

**CARACTÉRISATION DU RÉGIME THERMIQUE DES RIVIÈRES DU QUÉBEC POUR
L'ÉVALUATION DE LA SENSIBILITÉ DES COURS D'EAU AUX DÉBITS D'ÉTIAGE**

Rapport final

Anik Daigle, Claudine Boyer et André St-Hilaire

Centre Eau, Terre et Environnement
Institut national de la recherche scientifique

Février 2021

Ce rapport est rendu possible grâce à la participation financière du ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, dans le cadre de la mise en œuvre du Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques, financé par le Fonds vert.



© INRS, Centre - Eau Terre Environnement, 2021
Tous droits réservés

ISBN : 978-2-89146-960-9 (version électronique)

Dépôt légal - Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2022
Dépôt légal - Bibliothèque et Archives Canada, 2022

TABLE DES MATIÈRES

1	CONTEXTE	6
2	MÉTHODOLOGIE	7
2.1	Caractérisation des régimes thermiques.....	7
2.1.1	Validation des mesures ponctuelles de la température comme outil de caractérisation des régimes thermiques : résumé des analyses préliminaires	7
2.1.2	Préparation des bases de données	9
2.2	Groupement des stations à partir des caractéristiques physiques de leur bassin	12
2.2.1	Méthode d'agrégation hiérarchique (Hierarchical Clustering).....	12
2.2.2	Sélection des stations pour les analyses de spatialisation	12
2.2.3	Caractérisation physique des bassins versants en amont des stations	14
3	RÉSULTATS ET DISCUSSION.....	16
3.1	Caractérisation des régimes thermiques.....	16
3.1.1	Ajustement du modèle gaussien aux données des stations de la BQMA	16
3.2	Spatialisation de la température maximale interannuelle	23
3.2.1	Classement par la méthode d'analyse des regroupements d'ArcGIS basé sur la valeur du paramètre α (sélection de stations)	24
3.2.2	Groupements homogènes de stations en fonction des caractéristiques des bassins ..	25
3.3	Spatialisation du BFI	29
3.3.1	Groupements homogènes de stations en fonction des caractéristiques physiques des bassins	29
3.4	Indice combiné pour caractériser la sensibilité thermique aux prélèvements d'eau ..	32
3.5	Contribution de la variabilité des régimes thermiques à la sensibilité	36
4	CONCLUSION.....	37
5	RÉFÉRENCES	38
6	ANNEXES	39
6.1	Analyse préliminaire	39
6.2	Caractérisation_BQMA	39
6.3	Sources des documents utilisés pour la caractérisation physique des bassins versants en amont des stations.....	39
6.4	Méthode et résultats pour les stations du réseau RivTemp	39
6.5	Tableau des indices par station.....	40

LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Nombre de stations retenues ayant au moins cinq ans de données (barres, axe vertical de gauche) et nombre moyen d'années de données par station (points rouges, axe vertical de droite) pour toutes les périodes de 20 ans entre 1979 et 2019. (Ce graphique inclut les stations de la BQMA situées dans le Saint-Laurent, mais exclut les stations de RivTemp.).....	10
Figure 2.	Nombre de stations retenues ayant au moins cinq ans de données dans la période de 20 ans débutant l'année indiquée en abscisse, et étant toujours actives pendant la période 2000-2019. (Ce graphique inclut les stations de la BQMA situées dans le Saint-Laurent, mais exclut les stations de RivTemp.).....	11
Figure 3.	Stations actives pendant au moins cinq ans entre 1981 et 2000. Les couleurs réfèrent au nombre d'années de données disponibles entre 1981 et 2000, et les symboles pleins identifient les stations qui sont aussi actives pendant au moins cinq ans dans la période 2000-2019. (Ce graphique inclut les stations de la BQMA situées dans le Saint-Laurent, mais exclut les stations de RivTemp.).....	11
Figure 4.	Carte des stations et bassins versants étudiés	13
Figure 5.	Histogramme des distances entre les stations Teau et les stations BFI associées ..	13
Figure 6.	Échelle de caractérisation physique des bassins versants en amont des stations étudiées. L'échelle globale (bassin versant entier) est représentée par le trait noir et l'échelle locale (buffer) est identifiée par la zone colorée en kaki.	14
Figure 7.	De gauche à droite : ajustements du modèle gaussien sur les données 2000-2019 des stations 01010002 (La Grande Rivière à la hauteur de la prise d'eau, rive gauche 1,5 km en amont du pont-route 132 à Grande-Rivière; 45 mesures sur six ans entre 2014 et 2019), et 03040010 (Richelieu 125 m en amont du barrage Fryer, rive droite, en aval de Saint-Jean-sur-Richelieu; 234 mesures entre 2000 et 2019).	17
Figure 8.	De gauche à droite : ajustements du modèle gaussien sur les données 2000-2019 des stations 01120005 (Nouvelle au pont de la route de Miguasha (pont Kearney) à Nouvelle) et 04320006 (Des Mille Îles à l'usine de filtration de Sainte-Thérèse à 100 m en amont du pont-route 117).	17
Figure 9.	Valeurs estimées du paramètre a dans l'espace géographique pour les périodes 2000-2019 (299 stations de la BQMA). Les valeurs sont affichées par classes de 1°C.	19
Figure 10.	Valeurs estimées du paramètre b dans l'espace géographique pour les périodes 2000-2019 (299 stations de la BQMA). Les valeurs sont affichées par classes de 5 jours.....	19
Figure 11.	Valeurs estimées du paramètre c dans l'espace géographique pour les périodes 2000-2019 (299 stations de la BQMA). Les valeurs sont affichées par classes de 7 jours.....	20
Figure 12.	Différence du paramètre a entre la période 2000-2019 et 1981-2000 (144 stations ayant 5 ans et plus et 40 mesures et plus).	20
Figure 13.	Histogramme des différences du paramètre a entre la période 2000-2019 et 1981-2000 (144 stations ayant 5 ans et plus et 40 mesures et plus).	21

Figure 14.	Histogramme des différences de l'écart-type moyen juin-sept entre la période 2000-2019 et 1981-2000 (135 stations).	21
Figure 15.	Valeurs des paramètres et de la variabilité interannuelle obtenues pour l'ensemble des stations (BQMA et RivTemp) et pour les deux périodes considérées.	22
Figure 16.	Écart-type mensuel interannuel moyen des températures des mois juin à septembre pour les périodes 2000-2019. Les valeurs sont présentées par classe de 0,5°C.	23
Figure 17.	Classification de la valeur du paramètre a estimé à chaque station à l'aide de la méthode d'analyse des regroupements d'ArcGIS.	25
Figure 18.	Groupement des stations/bassins en fonction de prédictors physiques (liste au Tableau 1). Certains sous-bassins sont superposés aux bassins de niveau 1.	26
Figure 19.	Diagramme en boîte des valeurs du paramètre a des stations pour les différents groupes basés sur les prédictors physiques (sans les doublons des stations BFI, soit 149 stations).....	27
Figure 20.	Représentation des stations en fonction d'une division en a) deux groupes ou b) trois groupes prédictors physiques.	28
Figure 21.	Groupements des 105 stations BFI en fonction des prédictors physiques (Tableau 3). Certains bassins sont superposés. Les astérisques bleus indiquent que la valeur BFI à la station est inférieure de plus de 0,15 (env. écart-type maximum observé) à celle de son groupe. Tandis que les croix bleues indiquent que la valeur est supérieure à 0,15 celle de son groupe.....	30
Figure 22.	Diagramme en boîte des valeurs de l'index BFI des stations pour les différents groupes basés sur les prédictors physiques.....	30
Figure 23.	Groupements des bassins de niveau 1 en fonction des prédictors physiques importants pour le BFI.....	32
Figure 24.	Indice combiné créé à partir de la combinaison des groupements obtenus à partir des prédictors pour le paramètre a et de ceux obtenus pour l'indice BFI (105 stations). Les astérisques et les croix sous les symboles indiquent que les valeurs estimées à la station sont inférieures ou supérieures à celles du groupe soit pour le BFI (en bleu) soit pour le paramètre a (en noir).....	34
Figure 25.	Indice combiné pour les 56 bassins de niveau 1, estimé d'après leurs caractéristiques physiques et les classements des indices thermiques et BFI.....	35

