrait améliorer la survie des œufs et alevins face aux conditions rigoureuses hivernales, 2) aires d'alimentation pour améliorer la croissance et la survie des tacons et des smolts et 3) aires d'hivernage pour les géniteurs (Bilous & Dunmall, 2020).

Les géniteurs de saumon atlantique peuvent remonter l'ensemble d'un bassin versant pour aller frayer tant qu'il n'y a pas d'obstacle, permanent ou temporaire, de nature anthropique (barrage, chemin, pollution) ou naturel (chutes, faible profondeur), qui limite le déplacement des géniteurs (Thorstad *et al.*, 2010). La capacité à remonter une cassure par le saumon est très variable et est déterminée par la hauteur de l'obstacle, la pente de celui-ci, la profondeur de la fosse sous la chute, le débit, le niveau d'eau, la température de l'eau et la taille du saumon (Larinier *et al.*, 1994; Thorstad *et al.*, 2010; Thorstad *et al.*, 2008). Par exemple, Beach (1984) a observé un saumon remonter une chute de 3,65 m alors qu'un obstacle moins haut pourrait être plus difficile à passer pour un autre poisson de cette même espèce (Thorstad *et al.*, 2008). Il est donc difficile d'évaluer la franchissabilité d'une chute sans une inspection terrain et sans inventaires ichtyologiques dans certains cas.

Il ne semble pas y avoir de limite à la distance que les géniteurs peuvent remonter dans le bassin versant. Plusieurs espèces dans la famille des salmonidés sont de grands migrants tels que le saumon chinook (*Oncorhynchus tshawytscha*) qui remonte le fleuve Yukon sur 2 900 km (Twardek *et al.*, 2023) et l'inconnu (*Stenodus leucichthys*) dont certains individus ont migré sur 1 800 km dans le fleuve Mackenzie (Stephenson *et al.*, 2005). Du côté du saumon atlantique, les plus longues migrations en eaux douces sont en Europe : celui-ci remontait le Rhin et l'Elbe sur

plus de 1 000 km (Monnerjahn, 2011; Wolter, 2015) et quelques saumons remonteraient encore la Loire sur 920 km (Imbert *et al.*, 2013; Martin *et al.*, 2012). En Amérique du Nord, la plus longue migration était de 645 km sur la rivière Connecticut qui n'est plus autant accessible, en raison de barrages, et dont la population de saumon, soutenue artificiellement, est en faible nombre (Gephard, 2008). Au Nunavik, les sites les plus en amont avec présence de juvéniles nous indiquent que le saumon remonte la rivière Koksoak sur au moins 530 km (Belzile *et al.*, 1982; FaunENord, 2017). Vraisemblablement, il s'agirait, actuellement, de la plus longue migration continentale du saumon atlantique en Amérique du Nord.

1.2.2 Identifications des obstacles infranchissables

Identifier sur des rivières les obstacles infranchissables pour les poissons n'est pas une mince tâche sans visite sur le terrain. Historiquement, les chutes infranchissables ont notamment été identifiées au Québec sur les rivières à saumon par photo-interprétation à partir d'images aériennes (Côté *et al.*, 1987). Avec l'amélioration de la télédétection, cette technologie a été utilisée pour identifier les obstacles aux poissons, mais presque exclusivement avec l'utilisation de données Lidar selon une récente revue de littérature sur l'utilisation de la télédétection pour l'étude de l'habitat du poisson (Kuiper *et al.*, 2023). Les données Lidar ne sont pas disponibles à la grandeur du Nunavik, mais uniquement pour les territoires municipaux des 14 villages nordiques.

Plusieurs modèles numériques d'élévation (MNE) nationaux (MNSC, MNTQ, MENHR) et globaux (NASADEM, AW30D30, GLO-30 DEM) sont disponibles gratuitement au Nunavik (Tableau 2). Quelques tests ont été effectués avec le réseau hydrographique linéaire de la Géobase du Réseau Hydrographique du Québec et les MNE nationaux, mais il y avait trop de bruit dans les données pour identifier les chutes importantes. Avec une résolution de 2 m, le MNEHR et son MNE d'origine, le ArticDEM, pourraient être intéressants, malgré plusieurs données manquantes, mais ils sont disponibles seulement sur une très petite partie du territoire (>60°N) et peu de rivières s'y trouvent.

À noter qu'une étude a tout de même utilisé le modèle numérique de surface SRTM avec une résolution de 30 m pour identifier, dans un bassin versant du Brésil, les obstacles pour le poisson défini comme ayant une pente supérieure à 25% (Medinas de Campos *et al.*, 2020). Toutefois, avec les essais effectués, il n'a pas été jugé réaliste, dans le cadre de cette maîtrise, d'identifier les obstacles adéquatement de manière automatique en utilisant les MNE disponibles.

Tableau 2 Détails des principaux modèles numériques d'élévation disponibles gratuitement au Nunavik

Données d'élévation	Détails	Résolution	Couverture
MNS du Canada (MNSC)	Modèle numérique de surface (MNS) du <i>Shuttle Radar Topographic Mission</i> (SRTM), corrigé et amélioré par RNCAN.	20 m	Canada Sud du 60°N
MNT hydro cohérents du Québec (MNTQ)	Modèle numérique de terrain du MRNF produit avec le Modèle numérique d'élévation du Canada (MNEC) dérivé de la base nationale de données topographiques.	10 m	Québec
MNE de haute résolution (MNEHR)	Version corrigée, par RNCAN pour le Canada, du MNS global ArcticDEM produit par stéréoscopie d'images satellites (0.3-0.5m) .	2 m	Canada Nord du 60°N
NASADEM	Version améliorée du SRTM par la NASA	30 m	Global Sud du 60°N
Alos World 3D -30m (AW3D30)	MNS produit par stéréoscopie des images du Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping du Japan Aerospace Exploration Agency	30 m	Global
Copernicus GLO-30 DEM	MNS produit par interférométrie des données radar TanDEM-X par Copernicus	30 m	Global

1.2.3 Impacts des changements climatiques sur la température des rivières

Il est prédit que les changements climatiques impacteront les débits des rivières et augmenteront la température de l'eau (Botero-Acosta *et al.*, 2022; Hedger *et al.*, 2013; Jonsson & Jonsson, 2009; Santiago *et al.*, 2020; Seyedhashemi *et al.*, 2022; Van Vliet *et al.*, 2013). Le degré d'augmentation de la température des rivières est variable selon l'endroit en raison de plusieurs facteurs tels que la taille du cours d'eau, le débit, l'apport en eau souterraine, le climat et les caractéristiques du bassin versant (Rivers-Moore & Dallas, 2022; St-Hilaire *et al.*, 2021). L'évolution des températures des rivières avec les changements climatiques sera très variable selon l'endroit. Par exemple, Seyedhashemi *et al.* (2022) prédisent que la température de l'eau future de la Loire augmentera davantage que la température de l'air en raison d'une diminution du débit. Par contre, la comparaison des températures de l'eau historiques (45 ans) de 263 sections de rivières au Royaume-Uni avec les températures de l'air a montré que pour la majorité des rivières étudiées, les températures de l'eau n'ont pas autant augmenté que la température de l'air en raison des précipitations importantes limitant la hausse des températures de l'eau, ce qui indique une certaine résilience de ces rivières face aux changements climatiques (Worrall *et al.*, 2022).

À l'échelle globale, Van Vliet *et al.* (2013) prédisent, d'ici la fin du siècle, une augmentation de la température moyenne de l'eau des rivières entre 0,8 et 1,6°C en été selon les scénarios d'émissions de gaz à effet de serre. Toutefois, avec un scénario d'émissions élevées (rcp8.5), les modèles hydroclimatiques de Botero-Acosta *et al.* (2022) prédisent une augmentation de la température de l'eau entre 2,6 et 5,5°C durant l'été pour les rivières de la côte est américaine. Pour le Nunavik, Boyer et St-Hilaire (2022) ont modélisé les températures futures de 30 rivières, et les moyennes estivales augmenteraient entre 0,2 et 4,1°C à la fin du siècle selon les rivières et les scénarios d'émissions.

1.2.4 Impacts des changements climatiques sur les communautés piscicoles

Ces changements de température et de débit auront un impact sur les communautés piscicoles avec une potentielle migration en latitude et en altitude (Dunmall *et al.*, 2016). Une augmentation de la température de l'eau engendrerait un déplacement des populations de saumon atlantique vers le Nord et une extirpation des populations dans les rivières méridionales (Jonsson & Jonsson, 2009). Hein *et al.* (2012) prédit, d'ici la fin du siècle, une diminution de 73% de l'aire de répartition de l'omble chevalier (*Salvelinus alpinus*) en Suède. Les populations se limiteraient aux plans d'eau en altitude en raison de l'augmentation de la température de l'eau et de l'augmentation de la prédation et de la compétition avec le brochet (*Exos lucius*). En Espagne, l'habitat estival de la truite brune (*Salmo trutta*) serait réduit entre 53 et 90% selon la rivière et le scénario d'émissions de gaz à effet de serre modéré ou élevé (Santiago *et al.*, 2020). Les modèles de Hedger *et al.* (2013) basés sur l'individu à partir des prévisions futures de température de l'eau et de débit indiquent que les populations de saumon atlantique de deux cours d'eau, en Norvège (62 et 70°N), augmenteraient en raison de l'augmentation de la température de l'eau, ce qui engendrerait une meilleure croissance et survie des tacons. Il en résulterait alors une plus grande production de smolts et une augmentation du nombre d'œufs déposés, tandis que dans un cours d'eau plus au sud (59°N), il y aurait une diminution de la population causée par une diminution du débit et donc de la disponibilité d'habitat productif pour les tacons. Au Nunavik, les résultats de la modélisation thermique de Boyer et St-Hilaire (2022) prévoient une augmentation du nombre de jours de croissance pour le saumon atlantique en 2070-2100 sans qu'il y ait toutefois de stress thermique pour le saumon associé à la hausse de la température de l'eau.

1.2.5 Effets de la température de l'eau sur le saumon atlantique

Avec les perturbations anthropiques et les changements climatiques, plusieurs recherches se sont penchées sur le stress thermique causé par l'augmentation de la température de l'eau. Par exemple, une température de plus de 22 °C a déjà des effets sur le comportement du saumon atlantique (Elliott & Elliott, 2010; Heggenes *et al.*, 2021). Dans le cadre de ce projet, ce sont principalement les températures minimales en eau douce pour la survie et la croissance du saumon atlantique qui sont pertinentes pour vérifier le potentiel de nouvelles rivières du Nunavik à être colonisées par le saumon atlantique. À cet effet, la température minimale de l'eau pour la survie des tacons est de -0,8 °C, ceux-ci commencent à s'alimenter entre 1,0 et 7,7 °C alors qu'une température de l'eau entre 12 et 18 °C assure une croissance maximale (Elliott & Elliott, 2010). Jensen et Johnsen (1986) indiquent que la température minimale de l'eau pour assurer la croissance du saumon atlantique est entre 6,3 et 7,4 °C.

Historiquement, la température de l'air a été utilisée pour déterminer la saison de croissance et la limite nordique des populations de saumon atlantique au Nunavik. La saison de croissance minimale pour le saumon serait de 90 à 100 jours avec une température de l'air minimale entre 5,6 et 6,1 °C (Lee & Power, 1976; Power, 1969). En général pour atteindre le stade de smolt, les tacons auraient besoin d'environ 500 jours avec une température de l'air supérieure à 7 °C (Symons, 1979). Il y a peu d'études qui utilisent la température de l'eau pour déterminer la saison de croissance minimale nécessaire pour permettre l'établissement d'une population de saumon atlantique. L'étude de Jensen et Johnsen (1986) est la seule trouvée qui évalue la croissance selon la température de l'eau en climat froid sur trois rivières norvégiennes. La saison de croissance sur ces rivières est entre 67 et 149 jours avec une température supérieure à 7 °C, et sur la rivière Beiarelva, il faudrait environ 420 jours avec une température minimale de 6,3 °C pour assurer la smoltification.

Une autre contrainte à l'établissement des populations de saumon atlantique dans l'Arctique est la sensibilité des œufs aux rudes conditions hivernales. En fait, il s'agit du principal goulot d'étranglement pour la survie des populations de saumon atlantique dans les régions froides, car les sites de fraie, où les œufs incubent, peuvent être complètement asséchés si le débit est trop faible lors de l'étiage hivernal ou bien si le cours d'eau est complètement gelé à cet endroit, ce qui entraîne la mortalité des œufs (Bisaillon *et al.*, 2007; Cunjak *et al.*, 1998; Power *et al.*, 1999) et donc une diminution du recrutement. C'est toutefois un aspect qui est difficile à étudier et qui n'est pas abordé dans le cadre de ce projet.

1.2.6 Modélisation des températures des rivières

Pour modéliser les températures de l'eau, deux grandes classes de modèles existent : les modèles déterministes et statistiques. Les modèles déterministes utilisent plusieurs intrants météorologiques et du bassin versant pour calculer le transfert énergétique et prédire la température de l'eau (Benyahya *et al.*, 2007; Caissie, 2006), tandis que les modèles statistiques utilisent généralement seulement la température de l'air pour prédire la température de l'eau, ce qui rend leur utilisation plus simple et flexible (Benyahya *et al.*, 2007). Caissie *et al.* (2001) ont prédit efficacement avec des modèles statistiques de régression et stochastiques la température de l'eau avec seulement la température de l'air comme variable explicative. Parmi les modèles statistiques, les modèles non paramétriques n'imposent pas de contraintes quant à la distribution des données, seules les données fournies au modèle vont le définir (Benyahya *et al.*, 2007).

Le modèle additif généralisé (*Generalized Additive Model* : GAM), développé par Hastie et Tibshirani (1986), est un modèle statistique non paramétrique de régression non linéaire qui est ajusté afin de prendre en compte la non-linéarité entre les variables explicatives et dépendantes à l'aide de fonctions de lissage. Il est fréquemment utilisé en hydrologie, car il est flexible et performe mieux que d'autres modèles notamment pour modéliser la température des rivières (Abidi *et al.*, 2022; Laanaya *et al.*, 2017; Ouarda *et al.*, 2022).

1.2.7 Données thermiques observées et estimées par télédétection

Au Nunavik, les données de température de l'eau observées sont limitées. La base de données du réseau RivTemp (Boyer *et al.*, 2016) comporte 94 sites au Nunavik. Cependant, ceux-ci ont seulement entre quelques semaines à maximum six années de données. Les thermographes ont été installés et suivis par le Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs ainsi que par le Centre d'expertise hydrique du Québec. Plusieurs bassins versants du Nunavik n'ont aucune observation de température de l'eau.

Les données issues de la télédétection thermique sont une alternative intéressante pour estimer la température de surface de l'eau pour des régions éloignées là où il y a peu d'observations de températures de l'eau (Dugdale, 2016; Handcock *et al.*, 2006; Rincón *et al.*, 2023; St-Hilaire *et al.*, 2023). L'utilisation des données satellitaires thermiques ne nécessite pas une logistique importante et les données de plusieurs capteurs sont disponibles gratuitement. Trois grandes missions de satellites (Tableau 3) prennent des mesures dans l'infrarouge thermique avec une

résolution inférieure à 200 m et dont les données sont disponibles gratuitement (Kuenzer et al., 2013). Les satellites Landsat offrent la plus grande couverture temporelle avec des données depuis 1982 qui sont facilement accessibles notamment sur des plateformes de calcul infonuagique, comme Google Earth Engine (GEE), qui permettent le calcul de série chronologique rapidement. Le capteur ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) offre cinq bandes dans l'infrarouge thermique, ce qui facilite la correction atmosphérique et le calcul de l'émissivité. Par contre, bien que les données soient disponibles aussi sur GEE, les acquisitions sont sur demandes seulement. Il n'y a donc pas de prise d'image en continu comme pour les satellites Landsat. Les données thermiques des satellites CBERS (China-Brazil Earth Resources Satellite) sont absentes des plateformes de calcul infonuagique et sont disponibles seulement en téléchargement, ce qui complique leur utilisation pour créer de longues séries temporelles.

Tableau 3 Détails des satellites avec un capteur thermique ayant une haute résolution (< 200 m). Adapté de Kuenzer et al. (2013)

Satellite	Capteur	Résolution spatiale	Période de retour	Période de couverture
Landsat 4	TM	120 m	16 jours	1982 – 1993
Landsat 5	TM	120 m	16 jours	1984 – 2012
Landsat 7	ETM+	60 m	16 jours	1999 –
Landsat 8	TIRS	100 m	16 jours	2013 –
Landsat 9	TIRS-2	100 m	16 jours	2021 –
Terra	ASTER	90 m	4-16 jours	1999 –
CBERS-1	IRMSS	160 m	26 jours	1999 – 2003
CBERS-2	IRMSS	160 m	26 jours	2003 – 2007
CBERS-2b	IRMSS	160 m	26 jours	2007 – 2010
CBERS-4	IRSCAM	80 m	26 jours	2014 –

La relativement bonne résolution spatiale, l'excellente couverture temporelle et la facilité d'accès des données font que les données thermiques des satellites Landsat sont un excellent choix pour estimer les températures de surface sur Terre. D'ailleurs, plusieurs études utilisent ces données Landsat pour estimer la température de l'eau de surface de cours d'eau (Daigle *et al.*, 2022; Dyba *et al.*, 2022; Halverson *et al.*, 2022; Martí-Cardona *et al.*, 2019; Rincón *et al.*, 2023; Tavares *et al.*, 2020; Vanhellemont, 2020). Toutefois, étant donné que les pixels publiés des bandes thermiques des satellites Landsat sont rééchantillonnés par convolution cubique à une résolution de 30 m, il en résulte une contamination des températures des pixels d'eau avec les températures

de la berge et vice versa (Figure 5). Pour éviter cette contamination, Handcock *et al.* (2006) recommande d'estimer la température de l'eau avec les données Landsat seulement pour des rivières ayant une largeur minimale de trois fois la résolution d'origine du pixel, soit sur des rivières avec une largeur entre 180 à 360 m selon la mission. L'algorithme de Martí-Cardona *et al.* (2019) permet de séparer les pixels eau/berge et de réduire la largeur minimale des rivières nécessaire pour estimer la température de surface de l'eau, mais cette méthode est assez chronophage.

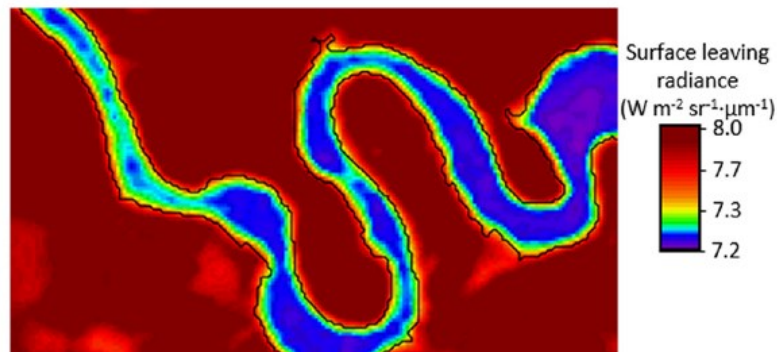


Figure 5 Gradient thermique perpendiculaire à la berge des données infrarouge thermique des satellites Landsat. La ligne noire est l'étendue de l'eau à la prise de l'image. (Martí-Cardona *et al.*, 2019)

1.3 Objectifs de recherche

Le but du projet de maîtrise est d'identifier quelles rivières du Nunavik, actuellement sans population de saumon atlantique, sont les plus susceptibles d'être colonisées par celui-ci d'ici la fin du siècle. Tout d'abord, une première question est de savoir si le saumon est déjà présent ailleurs que dans les rivières à saumon officielles. Il est aussi présumé que le saumon est absent des rivières du nord du Nunavik en raison de la température de l'eau trop froide. Par contre, serait-il possible que le saumon soit absent aussi en raison d'obstacles infranchissables sur ces rivières? Quelles rivières sont accessibles et devraient faire l'objet d'analyses supplémentaires pour évaluer le potentiel de colonisation? Finalement, la principale question est de savoir quel est le régime thermique actuel des rivières à saumon du Nunavik et vérifier ensuite quelles rivières, dans le futur, auront des températures similaires à ces rivières. Pour répondre à ces questions de recherche, voici les trois objectifs qui en découlent :

1. Déterminer si le saumon est présent dans d'autres rivières du Nunavik.
2. Évaluer l'accessibilité des rivières du Nunavik.
3. Modéliser les températures de l'eau historiques et futures des rivières pour calculer et comparer des indicateurs thermiques associés aux saumons pour chaque rivière.

1.4 Structure du mémoire

Un mémoire par article est présenté dans le cadre de ces travaux de maîtrise. Le Chapitre 2 du mémoire est l'article (*Assessing potential colonization of arctic and sub-arctic rivers by Atlantic salmon (*Salmo salar*) in Nunavik: Modeling future rivers temperatures with a Generalized Additive Model and Landsat thermal infrared imagery*) presque prêt à être soumis à la revue Science arctique.

Tout d'abord, la revue de littérature sur la distribution actuelle du saumon atlantique au Nunavik réalisée au Chapitre 1 est présentée dans l'article, car cette synthèse n'a jamais été publiée pour le Nunavik. Elle permet également de clarifier la situation du saumon présent dans l'embouchure de la rivière Nastapoka qui n'est pas anadrome et qui ne se reproduit pas dans l'embouchure. Il s'agirait vraisemblablement d'individus provenant de populations de saumon en amont du bassin versant qui ne migrent pas en mer en raison des chutes infranchissables. Certains articles récents ne font pas encore cette distinction.

L'accessibilité des cours d'eau est évaluée en identifiant les obstacles potentiels pour la montaison des saumons géniteurs sur les cours d'eau avec un ordre de Strahler égal ou supérieur à 6. Les obstacles sont localisés et leur franchissabilité évaluée sommairement et manuellement à partir de la littérature, des données topographiques (courbes de niveau et obstacles hydrographiques) et des images satellites.

La température de l'eau des rivières accessibles et potentiellement accessibles est modélisée avec un modèle additif généralisé (GAM) pour évaluer premièrement le régime thermique estival actuel des rivières à saumons et ensuite pour vérifier quelles rivières, dans le futur, auront des températures similaires aux rivières à saumon actuelles en comparant différents indicateurs thermiques pour le saumon issus de la littérature. Pour cette partie, les travaux de Boyer et St-Hilaire (2022) ont été repris, ceux-ci ayant déjà modélisé les températures de l'eau historiques et futures pour 78 sites sur 30 rivières au Nunavik avec des modèles GAM. Ici, en plus d'utiliser les données de température de l'eau observées du réseau RivTemp (Boyer *et al.*, 2016), les données d'infrarouge thermique des satellites Landsat sont utilisées pour estimer la température de l'eau de surface, ce qui permet de modéliser davantage de sites et de rivières.

Le Chapitre 3 est une discussion générale qui résume les résultats ainsi que les découvertes importantes du projet et suggère également des pistes d'améliorations et des analyses supplémentaires pour faire suite à ce projet de maîtrise.

2 ARTICLE

Assessing potential colonization of arctic and sub-arctic rivers by Atlantic salmon (*Salmo salar*) in Nunavik: Modeling future rivers temperatures with a Generalized Additive Model and Landsat thermal infrared imagery

Évaluation du potentiel de colonisation de rivières arctiques et subarctiques par le saumon atlantique (*Salmo salar*) au Nunavik : Modélisation des températures futures des rivières à l'aide d'un modèle additif généralisé et de l'imagerie thermique Landsat

Auteurs :

P. Poulin^a, A. St-Hilaire^{a,b}, C. Boyer^a et N. E. Bergeron^a

^a Institut National de la Recherche Scientifique, Centre Eau Terre Environnement, Québec, Canada

^b Canadian River Institute, University of New Brunswick, Fredericton, Canada

Titre de la revue ou de l'ouvrage :

En vue d'être soumis à Arctic Science.

Contribution des auteurs :

Philippe Poulin a extrait les données, réalisé les analyses et rédigé le manuscrit. André St-Hilaire et Normand Bergeron ont élaboré le projet, supervisé les travaux et révisé l'article. André St-Hilaire s'est occupé de l'administration et de la recherche de subventions. Le volet thermie a été élaboré à partir des travaux précédents de modélisation des températures des rivières réalisés par André St-Hilaire et Claudine Boyer. Cette dernière a également fourni les scripts et du support pour utiliser le modèle GAM avec le logiciel R.

2.1 Abstract

In response to climate change and rising river temperatures, fish species are anticipated to migrate northward. In Nunavik, Québec, Canada, the Atlantic salmon (*Salmo salar*) populations in the four main southern rivers of Ungava Bay are current at their northern limit as rivers further north are deemed to be too cold for the establishment of the species. The use of over forty years of Landsat satellites thermal imagery has emerged as a key resource for gauging water surface temperature (WST) in such remote regions. This study aims to assess the potential colonization of new rivers in Nunavik in response to climate change by evaluating the rivers accessibility and temperature. Obstacles for the Atlantic salmon migration were identified through a literature review and visual analysis of the topographic data and high-resolution satellite imagery. On 94 sites along the rivers without impassable waterfalls, water temperatures were modelled with a generalized additive model (GAM) utilizing ERA5-Land simulated air temperature to predict water temperatures based on spot Landsat WST and observed daily mean temperature. Models performance was better when using observed temperatures (RMSE values: 1.14 - 1.66 °C) compared to Landsat WST (RMSE values: 1.49 - 2.20 °C). Landsat WST were compared against observed daily temperatures and showed averaged RMSE and Bias of: 1.60 °C / 0.03 °C for Landsat 8 and 1.84 °C / -0.60 °C for Landsat 7. GAMs were run with future air temperatures simulations predicting an average rise of the mean summer temperatures in Nunavik rivers between 1.2 °C and 2.7 °C by the end of the century depending on the climate scenario (SSP2-4.5 and SSP5-8.5). For the current Atlantic salmon rivers, the number of days with optimal growth temperature (16 – 20 °C) is expected to increase and days with thermal stress (> 22 °C), historically absent, will be very limited. In terms of range expansion, Nunavik northernly rivers would remain too cold for salmon establishment. Atlantic salmon is more likely to colonize the other Ungava Bay rivers because most of them are accessible, will reach a minimum of 100 days at 7 °C as the present salmon rivers and are nearby established populations. On the west side of Nunavik, despite some occurrences of non-anadromous Atlantic salmon on the Hudson Bay watershed, which are possible relics of post-glaciation migration from the Ungava Bay, a hypothesis confirmed with our finding of a small interconnection between the two watersheds, colonization of new rivers in the Hudson Bay watershed is less likely as they are mostly inaccessible and far away from established anadromous populations.

2.2 Résumé

En réponse au changement climatique et à l'augmentation des températures des rivières, il est prévu que les espèces de poissons migrent vers le nord. Au Nunavik, Québec, Canada, les populations de saumons atlantiques (*Salmo salar*) dans les quatre principales rivières du sud de la baie d'Ungava sont à leur limite nordique car les rivières plus au nord sont considérées trop froides pour l'établissement de l'espèce. L'utilisation de plus de quarante années d'imagerie thermique par satellites Landsat est devenue une ressource clé pour évaluer la température de surface de l'eau (TSE) dans de telles régions éloignées. Cette étude vise à évaluer la colonisation potentielle de nouvelles rivières au Nunavik en réponse aux changements climatiques en évaluant l'accessibilité et la température des rivières. Les obstacles à la montaison du saumon ont été identifiés grâce à une revue de la littérature et à une analyse visuelle des données topographiques et d'images satellite haute résolution. À 94 emplacements le long des rivières sans chutes infranchissables, les températures de l'eau ont été modélisées avec un modèle additif généralisé (GAM) en utilisant la température de l'air simulée par ERA5-Land pour prédire les températures de l'eau basé sur les TSE ponctuelles de Landsat et des températures moyennes journalières observées. La performance des modèles était meilleure lors de l'utilisation des températures observées (valeurs RMSE : 1,14 à 1,66 °C) par rapport à la TSE Landsat (valeurs RMSE : 1,49 à 2,20 °C). Les TSE Landsat ont été comparées aux températures quotidiennes observées donnant des valeurs moyennes de RMSE et de biais de : 1,60 °C / 0,03 °C pour Landsat 8 et 1,84 °C / -0,60 °C pour Landsat 7. Les GAM ont été exécutés avec des simulations de températures de l'air futures prédisant une augmentation moyenne des températures estivales des rivières du Nunavik entre 1,2 °C et 2,7 °C d'ici la fin du siècle selon le scénario climatique (SSP2-4.5 et SSP5-8.5). Pour les rivières à saumons actuelles, le nombre de journées avec une température de croissance optimale (16 à 20 °C) augmenteraient et des journées avec un stress thermique (> 22 °C), historiquement absentes, seront très peu fréquents. En termes d'expansion de l'aire de distribution, les rivières du nord du Nunavik resteraient trop froides pour l'établissement du saumon atlantique. Il est plus probable que le saumon atlantique colonise les autres rivières de la baie d'Ungava car la plupart d'entre elles sont accessibles, atteindront un minimum de 100 jours à 7 °C comme les rivières à saumons actuelles et sont à proximité de populations établies. Du côté ouest du Nunavik, malgré quelques occurrences de saumons atlantiques non-anadromes dans le bassin versant de la baie d'Hudson, qui seraient de possibles reliques de la migration post-glaciaire de la baie d'Ungava, une hypothèse confirmée par notre découverte d'une petite interconnexion entre les deux bassins versants, la colonisation

de nouvelles rivières dans le bassin versant de la baie d'Hudson est moins probable car elles sont principalement inaccessibles et éloignées des populations anadromes établies.

2.3 Introduction

Atlantic salmon (*Salmo salar*) is an anadromous species found in the North Atlantic and Arctic Oceans, reproducing in rivers across North America and Europe. The northernmost populations are found in Europe in the rivers of northern Norway at about 70° North (Bilous & Dunmall, 2020). In North America, the northernmost population is in the Kapisillit River (64°N), the sole population of Greenland, which is facing a decline due to overfishing (Hedeholm *et al.*, 2018). At 58° north, populations are established in the four major watersheds that drain into the southern Ungava Bay: Leaf River, Koksoak River, Whale River and George River. These watersheds are located in Nunavik, the northern tip of the province of Quebec (Canada). Nearby, on the Labrador Coast, Atlantic salmon is found in rivers up to 57° north, with a population in Webb Creek, but none were reported farther north (Anderson, 1985; Andrews & Coffey, 2009). For the marine distribution in northern Canada, the Atlantic salmon is common in the Labrador Sea and the Ungava Bay, but also present more sporadically in the Hudson Strait and Baffin Bay (Andrews & Coffey, 2009; Bilous & Dunmall, 2020).

Historically, a first commercial salmon fishery was operated by the Hudson's Bay Company on the Koksoak, Whale and George rivers from the 1880s until the 1930s and it was reported that the stocks declined during that period (Dunbar, 1952). Another commercial Atlantic salmon fishery started in 1961 on the Koksoak and Whale rivers and the populations appear to have been overfished, especially on the Koksoak River (Le Jeune, 1992; Power & Le Jeune, 1976). There is no more commercial fishing of Atlantic salmon in Nunavik, since it was banned in 2000, but the Atlantic salmon is still harvested by Inuit and sports fishermen (April *et al.*, 2023). The current status of the Ungava Bay Atlantic salmon populations is unknown due to the lack of information about the stocks (COSEWIC, 2011).

The rivers in Nunavik are cold and the Atlantic salmon is therefore characterized by a slow growth, resulting in older (3-7 years) and bigger smolts compared to meridional populations (Lee & Power, 1976; Power, 1958a). The Atlantic salmon in Nunavik also adopted alternative migratory patterns. Not all individual migrate to the sea: some will stay their entire life in freshwater even without migratory obstacles, estuarine salmon will only migrate to the estuary of their river for feeding without going to sea and others will adopt a mix of migratory patterns (Belzile *et al.*, 1990; Brûlé, 2022; Robitaille, 1984). It was suggested that the estuarine migration pattern was caused by the Ungava Bay remaining too cold for too long in the spring, which prevents salmon from going to sea until late in the season resulting in a proportion of individuals remaining in the estuary instead of migrating at sea (Lee & Power, 1976; Power, 1981). These unique estuarine and mix migratory

behaviours, that were particularly studied in the Koksoak watershed, but are also observed in the three other Atlantic salmon rivers of Nunavik (Brûlé, 2022; Carbonneau *et al.*, 2024), are likely a consequence of the hardness of the conditions of the environment (Brûlé, 2022; Power, 1981; Robitaille *et al.*, 1986). Nunavik is also known for the Atlantic salmon present in the estuary of the Nastapoka River (57°N) on the Hudson Coast, but those individuals are likely just landlocked salmon coming from upstream (April *et al.*, 2023).

Atlantic salmon is absent from rivers further north in Nunavik because of the water temperatures being too cold for the establishment of populations (Power *et al.*, 2008; Salenius, 1973). With climate change, the water temperatures of the rivers are expected to increase (Botero-Acosta *et al.*, 2022; Hedger *et al.*, 2013; Jonsson & Jonsson, 2009; Santiago *et al.*, 2020; Van Vliet *et al.*, 2013) and salmonid fish distribution to shift northward (Dunmall *et al.*, 2016; Jonsson & Jonsson, 2009). Therefore, Atlantic salmon could be found in more rivers across the arctic and subarctic including the rivers of Nunavik. Also, with the river temperatures increase, some established subarctic populations have already experienced incipient lethal water temperatures (Geissinger *et al.*, 2024) which could be exacerbated in the future.

In order to study water temperatures in areas with limited water temperature observations, such as Nunavik, the use of thermal remote sensing data becomes a great alternative to *in situ* measurements (Dugdale, 2016; Handcock *et al.*, 2006; Rincón *et al.*, 2023; St-Hilaire *et al.*, 2023). In recent years, many studies have used the freely available thermal infrared data from Landsat satellite missions to estimate the surface temperature of waterbodies (Daigle *et al.*, 2022; Dyba *et al.*, 2022; Halverson *et al.*, 2022; Martí-Cardona *et al.*, 2019; Rincón *et al.*, 2023; Tavares *et al.*, 2020; Vanhellemont, 2020). Indeed, it can provide spot estimations of the Water Surface Temperature (WST) for the last 40 years. However, it is limited to large rivers that have a minimal width of 180 - 360 m, depending on the Landsat mission, due to the mixing of water and non-water pixels (Handcock *et al.*, 2006). The unmixing algorithm of Martí-Cardona *et al.* (2019) allows estimating WST on smaller streams, but it is computationally intensive.

To model the water temperature, statistical models have been tested and found to be efficient in simulating the river temperature from air temperature (Caissie *et al.*, 2001). Among the statistical models, the generalized additive model (GAM), a non-linear non-parametric regression model, has proven to perform better than other models to predict water temperature (Abidi *et al.*, 2022; Laanaya *et al.*, 2017; Ouarda *et al.*, 2022).

The aim of the study is to determine if new rivers in Nunavik could be colonized by Atlantic salmon by the end of the century in terms of accessibility and suitable summer water temperature. These

are only two factors that will affect the potential colonization of new rivers by the Atlantic salmon. Many more aspects will impact the colonization success such as the availability of suitable habitat and the interactions with fish species already present (Bilous & Dunmall, 2020; Nielsen *et al.*, 2013), but the focus of this study is only on the river accessibility and the river temperature.

First, a literature review was completed to list all known observations of Atlantic salmon outside of the official Nunavik salmon rivers to verify if the Atlantic salmon is already present in other rivers and to get an up-to-date distribution of Atlantic salmon in Nunavik. For instance, in Nunavut, Bilous et Dunmall (2020) have collated many observations of Atlantic salmon and some were captured far north in coastal areas and surprisingly also in some rivers and lakes.

Then, the accessibility of the rivers of Nunavik was evaluated to identify which rivers and river reaches are accessible to Atlantic salmon and to verify also if salmon is absent from the other rivers simply because they are not accessible. The obstacles were identified with the literature, topographic data and satellite base map imagery. The rivers were classified in three classes: 1) accessible rivers with no obstacles, 2) rivers with potential obstacles and 3) inaccessible rivers due to a major obstacle.

The mean daily water temperature was modelled on sites along the accessible and potentially accessible rivers with a Generalized Additive Model (GAM) using the air temperature and the day of the year to predict the water temperature. The model used was calibrated using daily water temperatures from the RivTemp database (Boyer *et al.*, 2016) when available and remote sensing thermal infrared data from the Landsat missions when the rivers are large enough. For the air temperature, two gridded meteorological datasets Daymet and ERA5-Land were compared against observed air temperatures and ERA5-Land was chosen since it performed better to simulate the daily mean air temperature during the summer.

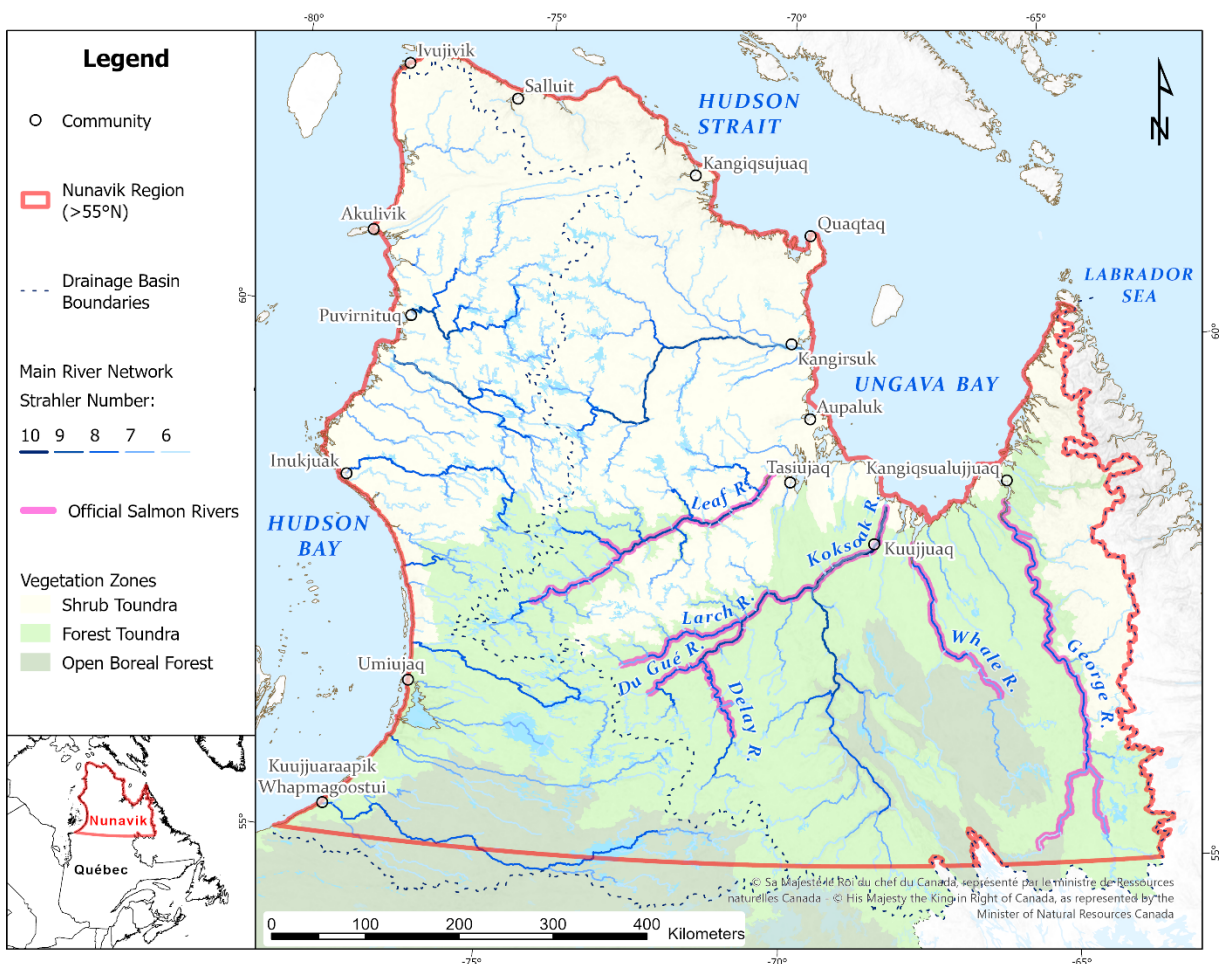
The goal is to evaluate the current thermal regime of Nunavik rivers by computing thermal indicators for Atlantic salmon based on the literature and compare the indicators between salmon rivers and non-salmon rivers. Then with climate simulations, the GAM models were run with future air temperatures scenarios to 1) provide future water temperature scenarios, 2) identify which rivers are likely to have a thermal regime similar to the current salmon rivers and 3) verify if water temperature could increase enough to cause potential thermal stress.

This study is among the first ones to use remote sensing thermal infrared data from Landsat to predict the potential future water temperatures of arctic and sub-arctic rivers, with the notable exception of Rincon et al. (2023) who focused on only one drainage basin: the Larch River.

2.4 Method and Data

2.4.1 Study site

Nunavik is the territory above the 55th parallel north in the province of Quebec that stretches all the way to the Cape Wolstenholme near the 63rd parallel north (Figure 6). The treeline crosses the territory at roughly 58° north, the southern part of Nunavik is in the forest tundra and open boreal forest compared to the higher latitude and elevation portions which are in the shrub tundra (Morneau *et al.*, 2021). All analysis were conducted along the main river network defined, for the purpose of this study, as all waterbodies with a Strahler number equal or superior to six selected from the *Géobase du Réseau Hydrographique du Québec* (www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/grhq). These data allow for hydrological analysis and are an enhanced version of the original National Hydro Network from Natural Resources Canada. The main river network stretches over 27,500 km in Nunavik.



2.4.2 Identification of the current Atlantic salmon presence in Nunavik

A literature review was conducted to identify the current presence of Atlantic salmon in freshwater of the Ungava and Hudson watersheds using Google, Google Scholar and Hydro Québec Environment & Communities Documentation Centre with the following keywords: “salmon”, “salmo”, “saumon”, “ouananiche”, “Nunavik”, “Ungava”, “Hudson”, “Koksoak”, “Melèze”, “Larch”, “Delay”, “Du Gué”, “George”, “à la Baleine”, “Whale”, “Leaf”, “aux Feuilles” and “Nastapoka”. The literature review included not only peer-reviewed articles but also reports from governmental ministries and agencies.