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.	Liste des variables physiques présélectionnées pour les analyses de groupement des stations.	15
Tableau 2.	Étendues des valeurs des variables les mieux corrélées avec le paramètre a et sélectionnées pour les analyses de groupement des stations (161 stations/BV).	15
Tableau 3.	Étendues des valeurs des variables les mieux corrélées avec le BFI et sélectionnées pour les analyses de groupement des stations (105 stations).....	16
Tableau 4.	Caractéristiques des séries retenues pour les périodes 2000-2019 et 1981-2000. Seules les stations avec des séries comptant au moins cinq ans de données et au moins 40 mesures pour la BQMA sont comptabilisées.	16
Tableau 5.	Statistiques descriptives du paramètre a pour les différents groupes de stations Teau définis par les prédictors physiques (sans les doublons des stations BFI).	27
Tableau 6.	Écart-type mensuel interannuel moyen des températures des mois juin à septembre en fonction des groupes basés sur les prédictors physiques.	27
Tableau 7.	Comparaison de la moyenne du paramètre a entre des groupes basés sur les prédictors physiques	27
Tableau 8.	Statistiques descriptives de l'index BFI pour les différents groupes de stations.	31
Tableau 9.	Comparaison de la moyenne de l'indice BFI entre des groupes basés sur les prédictors physiques.	31
Tableau 10.	Définition de l'indice combiné à partir des groupements des indices BFI et thermique.	33
Tableau 11.	Liste des stations avec un indice combiné de 9 (faible et chaud) et de 1 (élevé et froid)	35
Tableau 12.	Stations ayant une variabilité interannuelle (différente de la moyenne ($\pm 1\sigma$)).....	36

1 CONTEXTE

Ce rapport présente la méthodologie et les résultats du projet *Caractérisation du régime thermique des rivières du Québec pour l'évaluation de la sensibilité des cours d'eau aux débits d'étiage*, projet s'insérant dans la démarche du Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques (MELCC) pour le développement d'outils de gestion des prélèvements d'eau de surface. À l'heure actuelle, cette gestion s'appuie essentiellement sur des indicateurs hydrologiques¹. Des travaux en cours visent une mise à jour des critères de gestion afin d'inclure des paramètres de qualité de l'eau. Le présent projet concerne en particulier l'intégration des caractéristiques du régime thermique des rivières dans l'évaluation de leur sensibilité aux prélèvements d'eau.

L'objectif du projet² est de classer la sensibilité des cours d'eau du Québec sur la base de leur régime thermique, de leur débit de base et de la relation entre les deux variables. Les risques de connaître des épisodes chauds en rivière sont accrus sous des conditions d'étiage. Par conséquent, la classification de la sensibilité des cours d'eau combine des indicateurs de la température annuelle maximale moyenne et le débit d'étiage. L'objectif ultime de cet exercice est d'en arriver à une spatialisation de la sensibilité des cours d'eau aux prélèvements d'eau.

Le projet a été précédé d'analyses préliminaires consistant à évaluer le potentiel de la banque de données sur la qualité du milieu aquatique (BQMA) pour caractériser le régime thermique d'un large éventail de cours d'eau dans le sud du Québec. Les principales recommandations de ces analyses préliminaires sont rappelées à la section 2.1.1.

Suivant ces recommandations, les objectifs spécifiques de ce travail sont :

- D'évaluer les paramètres caractérisant le régime thermique de l'ensemble des stations de la BQMA ayant cinq ans et plus de données.
- D'évaluer la distribution spatiale des paramètres thermiques et d'identifier les variables physiques du milieu expliquant le mieux la distribution de la température maximale moyenne (moyenne interannuelle) afin d'en permettre une spatialisation au-delà du réseau des stations de thermie.
- De présenter la distribution spatiale de l'indice du débit de base (mesuré par le « base flow index » ou BFI) et d'identifier les variables physiques du milieu expliquant le mieux sa distribution afin d'en permettre une spatialisation.

¹ Guide de conception des installations de production d'eau potable. Dernière mise à jour le 04/02/2015. Disponible en ligne : <http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/potable/guide/index.htm>

² Tiré de la proposition de projet transmise par le MELCC le 20 juin 2019.

- De classer la sensibilité des cours d'eau du Québec en combinant les classifications spatiales de la thermie des rivières (chaude, moyenne et froide) et de l'indice du débit de base (débits de base faible, moyen, élevé).