2.4.3 Identification of the accessible river network

For assessing the accessibility of the river network, it was assumed that there is no maximum distance that an Atlantic salmon can migrate upriver. Atlantic salmon spawners can migrate up an entire watershed to spawn as long as there are no obstacles, either permanent or temporary, of anthropogenic nature (e.g., dams, roads, pollution) or natural origin (falls, shallow depths) restricting their movement (Thorstad *et al.*, 2010). The longest reported Atlantic salmon migrations were up to 1,000 km in the Elbe and Rhine rivers in Europe (Monnerjahn, 2011; Wolter, 2015). In North America, the longest migration was 645 km on the Connecticut River (Gephard, 2008).

The Atlantic salmon's ability to pass an obstacle is highly variable and is determined by many factors: obstacle's height and slope, pool depth beneath the fall, flow, water level, water temperature, fish's size and condition (Larinier *et al.*, 1994; Thorstad *et al.*, 2010; Thorstad *et al.*, 2008). For instance, Beach (1984) observed an individual passing a 3.65 m fall, but a lower obstacle, with a less suitable morphology, could be harder to pass for the same fish (Thorstad *et al.*, 2008). Therefore, in most cases the passability of an obstacle cannot be properly assessed without an on-site validation and even ichthyological inventory. Cases of identification of fish obstacles by remote sensing mostly relied on Lidar data (Kuiper *et al.*, 2023) and such data in Nunavik are only available for the small territory of each community along the coast.

Potential obstacles were located by examining the full length of the main river network with the literature, topographic data (NRCan CanVec) and satellite base map imagery (Table 4). In the literature, 16 obstacles were identified as obstacles for the salmonid and pictures were found for 30 potential obstacles which helped to assess the passability of the obstacles. Two types of obstacles were identified: waterfalls and low water level sections.

Table 4 Data used to identify the potential obstacles to the fish passage on Nunavik main river network

Data source	Details
Literature - Salmonid studies - Environmental impact studies - River paddling river guide reports - Northern Quebec Photo Bank	Various literature sources which identify 16 obstacles for the fish and provide gathered photos for 30 potential obstacles.
Canadian Topographic Data (NRCan – CanVec) - Hydrographic obstacles - Contours lines	Hydrographic obstacles (i.e., falls, rapids) are identified in the CanVec data and the concentration of two or more contour lines indicates an important waterfall.
Imagery Base Maps - ESRI World Imagery - Google Earth Imagery	These high-resolution satellite base maps imagery help to confirm the presence of waterfalls, their morphology and to locate potential low water level sections.
Toponymy Commission of Quebec	When available, the official toponym was used to name the obstacles.

The waterfalls were identified where there was a hydrographic obstacle listed on the topographic data, concentration of the contour lines and big water movements visible on the satellite base map imagery (Figure 7). Most found waterfalls were classified as potential obstacles since their passability couldn't be confirmed with the available data. However, some obstacles were clearly impassable either because they were identified as is by previous on-site study ($n = 15$) or because the elevation gain was too high for the Atlantic salmon to swim up those falls which was defined as an abrupt waterfall of at least 10 m estimated with the contour lines. Obstacles identification was not pursued above those clearly impassable obstacles.

The low water level sections were identified with the ESRI World Imagery (available at: <https://www.arcgis.com/home/item.html?id=10df2279f9684e4a9f6a7f08febac2a9>) which has a very good resolution (up to 30 cm) for most of the Nunavik. Those sections were pinpointed where the riverbed was extensively visible with limited visible water (Figure 7). Very low water level river sections in small rivers have been reported by Inuit to be more frequent in recent years which can block the migration of anadromous fish (Dubos *et al.*, 2023a; Dubos *et al.*, 2023b). Therefore, it was decided to include the dry/shallow river sections that were observed with the satellite base map imagery as potential obstacles.



Figure 7 Examples of the obstacles identification with pictures, topographic data and satellite basemap imagery: A) Impassable waterfalls on the Clearwater River (southern Hudson Bay); B) Potential impassable low water level section on the Curot River (southern Ungava Bay)

2.4.4 River Temperature Modelling

The water temperatures of the rivers were modelled with the nonparametric Generalized Additive Model (GAM) along the main river network. The air temperature and the day of the year were the explanatory variables used to predict the water temperature. The GAM, developed by Hastie et Tibshirani (1986), is a non-linear regression model which can take into account the non-linearity between the explanatory and dependent variables using smoothing functions. The GAM model can be expressed as shown in Equation 1, where g is a link function that relates the mean of the dependent variable to a set of explanatory variables, $E(y)$ is the expected value (mean) of the predicted variable, β_0 is equivalent to the intercept in linear regression, f_i ($i=1\dots n$) are the smoothing functions (here, cubic splines were used) of the explicative variables and ε is the estimated error:

$$g(E(y)) = \beta_0 + f_1(x_1) + f_2(x_2) + \dots + f_n(x_n) + \varepsilon \quad (1)$$

The execution of the models was carried out with the *mgcv* package (Wood, 2011) in the R software (4.0.4). A Gaussian function was used for the link function to model river temperature because this function is more suitable than a sinusoidal function for modelling Quebec rivers (Daigle *et al.*, 2019). The Restricted Maximum Likelihood method was used for the smoothing function and the gamma parameter, where a higher value increases the smoothing, was set at 1.0, but the values of 1.4 and 2.0 were tested as well. The GAM model performance was evaluated with the Root Mean Squared Error (RMSE) and the number of data used in the model.

2.4.4.1 Water temperatures

Two types of water temperatures were used in the GAM models. First, observed temperatures from the RivTemp network (Boyer *et al.*, 2016) were used. RivTemp is a database of water temperature time series gathered by various partners for rivers across Eastern Canada. On the Nunavik main river network, there are 59 sites all monitored by the Quebec Ministry of Forests, Wildlife and Parks with data that range from a few months to six years.

In addition to observed temperature, Water Surface Temperature (WST) was estimated, through remote sensing, with the algorithm developed by Ermida *et al.* (2020) for the Google Earth Engine cloud computing platform (GEE). To estimate the Land Surface Temperatures (LST) globally from 1982 to the present, the algorithm utilizes the United States Geological Survey (USGS) thermal data from Landsat satellite's missions 4, 5, 7, 8 and 9 (Table 5) and the global Total Column Water Vapor (TCWS) data measured every 6 hours by the National Center for Environmental Prediction and the National Center for Atmospheric Research. *LST* is estimated with the Statistical Mono-Window algorithm where Tb is the top of the atmosphere's radiance measured by the Landsat thermal sensors, ε is the emissivity of the studied object and A , B and C are coefficients calculated for each sensor based on the TCWS at the time of the measurement:

$$LST = A \frac{Tb}{\varepsilon} + B \frac{1}{\varepsilon} + C \quad (2)$$

Since in this case, the studied object is always water, the emissivity was fixed at 0.99 (Daigle *et al.*, 2022; Dyba *et al.*, 2022) instead of using, as in the original script, the emissivity from the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Emissivity Database

(ASTER GED) corrected with the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) of the scene when captured by the satellite.

The United States Geological Survey (USGS) has recently released the Landsat Collection 2 and Level 2 product with the surface reflectance and land surface temperature (LST_L2) already calculated (USGS, 2021; USGS, 2022). However, this product was not used because LST_L2 is estimated based on the ASTER GED emissivity which does not fully cover the globe surface (USGS, 2022). Therefore, some areas of Nunavik with rivers of interest are not available in the LST_L2. Furthermore, it is more accurate to estimate the WST with the Ermida *et al.* (2020) GEE algorithm with the emissivity set at 0.99, than using the LST_L2 estimations from USGS (Dyba *et al.*, 2022).

Table 5 Details of the Landsat missions and the minimum river width to estimate water surface temperature based on Handcock *et al.* (2006) recommendations

Mission	Sensor	Availability period	Return time	Spatial resolution (m)	Minimum river width (m)
Landsat 4	TM	1980 – 1993	16 days	120	360
Landsat 5	TM	1984 – 2012	16 days	120	360
Landsat 7	ETM+	1999 – present	16 days	60	180
Landsat 8	TIRS	2013 – present	16 days	100	300
Landsat 9	TIRS-2	2021 – present	16 days	100	300

The estimation of WST with Landsat thermal infrared data is limited to large rivers only. The original Landsat thermal infrared pixel resolutions are between 60-120 m and as the published thermal pixels by USGS are resampled to 30 m by cubic convolution it results in a thermal gradient perpendicular to the bank with mixed pixels of water and bank temperatures (Handcock *et al.*, 2006; Martí-Cardona *et al.*, 2019). Therefore, to avoid contamination with bank temperature, water temperature estimation sites must be on rivers with a minimum width of 3 times the original pixel resolution (Handcock *et al.*, 2006). For this study, to have sufficient data, the estimation of WST was done only on rivers that are at least 300 m wide so the data from Landsat 7, 8 and 9 can be used, but most WST estimation sites were on rivers of at least 360 m wide so the data of all Landsat missions can be used. The selection of the site is very important for WST estimation to avoid land pixel contamination. To ensure that WST estimation sites are far enough, at all times, from non-water pixels, water masks were made from the occurrence dataset of the Global Surface Water v1.4 (GSW), a European Commission's Joint Research Centre product, that uses

Landsat imagery to calculate the change of water extent globally from 1984 to 2021 (Pekel *et al.*, 2016).

The sites for WST estimations were selected within the water mask polygons created by selecting the GSW pixels with a minimal occurrence of 80% which were vectorized and the water polygons were buffered internally with a radius of 150 and 180 m. The same procedure was done with pixels with an occurrence of 90% (Figure 8). Most WST estimations sites, 53 sites of a total of 78, were on rivers with a minimal width of 360 m and GSW occurrence of at least 90%.

The WST estimation sites were selected where the river was wide enough, but also where the site was located, as much as possible, in a lotic environment, identified with the satellite base maps imagery and topographic data. The relatively high velocities and turbulence ensured that there is sufficient mixing of the water to ensure that the surface temperature is representative of the water column (Dugdale, 2016).

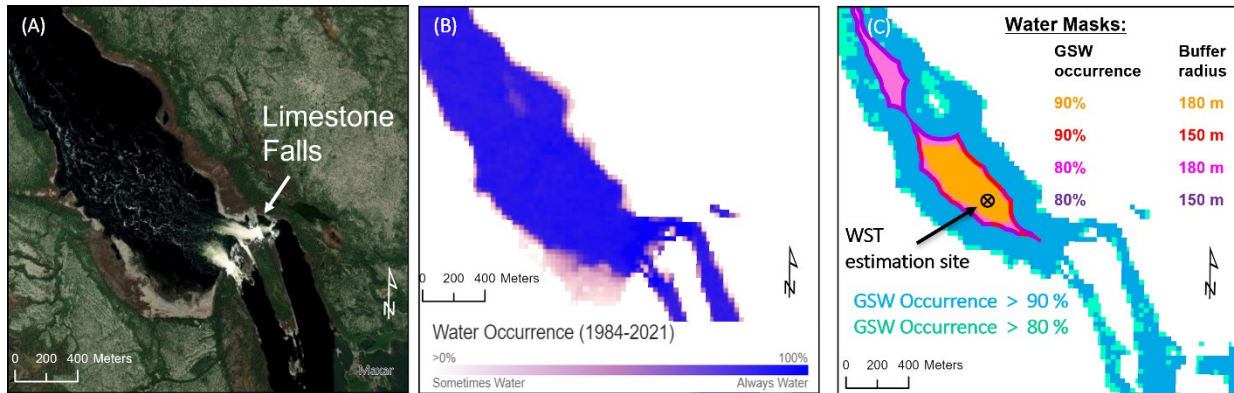


Figure 8 Example of the selection of a Water Surface Temperature estimation site on the Caniapiscu River just below the Limestone Falls using the (A) ESRI World Base Map Imagery and (B) the Global Surface Water product (Pekel *et al.*, 2016) to create (C) water masks far enough from non-water pixels.

In Nunavik, the acquisition time of the Landsat imagery is between 10:30 and 12:30 (Eastern Daylight Time; UTC-04:00) depending on the missions and the site location. The observed temperatures measured at those times show the minimal deviation from the daily mean temperature (see results section). Therefore, the Landsat WST is used in the GAM model as a proxy of the daily mean water temperature.

When possible, the WST were compared, independently for each Landsat mission, against the observed daily mean temperatures (T_{obs}) using the root mean squared errors (RMSE) and biases:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (WST - T_{obs})^2}{N}} \quad (3)$$

$$Bias = \frac{\sum (WST - T_{obs})}{N} \quad (4)$$

The WST estimations and observed temperatures were used in the GAM models either combined when possible or separately. When observed temperatures were used solely, only the stations with at least five years of data were kept. Only the water temperatures above 7 °C were kept for the GAM models to completely avoid the thawing season when ice can still be on the rivers and bias the WST estimations.

2.4.4.1 Air temperature

In Nunavik, air temperature observations are limited since there are not many weather stations across this vast territory. Most stations are relatively new, sparsely distributed and primarily located near the coasts. Consequently, gridded products were assessed to identify the optimal air temperature for the GAM models. Two products, Daymet and ERA5-Land, were validated against observed temperatures from available weather stations to determine the most accurate dataset. The NRCAN ANUSPLIN daily gridded dataset (McKenney *et al.*, 2011), used in similar modelling (Abidi *et al.*, 2022; Charron *et al.*, 2021), was not considered as the data are not available after 2017.

Daymet, from the Environmental Sciences Division of the Oak Ridge National Laboratory, provides daily (standard local time) near-surface weather data, including minimum and maximum air temperature, from the interpolation and extrapolation of daily observed data, with a grid resolution of 1 x 1 km covering North America since 1980 (Thornton *et al.*, 2022). The daily Daymet minimum and maximum temperatures were downloaded for each weather station using the multiple sites extraction script from Daymet and the daily mean was calculated.

ERA5-Land, from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF), is an hourly global dataset (grid resolution of 0.1° x 0.1°) providing multiples variables for land applications and made from the reanalysis of the fifth generation of European Reanalysis Dataset (ERA5) which combines model data and observations (Muñoz-Sabater *et al.*, 2021). The hourly ERA5-Land two meters minimum and maximum air temperatures were extracted and aggregated

per day in standard local time (Eastern Standard Time; UTC-05:00) using Google Earth Engine and mean air temperature was calculated as well.

As Daymet relies on observation data from Environment Canada weather stations (Thornton *et al.*, 2021), these stations were excluded from the validation process. Instead, data from the provincial Quebec Climate Monitoring Network (MELCC, 2020), which comprises 64 stations in Nunavik, were used for validating both Daymet and ERA5-Land. To get a good temporal representation, only the stations with a minimum of 10 years of data and located within the coverage of ERA5-Land, which is limited near the shore, were selected for the analysis (n=44). Solely the daily observed temperatures (minimum, mean and maximum) that met all quality control requirements from the Quebec Climate Monitoring Network were kept for the validation of Daymet and ERA5-Land temperatures. The comparison of the air temperatures was conducted for two periods: first over the full years and just for the summer period (June 1 to September 30) as it is the period of interest for the water temperature modelling. The RMSE and bias were calculated to compare the two products.

Since ERA5-Land performed better to estimate the daily mean air temperature than Daymet (see Results section), ERA5-Land daily mean air temperature was used for the GAM modeling of the river temperature.

2.4.4.2 Climate simulations

To predict historical and future water temperature, the GAM models were run with simulated air temperatures from Ouranos Ensemble of Bias-adjusted Simulations - Global models CMIP6 (ESPO-G6-R2) that cover North America at a 0.1° resolution from 1950 – 2100 (Lavoie *et al.*, 2024). The simulated air temperatures were extracted for each site on the PAVICS platform (<https://pavics.ouranos.ca>). This ensemble corrects the bias of the global models with the detrended quantile mapping method (Cannon *et al.*, 2015) and the Regional Deterministic Reforecast System (RDRS) v2.1, a reanalysis product (Gasset *et al.*, 2021) as the reference dataset. Utilizing reanalysis dataset for bias correction appears to be more accurate than interpolated gridded observations datasets for areas with sparse observation density (Carvalho *et al.*, 2021; Essou *et al.*, 2017), which is the case in Nunavik. The ESPO-G6-R2 dataset was chosen for this reason. Given the importance to capture the full spectrum of climate variability (Rahimpour Asenjan *et al.*, 2023), all models (between 24-26 models depending of the emissions

scenarios) were kept for this study. The “hot models”, as defined by Hausfather *et al.* (2022), were not excluded in order to ensure a comprehensive assessment of the potential water temperature variability. The mean, 10th percentile and 90th percentile of the daily model simulations were calculated for the medium (SSP2-4.5) and high (SSP5-8.5) emissions scenarios and were used with the GAM models to predict the water temperature for each site under different climate scenarios.

2.4.4.3 Thermal indicators for Atlantic salmon

Yearly thermal indicators were computed from the predicted water temperatures to facilitate the comparison of the rivers across historical and future periods (Table 6). In the context of assessing the potential colonization of new subarctic rivers by Atlantic salmon, these indicators mostly focus on the minimum freshwater temperatures needed for the survival and growth of this species. Atlantic salmon eggs, juveniles and smolts can survive in water temperature around 0 °C (Elliott & Elliott, 2010) and juveniles acclimated to cold temperature have been reported to feed and sustain growth at temperature as low as 1 °C (Elliott & Elliott, 2010; Finstad *et al.*, 2004). Atlantic salmon can withstand and grow in very cold temperatures, but those temperatures are not relevant indicators for this study since these temperatures are too close to zero and the rivers would be covered by ice, which makes it impossible to estimate the temperature by remote sensing. Instead, the number of days with optimal temperatures for Atlantic salmon maximum growth, defined as water temperatures between 16 °C and 20 °C for Norwegian populations (Elliott & Elliott, 2010), was selected as an indicator. Although these optimal growth temperatures were not measured for North American populations, they can still provide a good estimate of the growing season in the absence of local data. However, some salmon rivers in Nunavik barely reach those temperatures during the summer. Therefore, another indicator, the number of days with water temperature between 7 °C and 22 °C, was used to better represent the growing period in a cold climate. It is based on the only study (Jensen & Johnsen, 1986) that looked at the growing season for Atlantic salmon related to water temperature in cold rivers in northern Norway: the growing season for Atlantic salmon was established at between 67 and 149 days with water temperature above 7 °C. Although, the focus was on the minimal temperature requirements for the establishment of Atlantic salmon populations, the number of days with primarily thermal stress, when the daily mean water temperature is above 22 °C (Elliott & Elliott, 2010; Heggenes *et al.*, 2021), was also evaluated to determine the presence of current and future thermal stress

in Nunavik rivers. Additionally, two other indicators, the mean and maximum summer temperatures, were evaluated to quantify the general potential changes in the river temperatures.

Table 6 List of the Atlantic salmon thermal indicators aggregated for each period (1981 - 2010, 2011 - 2040, 2041 - 2070, 2071 - 2100)

Indicators	Rational
Days with optimal growth for salmon: Mean temperature between 16 - 20 °C	Evaluate the optimal growing condition for salmon.
Days with growth for salmon: Mean temperature between 7 - 22 °C	Quantify the growing season length for the salmon in a subarctic environment.
Days with thermal stress: Mean temperature > 22 °C	Verify the presence of thermal stress for salmon.
Mean summer water temperature (July – September)	Assess the general trend of the water temperature of the rivers.
Maximum summer water temperature (July – September)	Identify the potential maximum water temperature of the rivers.

2.5 Results

2.5.1 Atlantic salmon presence in Nunavik

The Atlantic salmon presence in Nunavik was extensively studied in the Koksoak River watershed (Figure 9), particularly after the diversion in 1983 of a 36,900 km² area from the upper Caniapiscou River watershed, already inaccessible due to the Limestone Falls (Power, 1958a), to the La Grande hydroelectric complex (Roy & Messier, 1989). Many spawning sites and reaches with juveniles have been documented (Belzile *et al.*, 1982; Belzile *et al.*, 1984; Côté *et al.*, 1979; FaunENord, 2017) with juvenile present in the Delay River at more than 530 km from the mouth of the Koksoak River (Belzile *et al.*, 1982; FaunENord, 2017). Landlocked Atlantiquesalmon populations are also established above impassable waterfalls in Lake Aigneau and the Caniapiscou River (Power, 1958a).

The other salmon rivers were less extensively studied. Atlantic salmon were caught in Jeannin and Privert Lakes upstream of the official salmon river limit on the Whale River (Hydro-Québec, 1978). An electrofishing campaign carried by the Quebec Ministry of Forests, Wildlife and Parks

on some tributaries of the lower George River allowed to find juveniles in two streams (MFFP, 2019 – unpublished data). On the Leaf River, Lee et Power (1976) used rotenone to sample tributaries on the lower reach but found no salmon juvenile. Atlantic salmon has been reported occasionally in non-official salmon rivers of southern Ungava Bay (Table 7): all rivers between Kuujjuaq and Kangiqsualujjuaq (Dunbar & Hildebrand, 1952), as well as in the Bérard River near Tasiujaq and the Koroc River near Kangiqsualujjuaq (Dubos *et al.*, 2023a), but no spawning evidence was yet recorded in those rivers.