2 MÉTHODOLOGIE

2.1 CARACTÉRISATION DES RÉGIMES THERMIQUES

La méthodologie proposée pour caractériser les régimes thermiques est basée sur celle présentée par Daigle et al. (2019), soit l'estimation des trois paramètres d'une fonction gaussienne représentant la température moyenne interannuelle en fonction du jour de l'année :

$$\hat{T}(j) = a \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{j-c}{b}\right)^2\right) \quad (1)$$

où $\hat{T}(j)$ est la température moyenne interannuelle estimée pour le jour j avec $j = [1,365]$, a est un facteur d'échelle correspondant au maximum annuel, b est l'écart type qui devient ici une mesure de la durée de la saison chaude, et c est la moyenne, soit le jour auquel survient le maximum annuel.

2.1.1 Validation des mesures ponctuelles de la température comme outil de caractérisation des régimes thermiques : résumé des analyses préliminaires

Daigle et al. (2019) ont ajusté ce modèle sur des moyennes journalières interannuelles obtenues de séries de mesures *continues* de la température. Dans le cadre de la présente étude, ce sont des mesures *ponctuelles* à faible résolution temporelle (ex. : mensuelles), acquises dans le cadre des programmes de suivis compilés dans la BQMA, qui sont utilisées. On a donc d'abord évalué la possibilité d'utiliser ce modèle sur des mesures ponctuelles de la température, telles que celles acquises dans le cadre des programmes de suivis compilés dans la BQMA.

Pour répondre à cette question, des séries de données ayant des résolutions temporelles similaires à celles disponibles dans la BQMA ont été simulées par dégradations de séries continues de hautes résolutions temporelles (horaires et subhoraires) et le modèle gaussien a été ajusté sur un grand nombre de ces séries simulées. L'écart à des modèles de référence (établis à partir des séries chronologiques originales à haute fréquence d'échantillonnage) a été évalué en fonction de la période d'échantillonnage, de la longueur de la série et de l'heure de la mesure.

Ces analyses préliminaires ont fait l'objet d'un rapport remis le 23 avril 2020 et fourni en annexe. On en rappelle ici les conclusions :

2.1.1.1 Limites des analyses préliminaires

- L'évaluation de la fiabilité des ajustements a été faite d'après des valeurs de référence elles-mêmes incertaines, elles aussi obtenues par l'ajustement du modèle gaussien sur des séries de longueurs limitées.
- Il n'a été pas possible de simuler des séries plus longues que 16 ans que pour deux rivières en raison de la longueur limitée des séries continues disponibles, alors que plusieurs stations de la BQMA sont suivies depuis plus de 30 ans. On remarque cependant que pour la plupart des cas testés, la variabilité des paramètres du modèle gaussien semble se stabiliser ou décroître beaucoup moins rapidement après 5-8 ans de données, et ce même pour une fréquence d'échantillonnage de 1/30j.
- Il n'a pas été possible d'évaluer de façon exhaustive l'effet d'une possible tendance dans les températures des rivières sur l'ajustement de la fonction gaussienne.

2.1.1.2 Recommandations

Étant donné que l'objectif du projet en est un de classification et non de prévision, nous croyons que les estimations du régime thermique qui seraient obtenues à partir de mesures ponctuelles échantillonnées sur une base mensuelle seraient adéquates si :

- Les séries de mesures utilisées ont une longueur minimale de 5 ans.
- Pour les séries de mesures particulièrement longues (>15-20 ans), des modèles différents sont ajustés sur les première et dernière parties de la série pour vérifier la présence d'une éventuelle tendance dans le régime thermique (voir le cas de la Trinité).
- Les ajustements obtenus sont présentés comme des estimations du régime thermique; on note aussi que les analyses ne permettront pas de fournir d'intervalles de confiance sur les ajustements qui seront obtenus à partir des données de la BQMA.
- Les valeurs des paramètres b et c sont traitées avec davantage de prudence encore que celles du paramètre a .

2.1.2 Préparation des bases de données

Suivant ces recommandations de l'analyse préliminaire, la fonction gaussienne a été ajustée sur :

- Les données de la BQMA pour les stations auxquelles au moins 40 mesures acquises sur une période d'au moins cinq années sont disponibles ;
- Les moyennes interannuelles journalières calculées à partir de mesures continues disponibles via le réseau RivTemp (www.rivtemp.ca , Boyer et al., 2016), aux stations auxquelles aux moins cinq années de données sont disponibles. La méthode et les résultats pour ces analyses sont présentés en annexe. Les analyses de spatialisation et sensibilité de cette étude n'incluent pas ces stations.

La variabilité interannuelle des régimes thermiques a été évaluée par l'écart-type mensuel interannuel moyen de la température de l'eau entre juin et septembre.

Afin d'assurer une certaine uniformité dans les conditions climatiques et atténuer l'effet d'une éventuelle tendance, cette caractérisation a été effectuée de façon distincte sur deux périodes de 20 ans, soit la période 2000-2019 et la période 1981-2000.

2.1.2.1 Mesures ponctuelles de la BQMA

La BQMA rassemble les données de 659 stations de mesures comptant de 1 à 40 années de données, avec des fréquences d'échantillonnage variables (le plus souvent mensuelle). Conformément aux recommandations énoncées dans les analyses préliminaires (section 2.1), seules les stations disposant d'au moins 40 mesures acquises sur une période d'au moins cinq années ont été retenues pour la suite de l'analyse. Ce nombre seuil de mesures correspond à une moyenne de huit mesures par année, soit à environ une mesure par mois en eau libre. Dans ces mêmes analyses préliminaires, il a été noté que le régime thermique d'une rivière peut évoluer dans le temps, et donc que des régimes thermiques estimés à partir de données acquises à des périodes très différentes pourraient ne pas être comparables. On a donc limité les séries à l'intérieur d'une période de 20 ans, soit les années 2000 à 2019 incluses.

La BQMA contient des données acquises entre 1979 et 2019. Le choix de la période de 20 ans sur laquelle poursuivre l'analyse a été fondé sur trois critères :

- Viser un maximum de stations de mesures actives ;
- Inclure des séries de mesures les plus longues possible ;
- Retenir une période relativement récente, pour qu'elle soit représentative des régimes thermiques actuels.

La Figure 1 montre le nombre de stations actives disposant d'au moins cinq ans de données (barres, axe vertical de gauche) et le nombre moyen d'années de données par station (points rouges, axe vertical de droite) pour toutes les périodes de 20 ans entre 1979 et 2019. On peut voir que les périodes au cours desquelles il y a le plus de stations actives pendant au moins cinq ans sont celles débutant en 1998, 1999 et 2000, avec 300 stations. Parmi ces périodes, celle pour laquelle le nombre moyen d'années de données par station est le plus grand est la période 2000-2019. Comme il s'agit aussi de la période la plus récente, ce choix rejoint aussi le troisième critère listé ci-haut. La période 2000-2019 a donc été choisie pour la suite de l'étude.

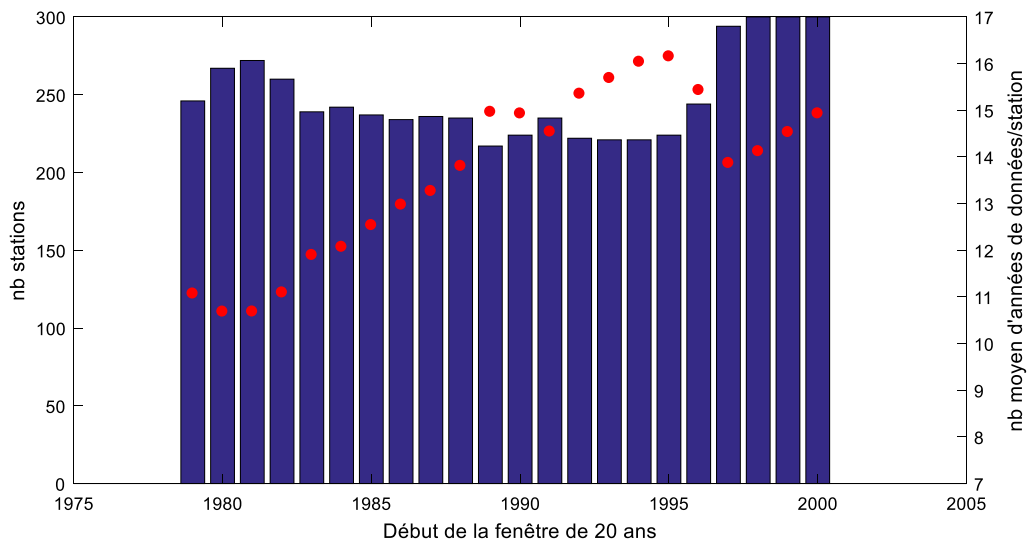


Figure 1. Nombre de stations retenues ayant au moins cinq ans de données (barres, axe vertical de gauche) et nombre moyen d'années de données par station (points rouges, axe vertical de droite) pour toutes les périodes de 20 ans entre 1979 et 2019. (Ce graphique inclut les stations de la BQMA situées dans le Saint-Laurent, mais exclut les stations de RivTemp.)