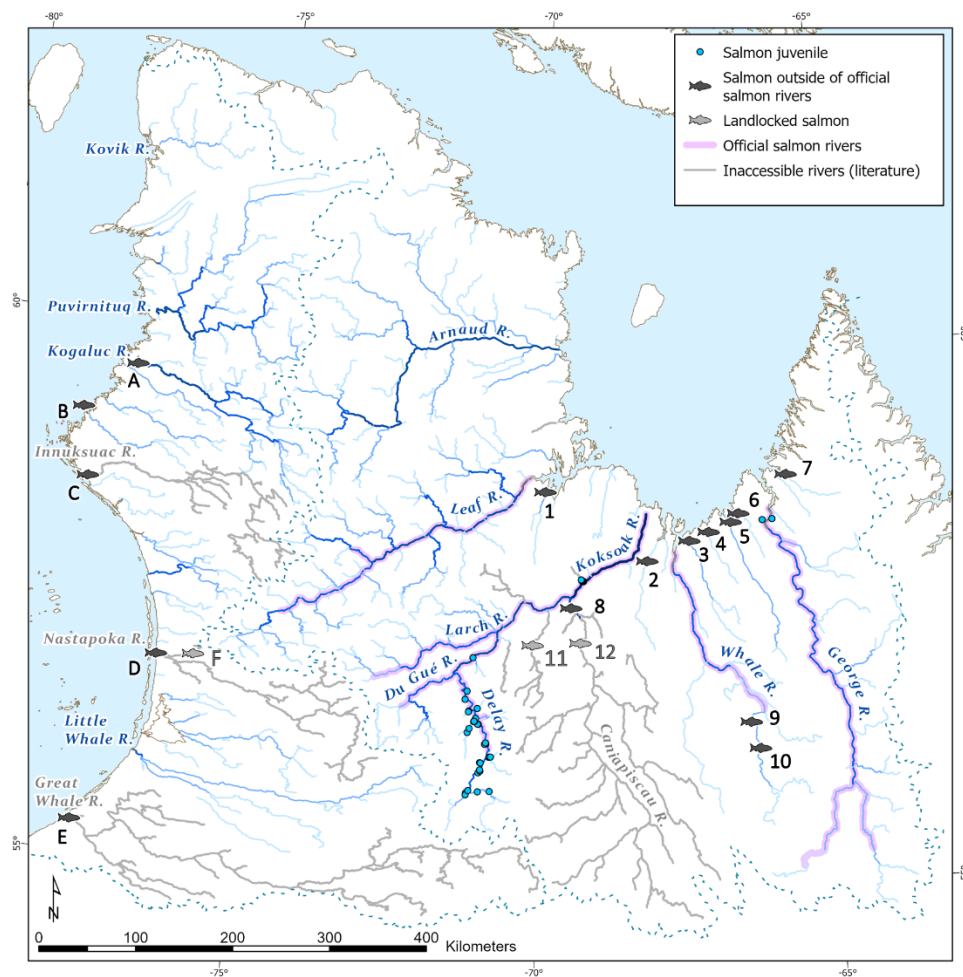


Figure 9 Map of Atlantic salmon presences in Nunavik with the inaccessible rivers identified in the literature.

On the Hudson Bay watershed, Atlantic salmon is practically absent. Some individuals inhabit the brackish waters of the 1.4 km long estuary of the Nastapoka River at the foot of an impassable waterfall (Hydro-Québec, 1993; Legendre, 1990; Morin, 1991). Landlocked Atlantic salmon is

found above these falls in the river (Hydro-Québec, 1993; Morin, 1991) and in the upstream Kakiattualuk Lake where spawning has been confirmed (Hydro-Québec, 1993). The population in the estuary is not considered anadromous because although it has access to the sea, the analysis of the scales of these individuals does not show signs of smoltification or growth associated with marine migration (Hydro-Québec, 1993; Legendre, 1990). No spawning evidence was reported in the estuary. Therefore, the presence of Atlantic salmon in the estuary could be explained by individuals descending the river from upstream, which is the position of the Quebec Ministry of Forests, Wildlife and Parks about that population (April et al., 2023).

A specimen was also captured in the Kogaluc River and identified as non-anadromous following the analysis of its scales, which showed very close growth rings associated with a slow growth (Legendre, 1990). Other captures have been recorded: in the Innuksuac River (Legendre, 1990; Morin, 1991; St-Pierre et al., 2010), at the mouth of the Great Whale River (Legendre, 1990) and in Mistake Bay (Morin, 1991). No scale analysis was performed on these specimens to determine if they were anadromous or not.

Table 7 List of adult Atlantic salmon presence outside of the official salmon rivers

Watershed	ID Map	Watercourse	References
Ungava Bay	1	Bérard River	Dubos <i>et al.</i> (2023a); Mainguy et Beaupré (2019b)
	2	False River	Dunbar et Hildebrand (1952)
	3	Marralik River	Dunbar et Hildebrand (1952); Durkalec <i>et al.</i> (2020)
	4	Tuttutuq River	Dunbar et Hildebrand (1952)
	5	Qurlutuq River	Dunbar et Hildebrand (1952)
	6	Lagrevé River	Dunbar et Hildebrand (1952)
	7	Koroc River	Cunjak <i>et al.</i> (1986); Dubos <i>et al.</i> (2023a)
	8	Caniapiscau River	Power (1958b)
	9	Lake Jeannin	Hydro-Québec (1978)
	10	Lake Privert	Hydro-Québec (1978)
	11	Lake Aigneau ¹	Power (1958a)
	12	Caniapiscau River ¹	Power (1958a)
Hudson Bay	A	Kogaluc River	Legendre (1990)
	B	Mistake Bay	Morin (1991)
	C	Innuksuac River	Legendre (1990); Morin (1991); St-Pierre <i>et al.</i> (2010)
	D	Nastapoka River	Hydro-Québec (1993); Legendre (1990); Morin (1991)
	E	Great Whale River	Legendre (1990)
	F	Lake Kakiattualuk ¹	Hydro-Québec (1993)

¹ Landlocked Atlantic salmon

2.5.2 Accessible river network

A total of 192 obstacles were identified on the main river network with the topographic data, satellite basemap imagery and the literature (Figure 10). In the literature, 15 obstacles to the fish movements were listed (Figure 9): nine on the Koksoak watershed (Belzile et al., 1984; Côté et al., 1979; Le Jeune, 1981; Le Jeune & Shooner, 1982; Power, 1958a), one waterfall on the Red Dog River near Aupaluk (Mainguy & Beaupré, 2019a), three waterfalls on the Innuksuac River (St-Pierre *et al.*, 2010), the Nastapoka Waterfall (Morin, 1991) and the Qurlutuq Waterfall on the Great Whale River (Hydro-Québec, 1993).

In total, waterfalls were the most recorded obstacles ($n = 141$) with 99 waterfalls identified as potentially impassable and 42 as impassable. All low water level sections ($n = 51$) were found in small streams only (Strahler number = 6): 43 sections were classified as potential obstacles and 8 as impassable because the riverbed was completely dry showing a complete discontinuity of the river network.

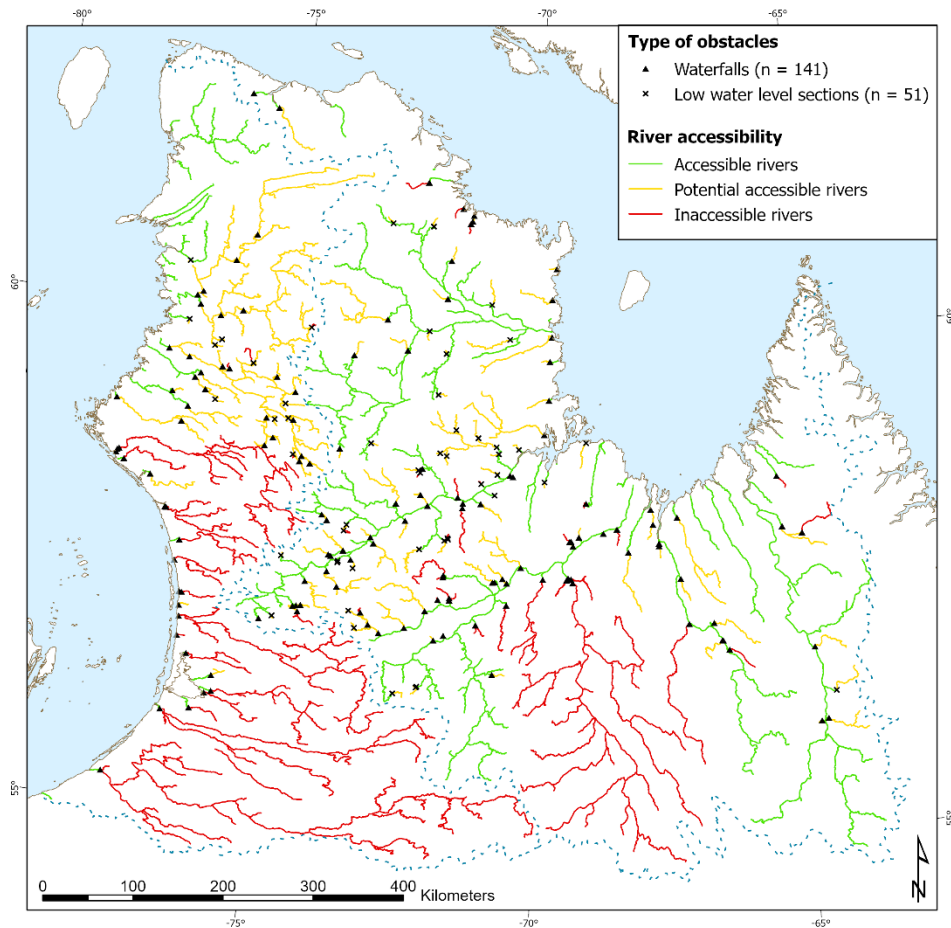


Figure 10 Map of the identified obstacles, waterfalls and low water level sections, on the Nunavik main river network (Strahler ≥ 6).

2.5.3 River diffluences

While assessing the rivers' accessibility, three river diffluences were found (Figure 11). These are locations where the flow of a watercourse diverges into two separate watersheds. Those diffluences were found because of inaccuracies in the official data of the provincial hydrographic network and were validated with the satellite base map imagery.

One diffluence is between the watershed of the Great Whale and Little Whale rivers, in Southern Hudson Bay, that was noticed because the ordering of the Strahler number was inconsistent. Still on the Hudson Bay watershed, a portion of the flow of the Innuksuac River goes into the Kogaluc watershed which was found because of a mismatch between the river network and the watershed delimitation. For the same reason, another divergence was found between the upper Innuksuac River and the La Goudalie River, a tributary of the Leaf River, which its lower reach has the official salmon river status. In that case, the Ungava Bay and Hudson Bay are interconnected by a small channel between lakes in the headwaters of the Innuksuac and Leaf rivers.

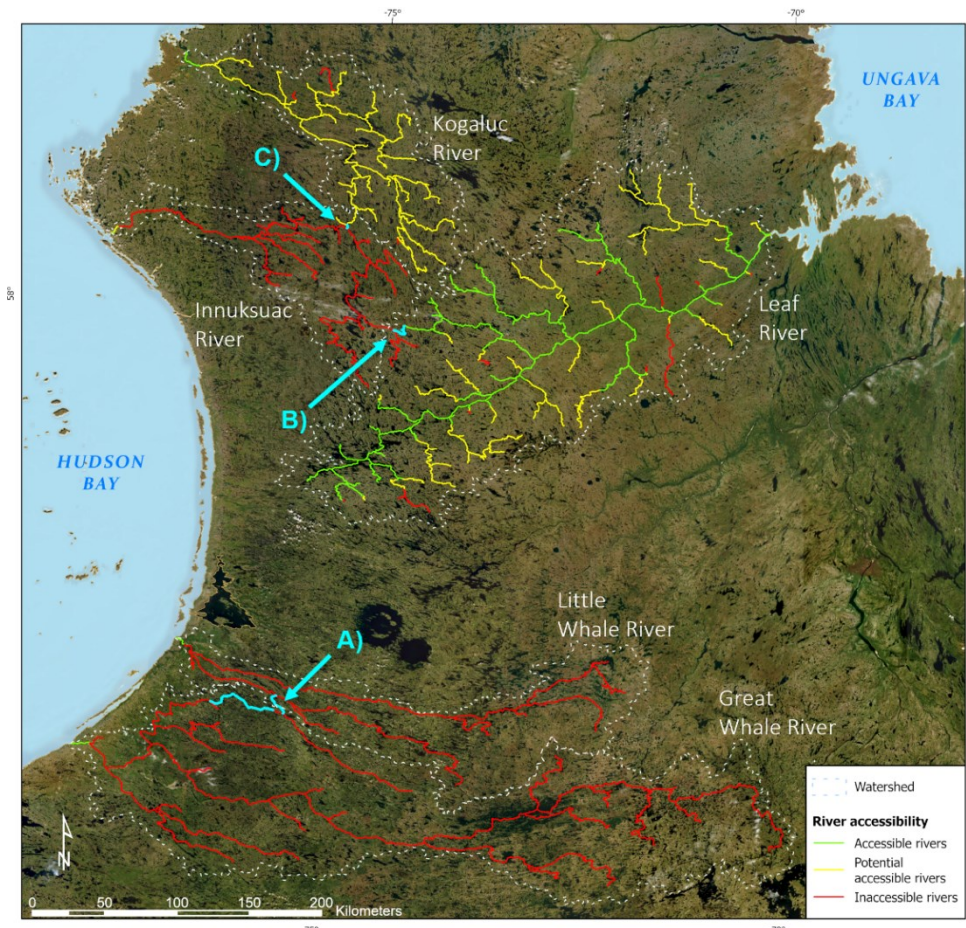


Figure 11 Diffluences found in Nunavik: A) an unnamed river split between the Great Whale and Little Whale rivers, B) a portion of the upper Innuksuac River drain into the Leaf River and C) a portion of the Innuksuac River drain into the Kogaluc River.

2.5.4 River Temperature Modelling

2.5.4.1 Air temperature validation

The RMSE and the bias was calculated from the comparison of daily mean air temperature estimated by Daymet and ERA5-Land against air temperatures observed during the summer period (June 1 to September 1) at 20 weather stations (Figure 12). For Daymet, the mean RMSE value is 2.34 °C and the mean bias is -0.20 °C. For ERA5-Land, the mean RMSE value is 1.75 °C and the mean bias is -0.58 °C. Since the RMSE is lower and bias is of the same order of magnitude with the ERA5-Land product, it was used in the GAM models.

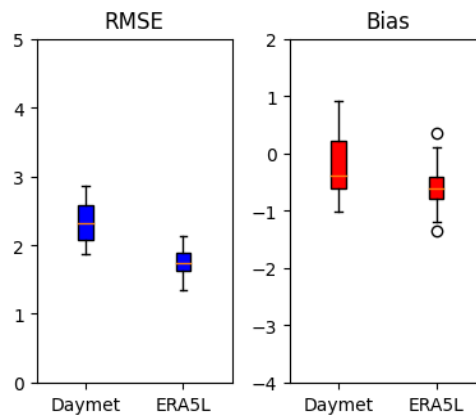


Figure 12 RMSE and bias values of the comparison of daily mean air temperature estimated by Daymet and ERA5-Land against observed air temperatures at 20 weather stations between June 1 to September 30.

2.5.4.2 Validation of Landsat water surface temperature and GAM models

The hourly water temperature was compared to the daily mean temperature at 42 measurement sites in Nunavik in the summertime (July 1 - September 30). The lowest deviation of the hourly measurement to the daily mean is between 11:00 and noon (Figure 13). The Landsat imagery are taken in Nunavik between 10:30 and 12:30 depending on the site location and the Landsat mission. During that period, the mean absolute deviation is below 0.4 °C and the percentile 95 of the absolute deviation is below 1.0 °C. Therefore, Landsat WST was used as a proxy of the daily mean water temperature.

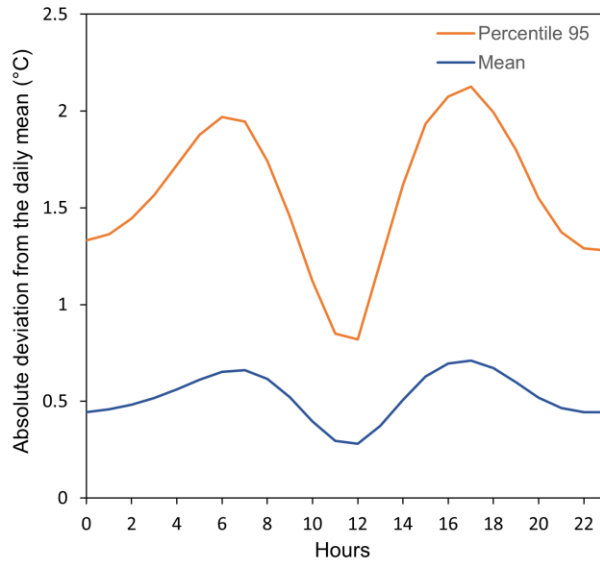


Figure 13 Comparison of hourly water temperature absolute deviation from the daily mean water temperature measured based on 12,298 daily observations at 42 RivTemp locations between July 1 and September 31.

Landsat WST estimations were possible nearby 18 RivTemp thermographs, because the rivers were large enough, so water temperature estimations and observations were combined for the GAM models. In addition, the WST estimations above 7 °C were compared, individually for each site and Landsat mission, against the observed daily mean water temperature (Table 8). The sites of the WST estimations were at a distance between 196 - 3,015 m to the thermograph. The number of concomitant data is small for each site and mission ($n < 25$) due to the limited water temperature observations in the region. When considering all locations, the RMSE and bias for Landsat 7 WST are 1.84 °C and -0.61 °C. For Landsat 8 WST, the RMSE and bias are 1.60 °C and 0.03 °C. Only 2 sites have available observed temperatures to validate the most recent Landsat 9 mission. Given the recent water temperature observations, validation of the WST estimations by Landsat 5 was not possible and there was no WST estimation above 7 °C by Landsat 4.

Table 8 Comparison of the spot Landsat Water Surface Temperatures (WST) estimations (> 7 °C) against observed daily mean water temperature at 18 RivTemp sites. The distance between the thermograph and the WST estimation site is given as well with the number of concomitant data (n).

Sites	Distance (m)	All Missions			Landsat 7			Landsat 8			Landsat 9		
		n	RMSE (°C)	Bias (°C)	n	RMSE (°C)	Bias (°C)	n	RMSE (°C)	Bias (°C)	n	RMSE (°C)	Bias (°C)
Riviere Koksoak_6	215	37	1.73	-0.77	16	2.26	-1.30	21	1.16	-0.37	-	-	-
Riviere Koksoak_7	208	36	1.60	-0.45	18	2.06	-0.69	18	0.94	-0.21	-	-	-
Riviere Koksoak_4	251	35	1.83	-0.71	22	1.51	-0.70	13	2.27	-0.73	-	-	-
Puvirnituaq_21C	2198	33	1.32	-0.11	9	1.25	-0.04	24	1.35	-0.13	-	-	-
Riviere Koksoak_8	196	33	1.13	-0.24	14	1.49	-0.47	19	0.75	-0.07	-	-	-
Arnaud_Ar2	448	27	1.72	0.24	10	1.26	-0.59	16	1.92	0.91	1	2.24	-2.24
Arnaud_Ar1	580	23	2.34	0.42	7	1.95	0.35	14	2.17	1.08	2	4.10	-3.88
Arnaud_Ar3	451	21	1.60	-0.01	7	1.15	-0.94	14	1.78	0.46	-	-	-
Passe Nallukallak_21Z	514	21	1.28	-0.40	10	1.67	-0.77	11	0.77	-0.06	-	-	-
Puvirnituaq_21A	282	17	1.67	-0.96	8	2.09	-1.41	9	1.18	-0.55	-	-	-
Aux Melezes	1625	16	1.46	-0.02	7	1.92	-0.69	9	0.96	0.51	-	-	-
Aux Feuilles_F2	759	14	1.32	0.04	10	1.19	-0.32	4	1.61	0.93	-	-	-
George River 2	285	13	1.74	-1.40	4	1.57	-1.54	9	1.81	-1.34	-	-	-
Riviere Koksoak_3	265	8	4.19	3.16	6	3.91	2.65	2	4.94	4.71	-	-	-
Riviere Koksoak_5	408	7	2.16	-1.00	3	2.49	-2.28	4	1.87	-0.03	-	-	-
Delay River	585	6	2.09	-1.47	3	1.20	-1.04	3	2.70	-1.90	-	-	-
Riviere Nepihjee_0	3015	6	1.43	-0.15	2	1.41	-1.41	4	1.43	0.49	-	-	-
Delay River 3	939	3	0.81	-0.42	3	0.81	-0.42	-	-	-	-	-	-
All sites		356	1.73	-0.28	159	1.84	-0.61	194	1.60	0.03	3	3.59	-3.34

On the accessible and potentially accessible rivers, the river temperature was modelled at 94 sites (Figure 14). The GAM model performance was evaluated by comparing the RMSE value and the number of temperature measurements used in the model (Table 9). The models that used solely observed temperatures (n = 16) performed better with the lowest RMSE values: 1.14 - 1.69 °C. Those models are fitted with observations (n = 278 - 420) made over 5 and 6 summers. In comparison the models using only Landsat WST (n = 60) are fitted with fewer temperature measurements (n = 101 - 356) but over a longer period, between 25 and 42 summers depending on whether all Landsat missions were used for the larger reaches (>360 m) or only Landsat 7 and 8 missions for the smaller reaches (>300 m). Those models show the highest RMSE values: 1.49 – 2.20 °C. The models with combined observed temperatures and WST have the most

temperature measurements (n = 234 - 678) for fitting the models, collected again between 25 and 42 summers, and the RMSE values are in between: 1.28 and 2.10 °C.

Table 9 Metrics performances of the 94 GAM models by type of water temperature used as input.

Water temperature sources	n-sites	RMSE (°C)			n		
		Min	Mean	Max	Min	Mean	Max
Landsat WST	60	1.49	1.81	2.20	101	188	356
Landsat WST & observed	18	1.28	1.69	2.10	234	455	678
Observed	16	1.14	1.40	1.66	278	334	420

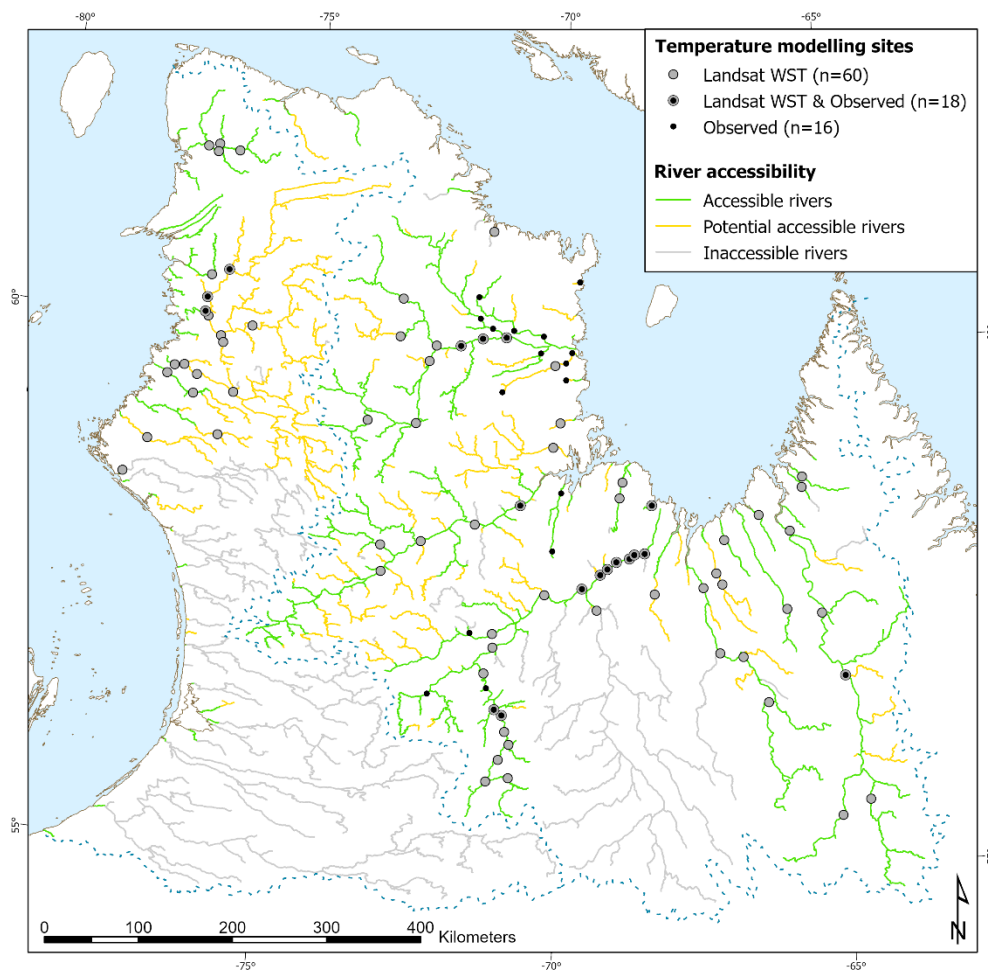


Figure 14 Map of the modelled sites (n = 94) showing the type of water temperature used for the GAM models and the river accessibility.

2.5.4.3 Thermal indicators for salmon

The thermal indicators were calculated per period based on the daily water temperature predicted with the GAMs and the climate simulations. Two thermal indicators, mean summer temperature and growth days, were compared to show the potential evolutions of the thermal regime at the 94 sites based on the location and presence of Atlantic salmon at the site from the historic period to the end-of-century with the average climate simulations (Figure 15).

The average increase of mean summer temperature for the 2071-2100 period would be between 1.44 °C (SSP2-4.5) and 2.47 °C (SSP5-8.5). When considering the results with the percentiles 10 and 90 of the climate models, mean summer temperature at each modelled site would increase between 0.48 – 2.45 °C (SSP2-4.5) and 0.90 – 4.13 °C (SSP5-8.5).

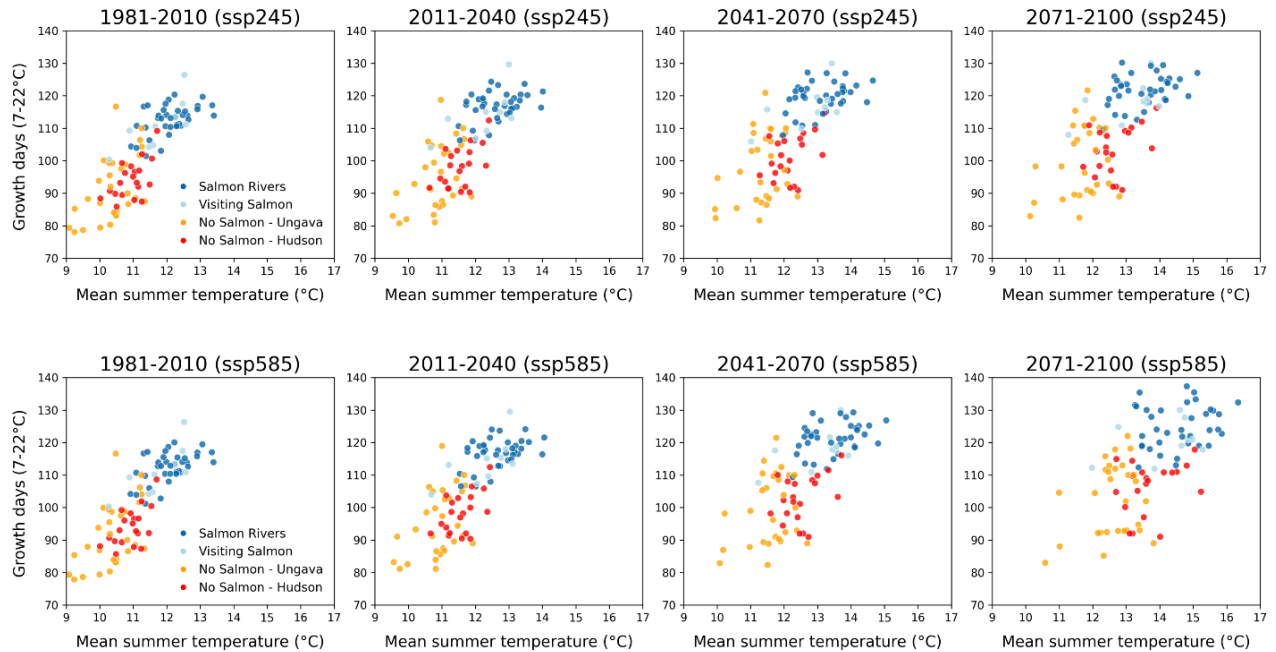


Figure 15 Evolution of two thermal indicators - growth days (7-22°C) and mean summer temperature (Jul-Sep) – for 94 sites over four periods for the average air temperature of the climate models with SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios.

The yearly indicators averaged for the historic period (1981-2010) for the 36 sites located on salmon rivers with values varying depending on the sites and the percentile of the climate air simulations (Table 10): summer mean temperature (9.2 – 15.6 °C), maximum summer temperature (11.8 – 20.2 °C), growth days (81 – 132 days), optimal growth days (0 – 57 days)

and thermal stress (0 day). The Koksoak River is the warmest river, with the highest average indicators values, and the Leaf River is the coldest salmon river.

Under mean climate simulations, the lowest values predicted on a salmon river for the mean summer temperature and growth days indicators are respectively 10.9 °C and 101 days on the Leaf River. Sites that reach at least 11 °C as the mean summer temperature and have more than 100 growth days (temperature between 7 - 22 °C), were identified for each period and emissions scenarios (Figure 16). That threshold for Atlantic salmon was used to assess, under mean climate simulations, which rivers reaches have or will have similar thermal regime to the coldest current salmon river reach evaluated herein.

Table 10 Average thermal indicators over the historical period (1981-2010) presenting the minimum, mean and maximum value encountered at 36 sites located on the 4 salmon rivers with the percentile 10 (P10), 90 (P90) and mean (M) results of the climate simulations. The average per river is also given.

Climate Simulations – Indicators		Min	Mean	Max	Average per rivers:			
					Koksoak (n = 22)	Whale (n = 4)	George (n = 5)	Leaf (n = 5)
P10	Mean summer temperature (°C)	9.2	10.6	11.9	10.8	10.5	10.7	9.5
	Maximum summer temperature (°C)	11.8	13.6	15.7	14.0	13.6	13.1	12.5
	Growth Days (7-22 °C)	81	96	109	98	92	98	86
	Optimal growth days (16-20 °C)	0	0	0	0	0	0	0
	Thermal stress days (>22 °C)	0	0	0	0	0	0	0
M	Mean summer temperature (°C)	10.9 ¹	12.1	13.4	12.3	12.1	11.8	11.3
	Maximum summer temperature (°C)	13.3	15.1	17.5	15.5	15.2	14.4	14.3
	Growth Days (7-22 °C)	101 ¹	113	120	115	109	112	108
	Optimal growth days (16-20 °C)	0	2	28	3	0	0	0
	Thermal stress days (>22 °C)	0	0	0	0	0	0	0
P90	Mean summer temperature (°C)	12.7	13.9	15.6	14.1	14.0	13.6	13.2
	Maximum summer temperature (°C)	15.8	17.5	20.2	17.6	18.0	17.4	16.9
	Growth Days (7-22 °C)	111	123	132	125	119	121	120
	Optimal growth days (16-20 °C)	0	27	57	31	27	21	11
	Thermal stress days (>22 °C)	0	0	0	0	0	0	0

¹ Indicators and values used as the threshold for salmon.

For the historic period (1981-2010), other rivers than the official salmon rivers have thermal value above the chosen threshold for Atlantic salmon: four rivers on the southern Ungava Bay and three rivers on the Hudson Coast. In the Ungava watershed, all modelled sites on the southern rivers, from the Leaf River to the Koroc River, and the main reach of the Arnaud River would reach the threshold values as soon as 2041-2070 no matter the emissions scenarios. It includes the rivers that were reported to be visited by the Atlantic salmon already. For the 2071-2100 period,

depending on the emissions scenario, there will only be 1 or 3 more rivers to get at those minimum values of 11 °C as mean summer temperature and 100 growth days. Some sites will remain colder than the actual coldest sites on the salmon rivers as they won't reach these values even with the highest emissions scenario (SSP5-8.5), which is the case for the northern tributaries of the Arnaud River. On the Hudson watershed, except for the northern most Kovik River and the upper watershed of the Purvirnituk River, under the SSP2-4.5 emissions scenario, all other monitored rivers would reach the Atlantic salmon threshold values by the 2071-2100 period.

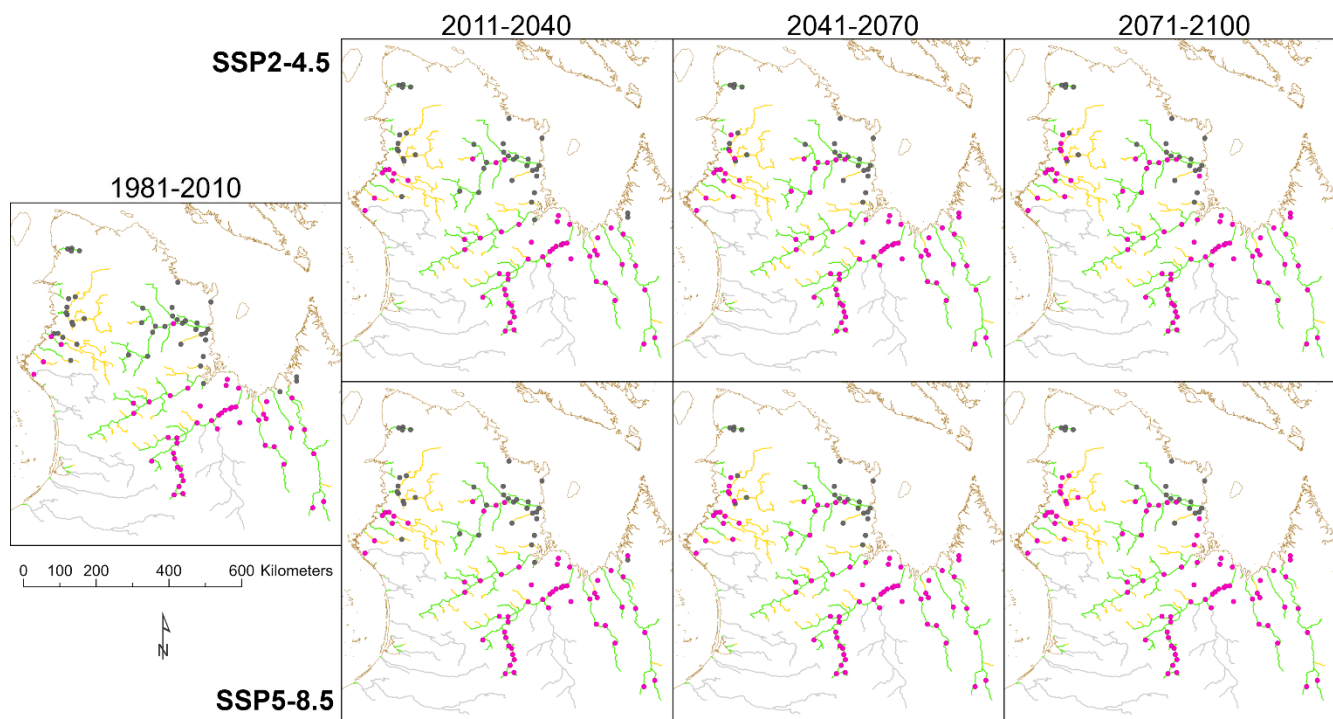


Figure 16 Maps of the sites (in pink) that reach more than 100 days with temperature above 7 °C and a mean summer temperature (Jul-Sep) of at least 11 °C by periods and emissions scenarios.

By the end of the century, the number of days with optimal growth temperatures (16 – 20 °C) is projected to increase across most sites, depending on climate scenarios (Figure 17). However, a few locations will still experience no days within the optimal growth temperatures range even under the warmest projection represented by the 90th percentile of the climate models using SSP5-8.5. For the current salmon rivers, under the mean climate simulations, the increase of the optimal growth temperature indicator will vary depending on the site and emissions scenario: between 0 – 43 days with an average of 18 days for SSP2-4.5 and between 3 – 63 days with an average of 34 days for SSP5-8.5. The results indicate that certain sites, under the same climate projection, could experience days with optimal growth temperatures without reaching the

benchmark of 100 days above 7 °C. Conversely, other sites lack optimal growth conditions, but have at least 100 days above 7 °C. This pattern does not appear to be linked to the size of the rivers.

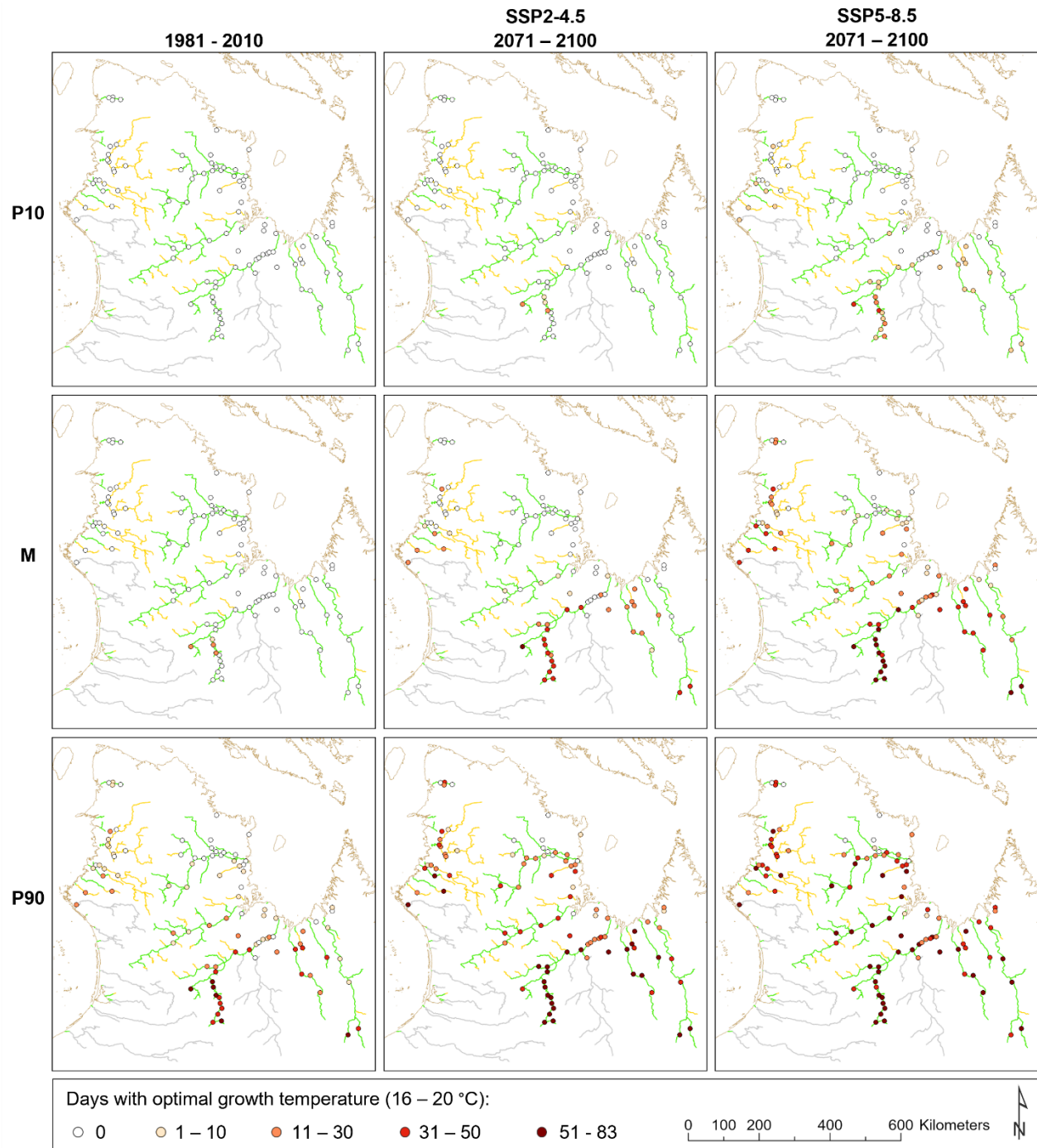


Figure 17 Comparison of the optimal growth temperature indicator (days with temperature between 16 – 20 °C) for percentiles 10 (P10), 90 (P90) and mean (M) results of the climate simulations for the 1981 – 2010 period and the 2071 – 2100 period under the SSP2-4.5 and SSP5-8.5 emissions scenarios.

Historically, no thermal stress condition for the Atlantic salmon (daily mean temperature above 22 °C) was encountered on the studied sites. The projections of our models indicates that all sites would remain stress free under all future projections except for some sites that would have generally less than 5 days and up to 21 days of thermal stress under the warmest climate projection (Figure 18). Under the warmest projection, the maximum temperature will vary between 13.5 – 23.6 °C with an average of 17.8 °C.

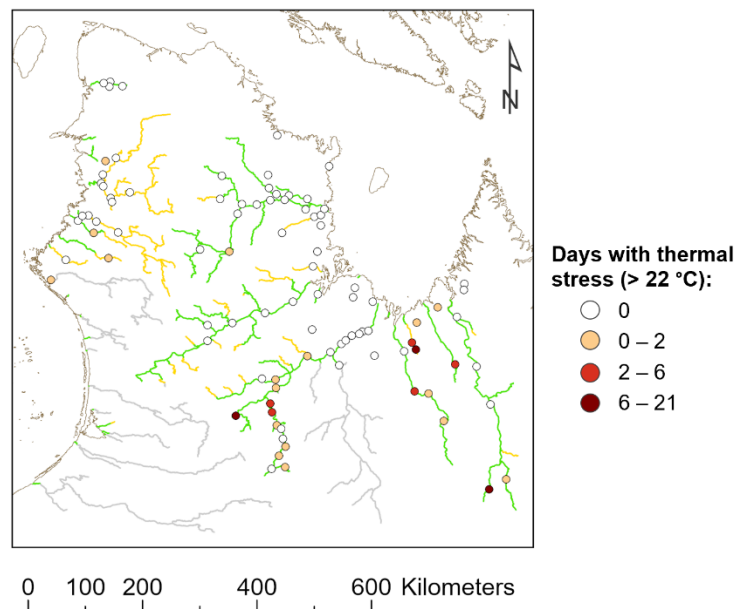


Figure 18 Days with thermal stress for Atlantic salmon for the 2071-2100 period under the 90th percentile of the climate projections with the SSP5-8.5 emissions scenario.