Les régimes thermiques ont aussi été caractérisés pour la période 1981-2000 pour permettre une éventuelle comparaison avec les régimes thermiques de 2000-2019, voire détecter une possible tendance ou un changement de régime (« saut » dans la valeur moyenne) pour certaines stations ou certaines régions. Le choix de la période 1981-2000 a été motivé par les mêmes deux premiers critères listés ci-haut, mais aussi de façon à uniformiser le nombre d'années par période et maximiser le nombre de stations retenues qui sont toujours actives pendant la période 2000-2019 (Figure 2 et Figure 3).

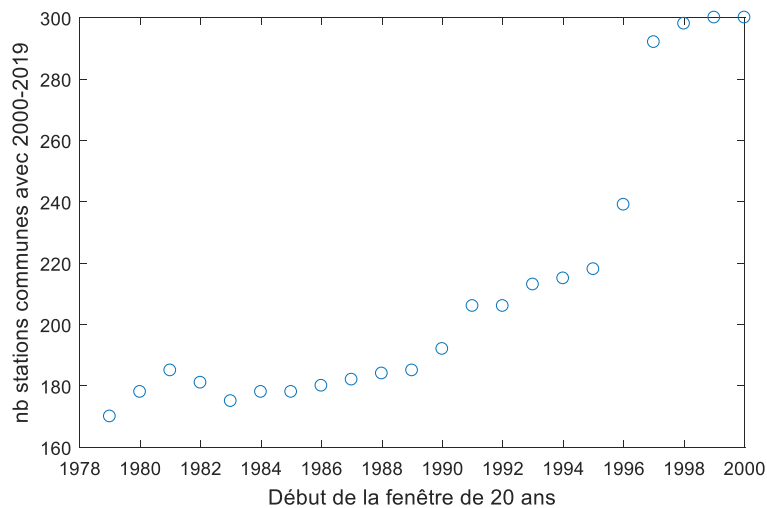


Figure 2. Nombre de stations retenues ayant au moins cinq ans de données dans la période de 20 ans débutant l'année indiquée en abscisse, et étant toujours actives pendant la période 2000-2019. (Ce graphique inclut les stations de la BQMA situées dans le Saint-Laurent, mais exclut les stations de RivTemp.)