2.6 Discussion

2.6.1 State of salmon presence in Nunavik

One aim of the study was to verify if the Atlantic salmon is present outside of the official salmon rivers in Nunavik. Our literature review indicated that Atlantic salmon is present to some extent in seven other southern Ungava Bay rivers. There is no evidence of salmon spawning in those rivers, but at least some individuals visit them. It is possible that other rivers, draining into the Ungava Bay, are visited by salmons. To enhance the current assessment of salmon occurrences in

Nunavik and monitor its potential colonization of new rivers, environmental DNA detection technique is simple and precise for detecting and monitoring fish species presence in waterbodies (Atkinson *et al.*, 2018; Hernandez *et al.*, 2020; Jacobsen *et al.*, 2023). It could be combined with Traditional Ecological Knowledge and community base monitoring (Heath & Rosengard, 2022; Johnson *et al.*, 2021) in respect with Inuit Qaujimajatuqangit principles (Pedersen *et al.*, 2020). Those methods could also be relevant for tracking the presence of pink salmon (*Oncorhynchus gorbuscha*) that have been reported in Ungava's rivers in recent years (April *et al.*, 2023; Dubos *et al.*, 2023a; Nicholl *et al.*, 2021)

The official salmon rivers, the Leaf, Whale and George Rivers suffer from a lack of studies on the presence of salmon. By comparison, in the Koksoak River, the presence of juveniles, spawning sites and impassable obstacles have been identified in many reaches and tributaries which are useful information for understanding those populations, their habitat uses in a subarctic climate and for fishery management. With the presence of juveniles on the Delay River confirmed at more than 530 km from the Ungava Bay (Belzile *et al.*, 1982; FaunENord, 2017), the Koksoak River appears to host the longest current freshwater migration of Atlantic salmon in North America.

On the Hudson Bay watershed, there is no evidence of anadromous Atlantic salmon since all specimens' scales analysis didn't show anadromous characteristics. The individuals in the estuary of the Nastapoka River are likely landlocked specimen coming from upstream where there is at least one establish landlocked Atlantic salmon population (April *et al.*, 2023). It is probably the same situation for the Great Whale, Kogaluc and Innuksuac Rivers, where landlocked populations could be established in their upper watershed which would explain the capture of Atlantic salmon in their estuary below impassable waterfalls.

Morin (1991) suggested that the few Atlantic salmon populations in the Hudson Bay watershed are remnants of the post-glacial colonization of the species at a time when the hydrographic basins of Ungava could have been connected to those of Hudson. His hypothesis is coherent with the facts that no salmon catches were recorded in the western side of Hudson Bay (Bilous & Dunmall, 2020), no mention in the James Bay was found in the literature and the Atlantic salmon is only present in rivers of the Hudson drainage that are proximal to Ungava salmon rivers' headwaters. Furthermore, our study found a current linkage between the Ungava and Hudson watersheds so fish could migrate up the Leaf River watershed and reach the Innuksuac and Kogaluc Rivers where Atlantic salmon specimens have been captured historically. That route, technically possible, is long and the channel between the Innuksuac and Leaf watershed is small and could not be always accessible. Lastly, a recent genetic study on all Nunavik Atlantic salmon

populations found that the Nastapoka River individuals are closer genetically to the salmon populations of the Delay and Du Gué Rivers, in the Koksoak watershed, than any other Ungava population which confirms the post-glacial inland migration hypothesis from the Ungava to the Hudson Bay (Carbonneau *et al.*, 2024).

Morin (1991) raised the question of why Atlantic salmon haven't colonized other rivers along the Hudson Coast following the post-glacial migration. That can be explained in part with our results which show that most southern Hudson Bay rivers are simply not accessible to the salmon for colonization due to major waterfalls near their river mouth and the rivers further north, which some are accessible, are generally too cold for the Atlantic salmon when compared to the thermal indicators of Ungava Bay salmon's rivers.

Even if the Atlantic salmon presence in the Hudson Bay rivers has been clarified with recent studies, including this one, it is still intriguing why there is no evidence of Atlantic salmon at sea visiting the Hudson Bay since it has been reported nearby in the Hudson Strait and in the Foxe Basin just north of the Hudson Bay (Bilous & Dunmall, 2020).

2.6.2 Nunavik rivers accessibility and connectivity

Although the technique for assessing the river accessibility was quite simple, it did allow to confirm that most major Ungava rivers don't have obstacle that could prevent the migration of salmon. Therefore, the Atlantic salmon is not absent from the Nunavik northern rivers because of the inaccessibility of those rivers. The assessment also allowed to find that almost all southerner Hudson Bay rivers are inaccessible to the salmon due to a waterfall near their mouth as discussed in the previous section.

Following the deglaciation, the glacial isostatic adjustment is important in Nunavik with an elevation gain of 8 to 14 mm per year with the highest value in the Southern Hudson Bay region (Simon *et al.*, 2016). At that rate, by the end of the century, the land would be one-meter higher in the south-west of Nunavik. Therefore, potential obstacles could become impassable in the future. It means, also, that in the past, current inaccessible rivers could have been accessible to the salmon. However, it is not expected that the rivers identified as accessible could become inaccessible due to the isostatic adjustment since no waterfalls were located on those rivers.

For the low water sections, some were identified as impassable because the creeks were completely dried out. That can be explained because the hydrographic network data used for the

analysis in the region is derived from the Canadian National Topographic Data which has been produced, for most of Nunavik, from aerial photography from more than 40-50 years ago (NRCan, 2004). Therefore, the hydrography could have changed quite substantially during that period. Future studies in Nunavik should look to produce their own hydrographic network from more modern remote sensing data.

The increase of the low water level sections in the arctic and subarctic is a clear threat to the stream connectivity and fish movement (Bring *et al.*, 2016; Dubos *et al.*, 2023a; Dubos *et al.*, 2023b; Koch *et al.*, 2022). The main reported cause of decreasing water levels in small arctic streams is the increase depth of the talik, the unfrozen soil under a waterbody, caused by the permafrost thawing which increase the hyporheic drainage and can reduce the water level of lakes and rivers (Bring *et al.*, 2016; Koch *et al.*, 2022; Liljedahl *et al.*, 2020). Dubos *et al.* (2023a) also suggested that due to the increase of riverine erosion caused by the thawing of permafrost (Rowland *et al.*, 2010; Vincent *et al.*, 2017) rivers are widening and becoming shallower. According to Del Vecchio *et al.* (2024), rivers are less channelled and shallower in the arctic due to the frozen soil that limit the incision process, but with the permafrost thawing the incision process could increase resulting in more channelled stream in the future. The lowering water level of creeks in the arctic is a phenomenon that should be more studied as it can impact fish populations and so the food security of arctic communities.

2.6.3 Modelling river temperature with Landsat thermal imagery

The combined use of Landsat thermal imagery and Google Earth Engine (GEE) cloud computing platform is a real advance for studying the temperatures of remote rivers over time. Our results indicate that spot Landsat WST estimations can replace observed daily mean water temperatures in Nunavik. The acquisition time of Landsat imagery, near noon for the region, is right when there is the lowest deviation to the mean water temperature which was also the case for an American Midwest river (Tavares *et al.*, 2020). Also, even with limited WST estimations due to cloud coverage and short ice-free season, the GAM models performed almost as well as with solely observed temperatures. The use of percentiles 10 and 90 of all climate simulations models for medium and high emissions scenarios ensures that our analyses capture the potential variability of future river temperatures. Even by limiting to large enough rivers (300 - 360 m), Landsat WST allows monitoring the temperature on more sites on more rivers than using only sites with thermograph.

Appropriate site selection is crucial for accurate WST time series, because the original pixels of Landsat thermal bands are not made available, the published pixels are resampled, river water levels vary through a year and river morphology can change over 40 years. The water occurrence of the Global Surface Water product (Pekel *et al.*, 2016) helped to select the sites for the WST estimations to ensure no contamination with land temperature, but the WST could still be biased by land temperature when the water level is particularly low. Therefore, there is a place for improving the site selection. Likely, research and applications of infrared remote sensing for studying waterbody temperatures are advancing rapidly with recent examples of an algorithm for the retrieval of WST on smaller rivers (Martí-Cardona *et al.*, 2019) or a new machine learning algorithm for enhanced WST estimations (Dyba *et al.*, 2022).

2.6.4 Salmon potential colonization of Nunavik rivers

Colonization of new rivers by the Atlantic salmon could take times given that this species has a strong homing behaviour and most adult return to their natal river to spawn (Klemetsen *et al.*, 2003; Thorstad *et al.*, 2008). For instance, during a two-year project on the Koksoak River, all salmon caught in the estuary came from the Koksoak watershed (Carbonneau *et al.*, 2024). The opposite behaviour to homing is straying which is the capability of anadromous fishes to visit or establish itself in a new river. It is an essential behaviour for the colonization of new rivers by the species and it can be induced by harsher conditions in the environment such as increased water temperature or competition (Birnie-Gauvin *et al.*, 2019; Nielsen *et al.*, 2013). Straying rates among wild Atlantic salmon populations has been estimated up to 4% (Pedersen *et al.*, 2007) and 6% (Jonsson *et al.*, 2003). In Nunavik, the presence of Atlantic salmon in other rivers in Nunavik and the fact that its presence seems to increase (Dubos *et al.*, 2023a) indicate that straying does occur and so colonization of new rivers is possible. Rivers closest to established populations have more chances to be colonized by the Atlantic salmon in response to climate change (Birnie-Gauvin *et al.*, 2019; Nielsen *et al.*, 2013). Therefore, all rivers of the southern Ungava Bay, from the Leaf River to the Koroc River, in addition to the main reach of the Arnaud River are the most likely to be colonized by the Atlantic salmon by the end of the century, because 1) they are located nearby established populations, 2) they are accessible, without major obstacles for the upstream migration of adult salmon and 3) the water temperature and growth days will be similar to the current salmon rivers no matters the emissions scenario (ssp2-4.5 and ssp5-8.5).

The modelling of water temperature is insufficient in itself to determine the potential colonization of new rivers by Atlantic salmon as other parameters dictate its presence (Bilous & Dunmall, 2020; Nielsen *et al.*, 2013). For instance, in the southern Ungava Bay, some small rivers do not appear to be too cold for salmon, but they do not have established populations. In fact, winter warm refuge from groundwater input is important for the survival of salmonid species in arctic rivers (Clawson *et al.*, 2022; Dunmall *et al.*, 2016; Nielsen *et al.*, 2013). In regions with permafrost, large rivers have open talik with more groundwater exchange compared to small rivers, with closed talik, that only have thin and cold hyporheic drainage above the frozen permafrost (Fakhari *et al.*, 2022). So, that could explain the presence of Atlantic salmon populations in Nunavik solely in large southern rivers which possibly have better winter habitat for the salmon. Therefore, to enhance the assessment of potential Atlantic salmon colonization in Nunavik, a detailed evaluation of the quality of the available habitat should be conducted. Also, as the abundance of salmonid in rivers can be driven by temperature related competition (Skoglund *et al.*, 2024), the current interactions between Atlantic salmon with other anadromous salmonid species already cohabiting in Nunavik rivers, the arctic char (*Salvelinus alpinus*) and brook trout (*Salvelinus fontinalis*) should be studied.

2.7 Conclusion

Even without in-depth habitat characterization, this study still employed a thorough approach to evaluate Atlantic salmon colonization potential of Nunavik arctic and subarctic rivers emphasizing on understanding the current state of its presence in the region, the river thermal regime and accessibility. The Ungava Bay could be the first region to see Atlantic salmon expanding its range northward in response to climate change. This is supported by the presence of accessible rivers nearby established populations which will reach adequate temperature, notably the Arnaud River, the largest river draining into the Ungava Bay currently without salmon population. In summary, the warming of the rivers due to climate change would be beneficial for the Atlantic salmon in Nunavik not only in terms of colonization of new rivers, but also for the existing populations. Indeed, enhanced optimal growth conditions could lead to smoltification occurring at a younger age and an increase of the populations. Furthermore, our models predict limited thermal stress for the Atlantic salmon in Nunavik rivers by the end of the century. Foreseeable future threats to the current Ungava Atlantic salmon populations include the rise of sport and subsistence fishing due to the expansion of the Nunavik communities, invasive species and potential industrialization through activities like mining.

3 DISCUSSION GÉNÉRALE ET CONCLUSION

3.1 Synthèse

Les travaux de ce projet de maîtrise ont utilisé une approche globale pour évaluer le potentiel de colonisation du saumon atlantique au Nunavik. Tout d'abord, il était important de connaître dans quels cours d'eau le saumon est déjà présent, car il n'est pas réaliste de s'intéresser au potentiel de colonisation sans vérifier si l'espèce est déjà présente ailleurs que dans les rivières à saumon officielles. À cet égard, la littérature permet de confirmer la présence du saumon dans d'autres rivières du Nunavik, mais seulement dans les rivières du sud de la baie d'Ungava. Ceci indique un certain vagabondage en eau douce du saumon à proximité des rivières avec déjà des populations établies, ce qui est un comportement essentiel pour la colonisation de nouvelles rivières (Birnie-Gauvin *et al.*, 2019; Nielsen *et al.*, 2013). La présence sporadique du saumon dans les rivières de la baie d'Hudson est somme toute bien documentée dans la littérature. Par contre, il importe de séparer les populations de la baie d'Ungava de celles de la baie d'Hudson, qui sont complètement différentes, ce qui est en accord avec d'autres recherches récentes (April *et al.*, 2023; Carbonneau *et al.*, 2024), car il n'y a pas de preuve d'anadromie chez les saumons présents dans les rivières de la baie d'Hudson et ceux-ci sont vraisemblablement des vestiges d'une colonisation postglaciaire lorsque les bassins de la baie d'Hudson et de la baie d'Ungava étaient connectés. Cette théorie avancée par Morin (1991) est cohérente avec, notamment, la découverte, dans le cadre de ce projet, de diffluences au Nunavik ce qui indique qu'il y aurait encore une route possible entre la baie d'Ungava et la baie d'Hudson. Ces diffluences, qui sont un phénomène relativement rare, ont été « découvertes » dans la mesure où il n'y a pas d'autres études qui les ont rapportées. Toutefois, elles ont été remarquées par des incohérences dans les données de la Géobase du Réseau Hydrographique du Québec. Il est donc probable que le Ministère des Ressources naturelles et des Forêts, producteur de ces données, soit au courant de ces particularités hydrologiques. Il est possible également que ces diffluences soient connues par certains Inuit ou Cris.

Bien que l'évaluation de l'accessibilité des cours d'eau soit sommaire, elle a permis de constituer une base de données de référence pour de futurs travaux sur ce sujet, mais surtout elle permet de répondre à une question de départ à savoir si le saumon est absent des autres rivières en raison d'obstacles infranchissables. Ce n'est pas le cas pour les rivières qui se jettent dans la baie d'Ungava, car la majorité d'entre elles n'ont aucun obstacle majeur et sont donc accessibles en grande partie pour le saumon. Par contre, pour les rivières de la baie d'Hudson, presque toutes

les rivières du sud de la baie ont une chute importante près de leur embouchure, ce qui les rendent inaccessibles aux poissons anadromes. Cela explique pourquoi, à la suite de la vraisemblable colonisation postglaciaire du saumon de la baie d'Ungava vers la baie d'Hudson, le saumon sous sa forme anadrome ne s'est pas établi ou du moins maintenu. Il est possible que ces rivières aient été accessibles et colonisées par le saumon dans le passé, puis qu'elles soient devenues inaccessibles avec l'ajustement isostatique important dans cette région (Simon *et al.*, 2016). Si tel est le cas, il y aurait fort probablement de la ouananiche dans le bassin supérieur de ces rivières, ce qui n'a pas été rapporté historiquement par les Inuit (Morin, 1991), mais cela pourrait être validé plus exhaustivement, notamment avec l'ADN environnemental. Les sections de rivières asséchées, phénomène amplifié par la fonte du pergélisol (Bring *et al.*, 2016; Dubos *et al.*, 2023a; Koch *et al.*, 2022), ne causent pas de problème majeur pour la migration du saumon dans le réseau hydrographique principal du Nunavik, car celles-ci sont présentes dans de petites rivières seulement (ordre de Strahler < 7) généralement dans la tête des bassins versants et ne bloquent pas d'importantes sections de rivières en amont. En revanche, cette problématique est un réel enjeu pour les communautés inuit qui entreprennent des travaux pour maintenir la connectivité de petits bassins versants, près des côtes et des communautés, qui soutiennent des populations anadromes d'omble chevalier (*Salvelinus alpinus*) (Neelin, 2021a). En plus des chutes et des sections d'eau peu profondes relevées comme obstacles, le castor du Canada (*Castor canadensis*) est de plus en plus présent au Nunavik et engendre des pertes de connectivité des habitats aquatiques avec ses barrages (Neelin, 2021b).

La modélisation des températures des rivières avec le modèle additif généralisé permet de comparer les indicateurs thermiques historiques et futurs des rivières du Nunavik. Les résultats sont cohérents que ce soit avec les températures estimées par télédétection ou les températures observées: les rivières du sud du Nunavik sont plus chaudes que celles plus au nord. Bien que les rivières à saumon soient plus chaudes, les journées avec une température de croissance optimale (16 - 20 °C) sont rares et elles n'ont aucune journée avec un stress thermique (> 22 °C) historiquement. Les températures de toutes les rivières vont augmenter, mais même avec le scénario d'émission élevé (ssp5-8.5), les rivières du nord du Nunavik resteraient trop froides à la fin du siècle pour le saumon avec toujours moins de 100 jours avec une température de plus de 7 °C. Étant proches de populations établies de saumon, ce sont les rivières qui se jettent dans la baie d'Ungava qui sont les plus susceptibles d'être colonisées par le saumon. Une limitation de la modélisation des températures futures des rivières, faite dans ce projet, est que malgré le fait que les modèles statistiques, non paramétriques, comme le modèle additif généralisé, sont

performants pour modéliser les températures avec peu de données météorologiques, ils sont moins fiables pour modéliser les températures futures lorsque les températures n'ont pas déjà été observées dans le passé (Benyahya *et al.*, 2007).

3.2 Perspectives de travaux futurs

3.2.1 Savoir traditionnel

Le savoir traditionnel Inuit pourrait être utilisé notamment pour identifier la présence actuelle et future du saumon atlantique au Nunavik en respect avec les principes du Inuit Qaujimajatuqangit (Pedersen *et al.*, 2020). En plus des interviews traditionnels, il existe des applications, telles que SIKU, qui permettent aux utilisateurs autochtones de participer à des projets de recherches en lien avec le territoire (Heath & Rosengard, 2022; Johnson *et al.*, 2021). Le savoir traditionnel pourrait aussi permettre de mieux identifier les obstacles infranchissables pour le saumon, mais également pour d'autres poissons anadromes tels que l'omble chevalier (*Salvelinus alpinus*) et l'omble de fontaine (*Salvelinus fontinalis*) présents au Nunavik.

3.2.2 Amélioration de l'estimation des températures de l'eau par télédétection

Le choix du site d'extraction est un élément essentiel pour assurer une meilleure estimation de la température de l'eau de surface avec les données Landsat et l'algorithme pour Google Earth Engine d'Ermida *et al.* (2020). Dans ce projet, la sélection du site a été faite avec le produit Global Surface Water (GSW) de Pekel *et al.* (2016) pour s'assurer qu'il y ait presque toujours de l'eau dans un rayon de 150 m ou 180 m autour du site d'extraction afin de respecter la largeur minimale pour estimer la température de cours d'eau avec les données thermiques Landsat (Handcock *et al.*, 2006). C'est une amélioration comparativement à d'autres études similaires qui n'utilisent pas de méthode précise pour s'assurer de la présence d'eau en continu autour du site d'extraction (Daigle *et al.*, 2022; Dyba *et al.*, 2022). Par contre, même en utilisant l'occurrence certifiée à l'aide de GSW, il est possible que les observations Landsat soient prises lors d'étiages sévères, ce qui fausserait la température estimée de l'eau avec des températures des berges. Pour éviter cela, il serait possible lors de l'estimation de la température dans Google Earth Engine (GEE) d'avoir un module qui vérifie que tous les pixels dans le rayon adéquat autour du site d'extraction sont seulement des pixels d'eau. Cela permettrait de tout de même pouvoir estimer la température de

l'eau sur des rivières généralement suffisamment large, mais d'exclure les observations prises lors d'étiage trop important. Ce serait vraisemblablement plus rapide comme méthode, dans une optique d'extraire plusieurs séries temporelles, que celle proposée par Martí-Cardona *et al.* (2019) qui demeure excellente pour estimer la température de l'eau sur de petites rivières, mais qui nécessite beaucoup de temps.

L'estimation de la température de l'eau avec les données Landsat peut se faire aussi avec un algorithme de forêt aléatoire, ce qui performe mieux que l'utilisation de l'algorithme GEE d'Ermida *et al.* (2020) avec des valeurs de RMSE de 1.83 °C au lieu de 3.35 °C (Dyba *et al.*, 2022). En revanche, des températures observées sont nécessaires pour calibrer l'algorithme de forêt aléatoire, donc cette méthode ne peut pas être utilisée partout. Toutefois, il serait possible d'améliorer l'estimation de la température de l'eau avec cette méthode pour les sites avec suffisamment de données observées.

3.2.3 Évaluation de la qualité de l'habitat pour le saumon par télédétection

Une prochaine étape de ce projet serait d'évaluer, par télédétection, la qualité de l'habitat pour le saumon des rivières accessibles dont la température sera suffisamment chaude dans le futur. Ainsi, le potentiel de colonisation de nouvelles rivières par le saumon serait mieux évalué, mais cela permettrait aussi de mieux connaître les habitats des rivières à saumons actuelles.

Idéalement, des données d'élévation Lidar et des images aériennes à haute résolution permettraient de réaliser une caractérisation exhaustive des habitats aquatiques (Kuiper *et al.*, 2023), mais cela nécessiterait une logistique et des coûts importants pour évaluer plusieurs rivières à l'échelle du Nunavik. L'utilisation d'images multispectrales satellitaires est une alternative moins coûteuse pour caractériser l'habitat des poissons plus sommairement. Par exemple, les images du satellite commercial Worldview 2 (résolution de 2 m) ont été utilisées pour évaluer la profondeur, le débit et pour détecter les différents habitats aquatiques sur la rivière Kiamika au Québec (Hugue *et al.*, 2016) et les images des satellites de Sentinel-2 (résolution de 10 m), disponibles gratuitement, ont été utilisées pour séparer les habitats lenticques, des habitats lotiques dans le bassin versant de la rivière Mobile aux États-Unis (Liu *et al.*, 2021).

Pour ce type d'analyse, un modèle numérique d'élévation (MNE) est généralement nécessaire. Comme discuté à la section 1.2.2, les données sont limitées au Nunavik. Il n'y a pas de données Lidar au Nunavik, la couverture se limitant au sud du 51°N dans la forêt dite productive (MFFP,

2016) ou dans les villages nordiques (NRCan, 2023). Le MNE ArcticDEM, avec une résolution de 2 m et disponible gratuitement pour le nord du Nunavik (60°N), est intéressant, mais couvre seulement une faible partie du territoire (Porter *et al.*, 2023). Il est possible d'acquérir des MNE commerciaux similaires issus également de la photogrammétrie d'images satellites hautes résolutions tel que Pleiades DEM (Sofia *et al.*, 2016) et Worldview 2 DEM (Wang *et al.*, 2019). Il s'agit d'ailleurs de la stratégie canadienne d'améliorer la qualité des données d'élévation pour tout le Nord canadien avec ce type de MNE ou par interférométrie de données radar (NRCan, 2023). Sinon, il faut se rabattre sur les MNE avec de plus faible résolution spatiale, mais disponible gratuitement (Tableau 2). À cet égard, deux récents MNE globaux performant très bien et surpassent les autres modèles globaux : Alos World 3D-30m (Adiri *et al.*, 2022; Uemaa *et al.*, 2020) et Copernicus GLO-30 DEM (del Rosario González-Moradas *et al.*, 2023; Guth & Geoffroy, 2021; Li *et al.*, 2022; Niculita, 2023). Il faudrait valider ces deux MNE au Nunavik et considérer sérieusement de les utiliser en remplacement du MNE du Canada (MNEC) et sa version québécoise le MNT hydro cohérent, qui sont dérivés de la base nationale de données topographiques à l'échelle 1/50 000, elle-même issue de photographies aériennes acquises il y a plus de 40 - 50 ans (NRCan, 2013). Quelques tests effectués avec le MNT hydro cohérent montrent certaines incohérences et un relief moins détaillé que celui du Copernicus GLO-30 DEM. La fusion de MNE peut être aussi une avenue à envisager pour améliorer la précision de MNE provenant de sources différentes (Okolie & Smit, 2022). Avec de meilleurs MNE, ceux-ci pourraient être utiles aussi pour améliorer l'évaluation des obstacles infranchissables identifiés dans le cadre de ce projet.

3.2.4 Autres espèces anadromes

Les analyses réalisées dans le cadre de ce projet pour le saumon atlantique, c'est-à-dire évaluer sa présence au Nunavik, l'accessibilité des cours d'eau et les indicateurs thermiques actuels et futurs, pourraient être effectuées pour les autres espèces de poissons anadromes principalement retrouvées au Nunavik, telles que l'omble chevalier et l'omble de fontaine qui cohabitent toutes deux avec le saumon dans certaines rivières.

4 BIBLIOGRAPHIE

- Abidi O, St-Hilaire A, Ouarda TBMJ, Charron C, Boyer C & Daigle A (2022) Regional thermal analysis approach: A management tool for predicting water temperature metrics relevant for thermal fish habitat. *Ecological Informatics* 70:101692.
- Adiri Z, Lhissou R, Maacha L, Jilali A, Talbi EH, Jellouli A & Chakouri M (2022) Comparison of ASTER GDEM3, SRTM3, NASADEM, TanDEM-X90, AW3D30, and ALOS PALSAR data with TanDEM-X12: a case study of Tagragra of Akka inlier, Moroccan Anti-Atlas. *Arabian Journal of Geosciences* 15(21):1654.
- Anderson T (1985) Rivers of Labrador. in *Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences 81* (Department of Fisheries and Oceans, Fisheries Research Branch, Ottawa), p 389.
- Andrews D & Coffey J (2009) Current Knowledge and Future Research Needs of Atlantic Salmon and Arctic Charr in Northern Labrador.
- April J, Bujold V, Cauchon V, Doucet-Caron J, Gagnon K, Guérard M, Le Breton S, Nadeau V, Plourde-Lavoie P & Bujold J (2023) Information on the Atlantic Salmon (*Salmo salar*) in Quebec for the Preparation of the Second Status Report by the Committee on the Status of Endangered Wildlife in Canada. *DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc* 2023/008:78.
- Atkinson S, Carlsson JEL, Ball B, Egan D, Kelly-Quinn M, Whelan K & Carlsson J (2018) A quantitative PCR-based environmental DNA assay for detecting Atlantic salmon (*Salmo salar* L.). *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 28(5):1238-1243.
- Beach M (1984) Fish pass design-criteria for the design and approval of fish passes and other structures to facilitate the passage of migratory fish in rivers.
- Belzile L, HAVEUR G, Robitaille J & Shooner G (1982) Description de l'habitat des jeunes saumons de la rivière Delay, en Ungava et estimation des densités. *Rapport conjoint SAGE/Gilles Shooner Inc. Doc. dactylo*.
- Belzile L, Le Jeune R, Levesque F, Boudreault A & Shooner G (1984) Évaluation quantitative du potentiel salmonicole des principaux affluents inaccessibles du bassin Caniapiscou-Koksoak. (Groupe d'étude conjoint Caniapiscou-Koksoak, Société d'énergie de la Baie-James), p 40.
- Belzile L, Robitaille J & Shooner G (1990) Synthèse des connaissances relatives à la biologie post-fraye du saumon atlantique (*Salmo salar*) en Ungava. (Rapport technique canadien des sciences halieutiques et aquatiques N° 1738), p 42.
- Benyahya L, Caissie D, St-Hilaire A, Ouarda TBMJ & Bobée B (2007) A Review of Statistical Water Temperature Models. *Canadian Water Resources Journal / Revue canadienne des ressources hydriques* 32(3):179-192.
- Bilous M & Dunmall K (2020) Atlantic salmon in the Canadian Arctic: potential dispersal, establishment, and interaction with Arctic char. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 30(3):463-483.
- Birnie-Gauvin K, Thorstad EB & Aarestrup K (2019) Overlooked aspects of the *Salmo salar* and *Salmo trutta* lifecycles. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 29(4):749-766.

- Bisaillon J-F, Bergeron NE & Caron F (2007) Effect of winter harshness on Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) egg to fry (0+) and fry to parr (1+) over-winter mortality. *14th Workshop on the Hydraulics of Ice Covered Rivers*. p 19-22.
- Botero-Acosta A, Ficklin DL, Ehsani N & Knouft JH (2022) Climate induced changes in streamflow and water temperature in basins across the Atlantic Coast of the United States: An opportunity for nature-based regional management. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 44:101202.
- Bourgeois CE & O'Connell MF (1988) Observations on the seaward migration of Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) smolts through a large lake as determined by radiotelemetry and Carlin tagging studies. *Canadian Journal of Zoology* 66(3):685-691.
- Boyer C & St-Hilaire A (2022) Impacts des changements climatiques sur les habitats thermiques des salmonidés dans les rivières du nord du Québec. (Institut National de la recherche scientifique), p 121.
- Boyer C, St-Hilaire A, Bergeron N, Daigle A, Curry R, Caissie D & Gillis C (2016) RivTemp: a water temperature network for Atlantic salmon rivers in eastern Canada. *Water News* 35(2):10-15.
- Bring A, Fedorova I, Dibike Y, Hinzman L, Mård J, Mernild SH, Prowse T, Semanova O, Stuefer SL & Woo M-K (2016) Arctic terrestrial hydrology: A synthesis of processes, regional effects, and research challenges. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* 121(3):621-649.
- Brûlé C (2022) *Occurrence de saumons atlantique (Salmo salar) estuariens dans la région de la baie d'Ungava (Nunavik, QC) confirmée par la chimie des otolithes et la morphologie des écailles*. (Université du Québec à Chicoutimi).
- Caissie D (2006) The thermal regime of rivers: a review. *Freshwater Biology* 51(8):1389-1406.
- Caissie D, El-Jabi N & Satish MG (2001) Modelling of maximum daily water temperatures in a small stream using air temperatures. *Journal of Hydrology* 251(1):14-28.
- Cannon AJ, Sobie SR & Murdock TQ (2015) Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: how well do methods preserve changes in quantiles and extremes? *Journal of Climate* 28(17):6938-6959.
- Carbonneau A, April J, Normandeau E, Ferchaud A-L, Nadeau V & Bernatchez L (2024) Population genomics, life-history tactics, and mixed-stock subsistence fisheries in the northernmost American Atlantic salmon populations. *Evolutionary Applications* 17(2):e13654.
- Carvalho D, Cardoso Pereira S & Rocha A (2021) Future surface temperatures over Europe according to CMIP6 climate projections: an analysis with original and bias-corrected data. *Climatic Change* 167(1):10.
- Charron C, St-Hilaire A, Ouarda TBMJ & van den Heuvel MR (2021) Water Temperature and Hydrological Modelling in the Context of Environmental Flows and Future Climate Change: Case Study of the Wilmot River (Canada). *Water* 13(15):2101.
- Clawson CM, Falke JA, Bailey LL, Rose J, Prakash A & Martin AE (2022) High-resolution remote sensing and multistate occupancy estimation identify drivers of spawning site selection in fall chum salmon (*Oncorhynchus keta*) across a sub-Arctic riverscape. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 79(3):380-394.

- COSEWIC (2011) *Assessment and Status Report on the Atlantic Salmon, Salmo Salar, Nunavik Population, Labrador Population, Northeast Newfoundland Population, South Newfoundland Population, Southwest Newfoundland Population, Northwest Newfoundland Population, Québec Eastern North Shore Population, Québec Western North Shore Population, Anticosti Island Population, Inner St. Lawrence Population, Lake Ontario Population, Gaspé-southern Gulf of St. Lawrence Population, Eastern Cape Breton Population, Nova Scotia Southern Upland Population, Inner Bay of Fundy Population, Outer Bay of Fundy Population, in Canada*. Committee on the Status of Endangered Wildlife in Canada,
- Côté Y, Clavet D, Dubois J-M & Boudreault A (1987) Inventaire des habitats à tacons et l'estimation de production par photographie aérienne. Québec, p 13.
- Côté Y, Hayeur G, Le Jeune R & Shooner G (1979) Évaluation sommaire de potentiel salmonicole de la rivière Aux-Mélèzes. (Groupe d'étude conjoint Caniapiscou-Koksoak, Société d'énergie de la Baie-James), p 31.
- Cunjak R, Power G & Barton D (1986) Reproductive habitat and behaviour of anadromous Arctic char (*Salvelinus alpinus*) in the Koroc River, Quebec. *Naturaliste Canadien* 113(4):383-387.
- Cunjak RA, Prowse TD & Parrish DL (1998) Atlantic salmon (*Salmo salar*) in winter: "the season of parr discontent"? *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 55(S1):161-180.
- Daigle A, Boyer C & Légaré A (2022) Modeling of the thermal regime of rivers subject to seasonal ice cover using data from different sources and temporal resolutions. *Canadian Water Resources Journal/Revue canadienne des ressources hydriques* :1-17.
- Daigle A, Boyer C & St-Hilaire A (2019) A standardized characterization of river thermal regimes in Québec (Canada). *Journal of Hydrology* 577:123963.
- del Rosario González-Moradas M, Viveen W, Andrés Vidal-Villalobos R & Carlos Villegas-Lanza J (2023) A performance comparison of SRTM v. 3.0, AW3D30, ASTER GDEM3, Copernicus and TanDEM-X for tectonogeomorphic analysis in the South American Andes. *CATENA* 228:107160.
- Del Vecchio J, Palucis MC & Meyer CR (2024) Permafrost extent sets drainage density in the Arctic. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 121(6):e2307072120.
- Dempson JB, Schwarz CJ, Shears M & Furey G (2004) Comparative proximate body composition of Atlantic salmon with emphasis on parr from fluvial and lacustrine habitats. *Journal of Fish Biology* 64(5):1257-1271.
- DFO (2012) Temperature threshold to define management strategies for Atlantic salmon (*Salmo salar*) fisheries under environmentally stressful conditions. *DFO Can Sci Advis Sec Sci Advis Rep* 2012:17.
- Dubos V, May P, Gillis C-A, St-Hilaire A & Bergeron N (2023a) Nunavik anadromous Arctic char life histories, behaviour, and habitat use informed by both Inuit knowledge and western science: a year in Ungava Bay. *Arctic Science* 0(0):null.
- Dubos V, St-Hilaire A & Bergeron NE (2023b) Fuzzy logic modelling of anadromous Arctic char spawning habitat from Nunavik Inuit knowledge. *Ecological Modelling* 477:110262.
- Dugdale SJ (2016) A practitioner's guide to thermal infrared remote sensing of rivers and streams: recent advances, precautions and considerations. *WIREs Water* 3(2):251-268.

- Dugdale SJ, Bergeron NE & St-Hilaire A (2013) Temporal variability of thermal refuges and water temperature patterns in an Atlantic salmon river. *Remote Sensing of Environment* 136:358-373.
- Dunbar M & Hildebrand H (1952) Contribution to the study of the fishes of Ungava Bay. *Journal of the Fisheries Board of Canada* 9(2):83-128.
- Dunbar MJ (1952) The Ungava bay problem. *Arctic* 5(1):4-16.
- Dunmall KM, McNicholl DG & Reist JD (2018) Community-based monitoring demonstrates increasing occurrences and abundances of Pacific salmon in the Canadian Arctic from 2000 to 2017. *Technical Report* 11:87-90.
- Dunmall KM, Mochnacz NJ, Zimmerman CE, Lean C & Reist JD (2016) Using thermal limits to assess establishment of fish dispersing to high-latitude and high-elevation watersheds. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 73(12):1750-1758.
- Durkalec A, Beasterfield M, Jean-Gagnon F, Kasudluak P & Breton-Honeyman K (2020) Inuit Knowledge of Beluga of Southern Ungava Bay and the Marralik (Mucallic) and Ungunniavik (Whale) River Estuaries. (Nunavik Marine Regional Wildlife Board), p 66.
- Dyba K, Ermida S, Ptak M, Piekarczyk J & Sojka M (2022) Evaluation of Methods for Estimating Lake Surface Water Temperature Using Landsat 8. *Remote Sensing* 14(15):3839.
- Elliott J & Elliott J (2010) Temperature requirements of Atlantic salmon *Salmo salar*, brown trout *Salmo trutta* and Arctic charr *Salvelinus alpinus*: predicting the effects of climate change. *Journal of Fish Biology* 77(8):1793-1817.
- Elliott JM (1991) Tolerance and resistance to thermal stress in juvenile Atlantic salmon, *Salmo salar*. *Freshwater Biology* 25(1):61-70.
- Erkinaro H & Erkinaro J (1998) Feeding of Atlantic salmon, *Salmo salar* L., parr in the subarctic River Teno and three tributaries in northernmost Finland. *Ecology of Freshwater Fish* 7(1):13-24.
- Ermida SL, Soares P, Mantas V, Götsche F-M & Trigo IF (2020) Google earth engine open-source code for land surface temperature estimation from the landsat series. *Remote Sensing* 12(9):1471.
- Essou GRC, Brissette F & Lucas-Picher P (2017) The Use of Reanalyses and Gridded Observations as Weather Input Data for a Hydrological Model: Comparison of Performances of Simulated River Flows Based on the Density of Weather Stations. *Journal of Hydrometeorology* 18(2):497-513.
- Fakhari M, Raymond J, Martel R, Dugdale SJ & Bergeron N (2022) Identification of Thermal Refuges and Water Temperature Patterns in Salmonid-Bearing Subarctic Rivers of Northern Quebec. *Geographies* 2(3):528-548.
- FaunENord (2017) Fréquentation du réseau Koksoak par le saumon atlantique (*Salmo salar*) de la baie d'Ungava, Nunavik : phase 2, validation terrain du sous-bassin de la rivière Delay.), p 29.
- Finstad AG, Næsje TF & Forseth T (2004) Seasonal variation in the thermal performance of juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Freshwater Biology* 49(11):1459-1467.
- Frechette DM, Dugdale SJ, Dodson JJ & Bergeron NE (2018) Understanding summertime thermal refuge use by adult Atlantic salmon using remote sensing, river temperature monitoring, and acoustic telemetry. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 75(11):1999-2010.

- Gasset N, Fortin V, Dimitrijevic M, Carrera M, Bilodeau B, Muncaster R, Gaborit É, Roy G, Pentcheva N & Bulat M (2021) A 10 km North American precipitation and land-surface reanalysis based on the GEM atmospheric model. *Hydrology and Earth System Sciences* 25(9):4917-4945.
- Geissinger EA, Van Leeuwen TE, Kelly N, Pennell C, Fitzsimmons MG, Duffy S, Poole R, Angnatok J, Dempson JB & Côté D (2024) Salmonids in hot water: An unprecedented warm-water event in Labrador, a subarctic region of Canada. *Fisheries Management and Ecology* n/a(n/a):e12710.
- Gephard S (2008) Restoring Atlantic salmon (*Salmo salar*) to New England. *Saving Biological Diversity: Balancing Protection of Endangered Species and Ecosystems* :75-84.
- Gibson R (1993) The Atlantic salmon in fresh water: spawning, rearing and production. *Reviews in fish biology and fisheries* 3(1):39-73.
- Guth PL & Geoffroy TM (2021) LiDAR point cloud and ICESat-2 evaluation of 1 second global digital elevation models: Copernicus wins. *Transactions in GIS* 25(5):2245-2261.
- Halverson GH, Lee CM, Hestir EL, Hulley GC, Cawse-Nicholson K, Hook SJ, Bergamaschi BA, Acuña S, Tufillaro NB, Radocinski RG, Rivera G & Sommer TR (2022) Decline in Thermal Habitat Conditions for the Endangered Delta Smelt as Seen from Landsat Satellites (1985–2019). *Environmental Science & Technology* 56(1):185-193.
- Halvorsen M & Jørgensen L (1996) Lake-use by juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) and other salmonids in northern Norway. *Ecology of Freshwater Fish* 5(1):28-36.
- Handcock R, Gillespie A, Cherkauer K, Kay J, Burges S & Kampf S (2006) Accuracy and uncertainty of thermal-infrared remote sensing of stream temperatures at multiple spatial scales. *Remote Sensing of Environment* 100(4):427-440.
- Hastie T & Tibshirani R (1986) Generalized Additive Models. *Statistical Science* 1(3):297-310, 214.
- Hausfather Z, Marvel K, Schmidt GA, Nielsen-Gammon JW & Zelinka M (2022) Climate simulations: Recognize the 'hot model' problem. *Nature* 605(7908):26-29.
- Heath J & Rosengard S (2022) SIKU: The Indigenous Knowledge Social Network, and tool for community-driven research. *AGU Fall Meeting Abstracts*. p OS46A-03.
- Hedeholm RB, Broberg M, Nygaard R & Grønkjær P (2018) Population decline in the endemic Atlantic salmon (*Salmo salar*) in Kapisillit River, Greenland. *Fisheries Management and Ecology* 25(5):392-399.
- Hedger RD, Sundt-Hansen LE, Forseth T, Ugedal O, Diserud OH, Kvambekk ÅS & Finstad AG (2013) Predicting climate change effects on subarctic–Arctic populations of Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 70(2):159-168.
- Heggenes J, Stickler M, Alfredsen K, Brittain JE, Adeva-Bustos A & Huusko A (2021) Hydropower-driven thermal changes, biological responses and mitigating measures in northern river systems. *River Research and Applications* 37(5):743-765.
- Hein CL, Öhlund G & Englund G (2012) Future distribution of Arctic char *Salvelinus alpinus* in Sweden under climate change: effects of temperature, lake size and species interactions. *Ambio* 41:303-312.