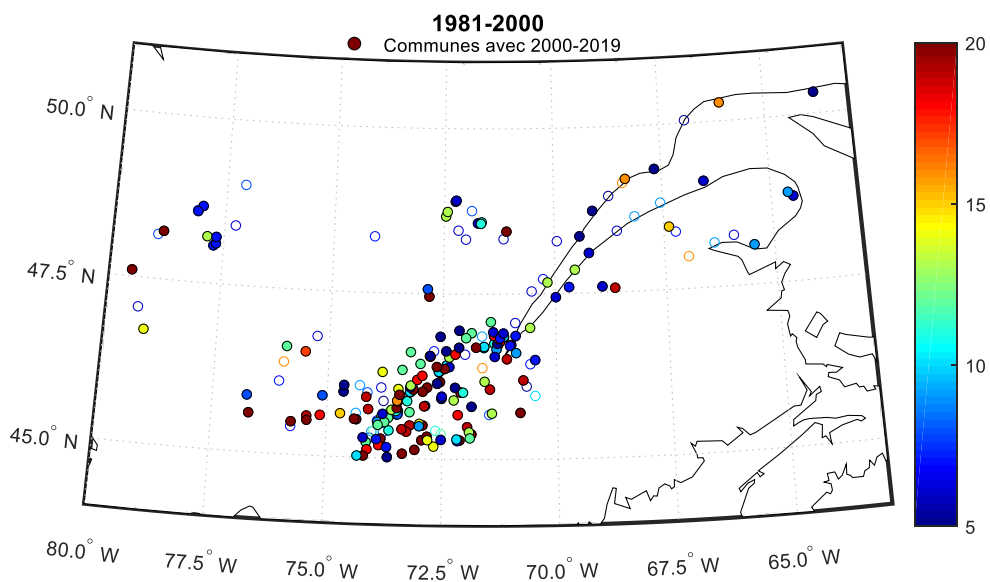


Figure 3. Stations actives pendant au moins cinq ans entre 1981 et 2000. Les couleurs réfèrent au nombre d'années de données disponibles entre 1981 et 2000, et les symboles pleins identifient les stations qui sont aussi actives pendant au moins cinq ans dans la période 2000-2019. (Ce graphique inclut les stations de la BQMA situées dans le Saint-Laurent, mais exclut les stations de RivTemp.)

2.2 GROUPEMENT DES STATIONS À PARTIR DES CARACTÉRISTIQUES PHYSIQUES DE LEUR BASSIN

2.2.1 Méthode d'agrégation hiérarchique (Hierarchical Clustering)

La méthode d'agrégation hiérarchique (HCA : Hierarchical Cluster Analysis) a été appliquée pour identifier les groupes homogènes en tenant compte de la variabilité intrinsèque des caractéristiques physiques des bassins versants. La méthode d'agrégation hiérarchique est une technique statistique de groupement des observations en ensembles relativement homogènes sur la base de leurs similarités pour des caractéristiques sélectionnées. L'identification des groupes se fait en utilisant un algorithme qui débute avec chaque observation dans un groupe (cluster) séparé et qui combine les groupes jusqu'à ce qu'il n'en reste qu'un.

La méthode d'agrégation choisie est la méthode de Ward (algorithme de variance minimale). La mesure de dissimilarité utilisée est la distance euclidienne. Le tout a été effectué à l'aide de la fonction *cluster* de Matlab (R2020b).

2.2.2 Sélection des stations pour les analyses de spatialisation

2.2.2.1 Identification des stations de débit de base et de température de l'eau (BQMA) pouvant être jumelées

La sélection des stations pour les analyses combinant le débit de base et la thermie repose sur le croisement spatial des stations de débit de base et de température de l'eau. Le MELCC a réalisé les calculs de l'indice de débit de base pour 197 stations (stations BFI) de 130 rivières du sud du Québec, selon la méthode hydrologique d'ajustement du BFI_{max} (Poirier, 2012).

Parmi les 197 stations BFI, 105 ont pu être jumelées avec une des 265 stations de la BQMA (stations Teau) retenues pour la période 2000-2019 (34 sont situées dans le fleuve St-Laurent et n'ont pas été considérées dans le reste de l'analyse). Les stations BFI jumelées sont distribuées sur des bassins et sous bassins de tailles variées. Le secteur au sud du St-Laurent est davantage représenté (Figure 4).

La distance entre les deux stations jumelées varie entre 0 km et plus de 50 km (distance euclidienne). La majorité des stations Teau sont situées entre 0 et 3 km d'une station BFI. 74 % des stations sont à moins de 9 km et 10 % à plus de 15 km; deux stations sont séparées de plus de 50 km (Figure 5). Une seule station Teau a été associée à chaque station BFI. Certaines stations Teau sont toutefois associées à plus d'une station BFI. Ainsi, 84 stations Teau sont associées à une seule station BFI, 17 stations sont associées à deux stations BFI et deux stations Teau sont associées à trois stations BFI. La position de la station BFI sert de base pour caractériser les bassins versants amont.