- Hernandez C, Bougas B, Perreault-Payette A, Simard A, Côté G & Bernatchez L (2020) 60 specific eDNA qPCR assays to detect invasive, threatened, and exploited freshwater vertebrates and invertebrates in Eastern Canada. *Environmental DNA* 2(3):373-386.
- Hugue F, Lapointe M, Eaton BC & Lepoutre A (2016) Satellite-based remote sensing of running water habitats at large riverscape scales: Tools to analyze habitat heterogeneity for river ecosystem management. *Geomorphology* 253:353-369.
- Hydro-Québec (1978) Projet Ungava. Rivières George, à la Baleine et Arnaud. Études préliminaires d'environnement. Synthèse des données recueillies. Milieu aquatique. (Direction Environnement Ecologie Biophysique, Montréal), p 32.
- Hydro-Québec (1993) Rapport d'avant-projet. Partie 2 : Complexe hydroélectrique. Tome 2 : Description du milieu. Volume 2 : Milieu naturel marin. (Complexe Grande-Baleine), p 233.
- Imbert H, Martin P, Rancon J, Graffin V & Dufour S (2013) Evidence of late migrant smolts of Atlantic salmon (*Salmo salar*) in the Loire-Allier System, France. *Cybium* 37(1-2):5-14.
- Jacobsen MW, Nygaard R, Hansen BK, Broberg M, Hansen MM, Hedeholm R & Nielsen EE (2023) Observing the Arctic: A comparison of environmental DNA (eDNA) and electrofishing for monitoring Arctic char and Atlantic salmon. *Environmental DNA* 5(4):782-795.
- Jensen AJ & Johnsen BO (1986) Different adaptation strategies of Atlantic salmon (*Salmo salar*) populations to extreme climates with special reference to some cold Norwegian rivers. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 43(5):980-984.
- Johnson N, Druckenmiller ML, Danielsen F & Pulsifer PL (2021) The use of digital platforms for community-based monitoring. *BioScience* 71(5):452-466.
- Jonsson B & Jonsson N (2009) A review of the likely effects of climate change on anadromous Atlantic salmon *Salmo salar* and brown trout *Salmo trutta*, with particular reference to water temperature and flow. *Journal of fish biology* 75(10):2381-2447.
- Jonsson B, Jonsson N & Hansen LP (2003) Atlantic salmon straying from the River Imsa. *Journal of Fish Biology* 62(3):641-657.
- Klemetsen A, Amundsen P-A, Dempson JB, Jonsson B, Jonsson N, O'Connell MF & Mortensen E (2003) Atlantic salmon *Salmo salar* L., brown trout *Salmo trutta* L. and Arctic charr *Salvelinus alpinus* (L.): a review of aspects of their life histories. *Ecology of Freshwater Fish* 12(1):1-59.
- Koch JC, Sjöberg Y, O'Donnell JA, Carey MP, Sullivan PF & Terskaia A (2022) Sensitivity of headwater streamflow to thawing permafrost and vegetation change in a warming Arctic. *Environmental Research Letters* 17(4):044074.
- Kuenzer C, Guo H, Ottinger M, Zhang J & Dech S (2013) Spaceborne Thermal Infrared Observation – An Overview of Most Frequently Used Sensors for Applied Research. *Thermal Infrared Remote Sensing: Sensors, Methods, Applications*, Kuenzer C & Dech S (Édit.) Springer Netherlands, Dordrecht10.1007/978-94-007-6639-6_7. p 131-148.
- Kuiper SD, Coops NC, Hinch SG & White JC (2023) Advances in remote sensing of freshwater fish habitat: A systematic review to identify current approaches, strengths and challenges. *Fish and Fisheries* 24(5):829-847.

- Laanaya F, St-Hilaire A & Gloaguen E (2017) Water temperature modelling: comparison between the generalized additive model, logistic, residuals regression and linear regression models. *Hydrological sciences journal* 62(7):1078-1093.
- Larinier M, Porcher JP, Travade F & Gosset C (1994) *Passes a poissons. Expertise, conception des ouvrages de franchissement*.
- Lavoie J, Bourgault P, Smith TJ, Logan T, Leduc M, Caron L-P, Gammon S & Braun M (2024) An ensemble of bias-adjusted CMIP6 climate simulations based on a high-resolution North American reanalysis. *Scientific Data* 11(1):64.
- Le Jeune R (1981) Appréciation sommaire de la valeur piscicole des affluents du fleuve Koksoak, entre la chute Calcaire et la municipalité de Kuujuaq. (Groupe d'étude conjoint Caniapiscou-Koksoak, Société d'énergie de la Baie-James), p 44.
- Le Jeune R (1992) Développement des pêches du Québec nordique: état des ressources in *Entente auxiliaire Canada-Québec sur le développement des pêches. Volet III - Québec nordique* (Groupe Environnement Shooner inc., Québec), p 76.
- Le Jeune R & Shooner G (1982) Appréciation du potentiel salmonicole de quelques affluents de la Koksoak et de la Caniapiscou (Groupe d'étude conjoint Caniapiscou-Koksoak, Société d'énergie de la Baie-James), p 27.
- Lee R & Power G (1976) Atlantic salmon (*Salmo salar*) of the Leaf river, Ungava Bay. *Journal of the Fisheries Board of Canada* 33(11):2616-2621.
- Leeuwen TEV, Dempson JB, Burke CM, Kelly NI, Robertson MJ, Lennox RJ, Havn TB, Svenning M, Hinks R, Guzzo MM, Thorstad EB, Purchase CF & Bates AE (2020) Mortality of Atlantic salmon after catch and release angling: assessment of a recreational Atlantic salmon fishery in a changing climate. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 77(9):1518-1528.
- Legendre V (1990) Âge des ouananiches d'après leurs écailles, fleuve Nastapoka, estuaire, Québec, à la baie d'Hudson. *Montréal. Éditions Groupe Environnement Shooner inc., Québec*.
- Li H, Zhao J, Yan B, Yue L & Wang L (2022) Global DEMs vary from one to another: an evaluation of newly released Copernicus, NASA and AW3D30 DEM on selected terrains of China using ICESat-2 altimetry data. *International Journal of Digital Earth* 15(1):1149-1168.
- Liljedahl AK, Timling I, Frost GV & Daanen RP (2020) Arctic riparian shrub expansion indicates a shift from streams gaining water to those that lose flow. *Communications Earth & Environment* 1(1):50.
- Liu Y, Liu H, Wang L, Xu M, Cohen S & Liu K (2021) Derivation of spatially detailed lentic habitat map and inventory at a basin scale by integrating multispectral Sentinel-2 satellite imagery and USGS Digital Elevation Models. *Journal of Hydrology* 603:126876.
- Mainguy J & Beaupré L (2019a) Establishment of a reference state for Arctic charr populations in Aupaluk. (Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de l'expertise sur la faune aquatique and Direction de la gestion de la faune du Nord-du-Québec, Québec).
- Mainguy J & Beaupré L (2019b) Establishment of a reference state for the Arctic charr population of the Bérard River in Tasiujaq. (Ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs, Direction de l'expertise sur la faune aquatique and Direction de la gestion de la faune du Nord-du-Québec, Québec).

- Martí-Cardona B, Prats J & Niclòs R (2019) Enhancing the retrieval of stream surface temperature from Landsat data. *Remote Sensing of Environment* 224:182-191.
- Martin P, Rancon J, Segura G, Laffont J, Boeuf G & Dufour S (2012) Experimental study of the influence of photoperiod and temperature on the swimming behaviour of hatchery-reared Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) smolts. *Aquaculture* 362-363:200-208.
- McKenney DW, Hutchinson MF, Papadopol P, Lawrence K, Pedlar J, Campbell K, Milewska E, Hopkinson RF, Price D & Owen T (2011) Customized spatial climate models for North America. *Bulletin of the American Meteorological Society* 92(12):1611-1622.
- Medinas de Campos M, Tritico HM, Girard P, Zeilhofer P, Hamilton SK & Fantin-Cruz I (2020) Predicted impacts of proposed hydroelectric facilities on fish migration routes upstream from the Pantanal wetland (Brazil). *River Research and Applications* 36(3):452-464.
- MELCC (2020) Données du Réseau de surveillance du climat du Québec. (Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Direction de la qualité de l'air et du climat, Québec).
- MFFP (2016) Lidar - Modèles numériques (terrain, canopée, pente), [Jeu de données]. <https://www.donneesquebec.ca/recherche/dataset/produits-derives-de-base-du-lidar>.
- Monnerjahn U (2011) Atlantic Salmon (*Salmo salar* L.) re-introduction in Germany: a status report on national programmes and activities. *Journal of Applied Ichthyology* 27(s3):33-40.
- Morin R (1991) Atlantic salmon (*Salmo salar*) in the lower Nastapoka River, Quebec: distribution and origins of salmon in eastern Hudson Bay. *Canadian journal of zoology* 69(6):1674-1681.
- Morneau C, Couillard P-L, Laflamme J & Major M (2021) *Classification écologique du territoire québécois*. Direction des inventaires forestiers,
- Muñoz-Sabater J, Dutra E, Agustí-Panareda A, Albergel C, Arduini G, Balsamo G, Boussetta S, Choulga M, Harrigan S, Hersbach H, Martens B, Miralles DG, Piles M, Rodríguez-Fernández NJ, Zsoter E, Buontempo C & Thépaut JN (2021) ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth Syst. Sci. Data* 13(9):4349-4383.
- Neelin M (2021a) Arctic char in a changing climate: community priorities and recommendations. *Makivik Corporation, Kuujuaq, Quebec* :91.
- Neelin MN (2021b) *Beavers (Castor canadensis) in Nunavik: integrating multiple ways of knowing to address climate change concerns related to the expansion of boreal species into tundra regions*. McGill University (Canada),
- Nicholl DGM, Harris LN, Loewen T, May P, Tran L, Akeeagok R, Methuen K, Lewis C, Jeppesen R, Illasiak S, Green B, Koovaluk J, Annahatak Z, Kapakatoak J, Kaosoni N, Hainnu B, Maksagak B, Reist JD & Dunmall KM (2021) Noteworthy occurrences among six marine species documented with community engagement in the Canadian Arctic. *Animal Migration* 8(1):74-83.
- Niculita M (2023) Copernicus DEM vs. LiDAR: assessment of landform accuracy representation at regional scale. *EGU General Assembly Conference Abstracts*. p EGU-10090.
- Nielsen JL, Ruggerone GT & Zimmerman CE (2013) Adaptive strategies and life history characteristics in a warming climate: Salmon in the Arctic? *Environmental Biology of Fishes* 96(10):1187-1226.
- NRCan (2004) National Hydro Network, Canada, Level 1 Product Specifications (Centre for Topographic Information, Sherbrooke), p 21.

- NRCan (2013) Canadian Digital Elevation Model - Product Specifications. (Canada Centre for Mapping and Earth observation, Sherbooke), p 18.
- NRCan (2023) High Resolution Digital Elevation Model (HRDEM) – CanElevation Series – Product Specifications.), p 23.
- O'Connell MF & Ash EGM (1993) Smolt size in relation to age at first maturity of Atlantic salmon (*Salmo salar*): the role of lacustrine habitat. *Journal of Fish Biology* 42(4):551-569.
- Okolie CJ & Smit JL (2022) A systematic review and meta-analysis of Digital elevation model (DEM) fusion: pre-processing, methods and applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 188:1-29.
- Ouarda TBMJ, Charron C & St-Hilaire A (2022) Regional estimation of river water temperature at ungauged locations. *Journal of Hydrology X* 17:100133.
- Pedersen C, Otokiak M, Koonoo I, Milton J, Maktar E, Anaviapik A, Milton M, Porter G, Scott A & Newman C (2020) SciQ: an invitation and recommendations to combine science and Inuit Qaujimagatuqangit for meaningful engagement of Inuit communities in research. *Arctic Science* 6(3):326-339.
- Pedersen S, Rasmussen G, Nielsen EE, Karlsson L & Nyberg P (2007) Straying of Atlantic salmon, *Salmo salar*, from delayed and coastal releases in the Baltic Sea, with special focus on the Swedish west coast. *Fisheries Management and Ecology* 14(1):21-32.
- Pekel JF, Cottam A, Gorelick N & Belward AS (2016) High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature* 540(7633):418-422.
- Porter C, Howat I, Noh M-J, Husby E, Khuvis S, Danish E, Tomko K, Gardiner J, Negrete A, Yadav B, Klassen J, Kelleher C, Cloutier M, Bakker J, Enos J, Arnold G, Bauer G & Morin P (2023) ArcticDEM - Mosaics, Version 4.1. Édit Polar Geospatial C (Harvard Dataverse).
- Power G (1958a) The evolution of the freshwater races of the Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) in eastern North America. *Arctic* 11(2):86-92.
- Power G (1958b) *Studies on the Atlantic salmon (Salmo salar Linn.)*. (McGILL University MONTREAL). 166 p
- Power G (1969) *The Salmon of Ungava Bay*. Arctic Institute of North America,
- Power G (1981) Stock characteristics and catches of Atlantic salmon (*Salmo salar*) in Quebec, and Newfoundland and Labrador in relation to environmental variables. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 38(12):1601-1611.
- Power G, Brown RS & Imhof JG (1999) Groundwater and fish—insights from northern North America. *Hydrological Processes* 13(3):401-422.
- Power G & Le Jeune R (1976) Le potentiel de pêche du Nouveau-Québec. *Cahiers de géographie du Québec* 20(50):409-428.
- Power M, Reist JD & Dempson JB (2008) Fish in high-latitude Arctic lakes. *Polar lakes and rivers* :249-267.
- Rahimpour Asenjan M, Brissette F, Martel JL & Arsenault R (2023) Understanding the influence of “hot” models in climate impact studies: a hydrological perspective. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 27(23):4355-4367.
- Rimmer D, Paim U & Saunders R (1983) Autumnal habitat shift of juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar*) in a small river. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 40(6):671-680.

- Rincón E, St-hilaire A, Bergeron NE & Dugdale SJ (2023) Combining Landsat TIR-imagery data and ERA5 reanalysis information with different calibration strategies to improve simulations of streamflow and river temperature in the Canadian Subarctic. *Hydrological Processes* 37(10):e15008.
- Rivers-Moore NA & Dallas HF (2022) A spatial freshwater thermal resilience landscape for informing conservation planning and climate change adaptation strategies. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 32(5):832-842.
- Robitaille J, Y. Côté, G. Hayeur et G. Shooner (1984) *Particularités de la reproduction du saumon atlantique (Salmo salar) dans une partie du réseau Koksoak, en Ungava*. Pêches et océans. 33 p
- Robitaille JA, Côté Y, Shooner G & Hayeur G (1986) Growth and maturation patterns of Atlantic salmon, *Salmo salar*, in the Koksoak River, Ungava, Quebec. *Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences* 89:62-69.
- Rowland JC, Jones CE, Altmann G, Bryan R, Crosby BT, Hinzman LD, Kane DL, Lawrence DM, Mancino A, Marsh P, McNamara JP, Romanvosky VE, Toniolo H, Travis BJ, Trochim E, Wilson CJ & Geernaert GL (2010) Arctic Landscapes in Transition: Responses to Thawing Permafrost. *Eos, Transactions American Geophysical Union* 91(26):229-230.
- Roy D & Messier D (1989) A review of the effects of water transfers in the La Grande hydroelectric complex (Quebec, Canada). *Regulated Rivers: Research & Management* 4(3):299-316.
- Salonius PO (1973) Barriers to range extension of Atlantic and Pacific salmon in arctic North America. *Arctic* :112-122.
- Santiago JM, Alonso C, Garcia de Jalon D, Solana-Gutiérrez J & Muñoz-Mas R (2020) Effects of climate change on the life stages of stream-dwelling brown trout (*Salmo trutta* Linnaeus, 1758) at the rear edge of their native distribution range. *Ecohydrology* 13(7):e2241.
- Seyedhashemi H, Vidal J-P, Diamond JS, Thiéry D, Monteil C, Hendrickx F, Maire A & Moatar F (2022) Regional, multi-decadal analysis on the Loire River basin reveals that stream temperature increases faster than air temperature. *Hydrology and Earth System Sciences* 26(9):2583-2603.
- Simon K, James T, Henton J & Dyke A (2016) A glacial isostatic adjustment model for the central and northern Laurentide Ice Sheet based on relative sea level and GPS measurements. *Geophysical Journal International* 205(3):1618-1636.
- Skoglund H, Forseth T & Einum S (2024) Among-river pattern in relative abundance of two salmonid fishes reflects temperature-dependent competition. *Freshwater Biology*.
- Sofia G, Bailly JS, Chehata N, Tarolli P & Levavasseur F (2016) Comparison of Pleiades and LiDAR Digital Elevation Models for Terraces Detection in Farmlands. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 9(4):1567-1576.
- St-Hilaire A, Caissie D, Bergeron NE, Ouarda TB & Boyer C (2021) Climate change and extreme river temperature. *Climate Change and Extreme Events*, Elsevier. p 25-37.
- St-Hilaire A, Oyinlola MA, Rincón E & Ferchichi H (2023) Six decades of research on river temperature in Canada. *Canadian Water Resources Journal / Revue canadienne des ressources hydriques* 48(4):450-474.
- St-Pierre S, McNeil E & Bouillon M (2010) Projet d'aménagement hydroélectrique Innavik, rivière Inukjuak. Rapport d'étude d'impact sur l'environnement et le milieu humain. (RSW inc., Montréal), p 126.

- Stephenson SA, Burrows JA & Babaluk JA (2005) Long-Distance Migrations by Inconnu (*Stenodus leucichthys*) in the Mackenzie River System. *Arctic* 58(1):21-25.
- Symons PE (1979) Estimated escapement of Atlantic salmon (*Salmo salar*) for maximum smolt production in rivers of different productivity. *Journal of the Fisheries Board of Canada* 36(2):132-140.
- Tavares MH, Cunha AHF, Motta-Marques D, Ruhoff AL, Fragoso CR, Munar AM & Bonnet M-P (2020) Derivation of consistent, continuous daily river temperature data series by combining remote sensing and water temperature models. *Remote Sensing of Environment* 241:111721.
- Thornton MM, Shrestha R, Wei Y, Thornton PE, Kao SC & Wilson BE (2022) Daymet: Daily Surface Weather Data on a 1-km Grid for North America, Version 4 R1. (ORNL Distributed Active Archive Center).
- Thornton PE, Shrestha R, Thornton M, Kao S-C, Wei Y & Wilson BE (2021) Gridded daily weather data for North America with comprehensive uncertainty quantification. *Scientific Data* 8(1):190.
- Thorstad E, Whoriskey F, Rikardsen A & Aarestrup K (2010) Aquatic Nomads: The Life and Migrations of the Atlantic Salmon.
- Thorstad EB, Bliss D, Breau C, Damon-Randall K, Sundt-Hansen LE, Hatfield EMC, Horsburgh G, Hansen H, Maoiléidigh NÓ, Sheehan T & Sutton SG (2021) Atlantic salmon in a rapidly changing environment—Facing the challenges of reduced marine survival and climate change. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 31(9):2654-2665.
- Thorstad EB, Økland F, Aarestrup K & Heggberget TG (2008) Factors affecting the within-river spawning migration of Atlantic salmon, with emphasis on human impacts. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* 18:345-371.
- Thorstad EB, Whoriskey F, Rikardsen AH & Aarestrup K (2011) Aquatic nomads: the life and migrations of the Atlantic salmon. *Atlantic salmon ecology* 1(6):1-32.
- Twardek WM, Cooke SJ & Lapointe NWR (2023) Fishway performance of adult Chinook salmon completing one of the world's longest inland salmon migrations to the upper Yukon River. *Ecological Engineering* 187:106846.
- USGS (2021) Landsat 4-7 Collection 2 (C2) Level 2 Science Product (L2SP) Guide. *United States Geological Survey: Asheville, NC, USA* :1-44.
- USGS (2022) Landsat 8-9 Collection 2 (C2) Level 2 Science Product (L2SP) Guide. *United States Geological Survey: Asheville, NC, USA* :1-42.
- Uuemaa E, Ahi S, Montibeller B, Muru M & Kmoch A (2020) Vertical Accuracy of Freely Available Global Digital Elevation Models (ASTER, AW3D30, MERIT, TanDEM-X, SRTM, and NASADEM). *Remote Sensing* 12(21):3482.
- Van Vliet MTH, Franssen WHP, Yearsley JR, Ludwig F, Haddeland I, Lettenmaier DP & Kabat P (2013) Global river discharge and water temperature under climate change. *Global Environmental Change* 23(2):450-464.
- Vanhellemont Q (2020) Automated water surface temperature retrieval from Landsat 8/TIRS. *Remote Sensing of Environment* 237:111518.
- Vincent WF, Lemay M & Allard M (2017) Arctic permafrost landscapes in transition: towards an integrated Earth system approach. *Arctic Science* 3(2):39-64.

- Wang S, Ren Z, Wu C, Lei Q, Gong W, Ou Q, Zhang H, Ren G & Li C (2019) DEM generation from Worldview-2 stereo imagery and vertical accuracy assessment for its application in active tectonics. *Geomorphology* 336:107-118.
- Wilbur NM, O'Sullivan AM, MacQuarrie KT, Linnansaari T & Curry RA (2020) Characterizing physical habitat preferences and thermal refuge occupancy of brook trout (*Salvelinus fontinalis*) and Atlantic salmon (*Salmo salar*) at high river temperatures. *River Research and Applications*.
- Wolter C (2015) Historic catches, abundance, and decline of Atlantic salmon *Salmo salar* in the River Elbe. *Aquatic Sciences* 77(3):367-380.
- Wood SN (2011) Fast stable restricted maximum likelihood and marginal likelihood estimation of semiparametric generalized linear models. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)* 73(1):3-36.
- Worrall F, Howden NJ, Burt TP & Hannah DM (2022) River water temperature demonstrates resistance to long-term air temperature change. *Hydrological Processes* 36(11):e14732.