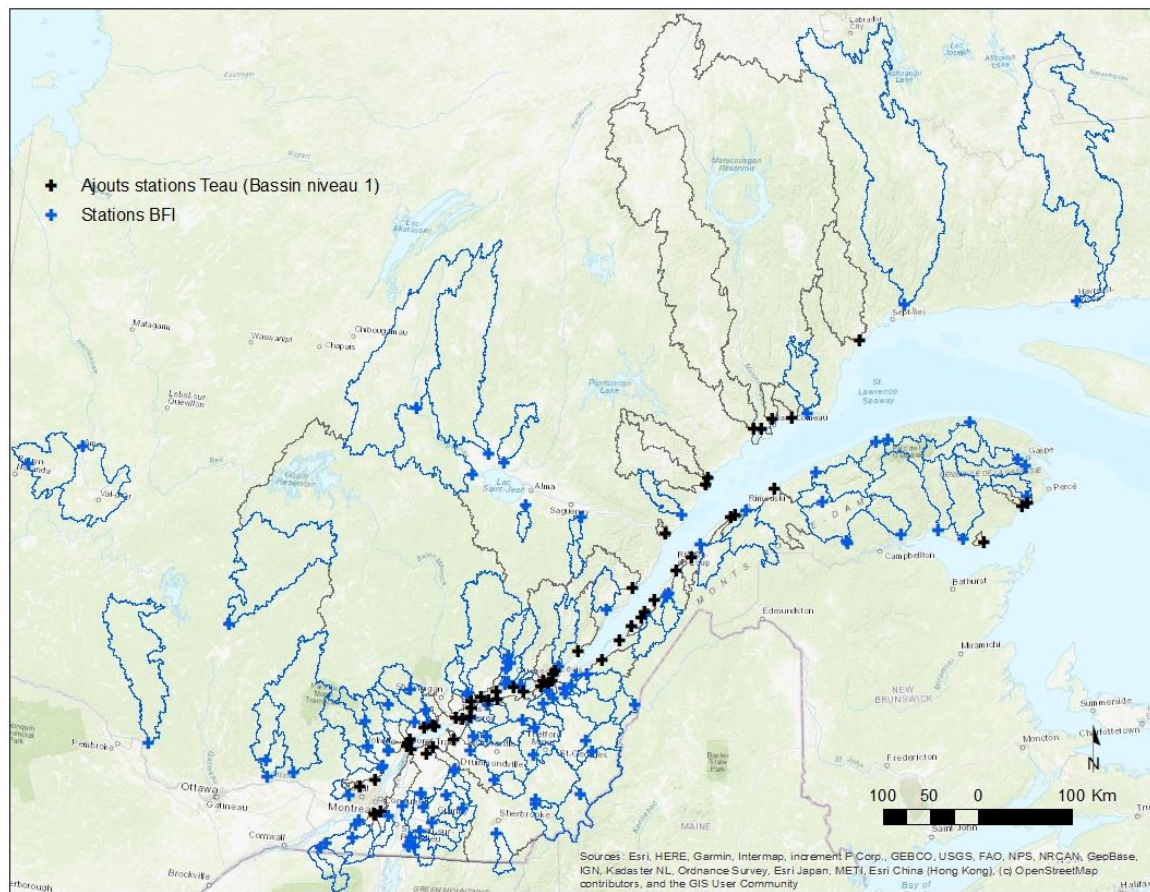


Figure 4. Carte des stations et bassins versants étudiés

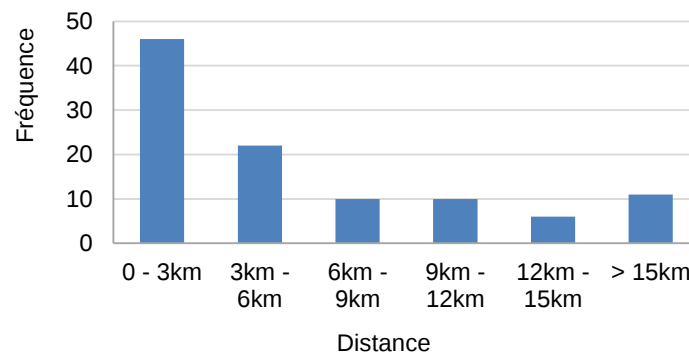


Figure 5. Histogramme des distances entre les stations Teau et les stations BFI associées

Tableau 1. Liste des variables physiques présélectionnées pour les analyses de groupement des stations.

Variables de surface	Aire BV : l'aire du bassin (en amont des stations)
	%Aire Lacs : ratio entre l'aire totale des lacs et de l'aire du bassin versant
	%Veget_code_i : ratio entre l'aire des surfaces couvertes par différentes classes de végétation et l'aire du bassin (codes : conifères, feuillus et culture sont retenus)
	%Dépôts_code_i : ratio entre l'aire des surfaces couvertes par différentes classes de dépôts de surface.
Variable géologique	%Géologie_code_i : ratio entre l'aire des surfaces couvertes par différentes classes de géologie.
Variable topographique	Elev. moy. BV : élévation moyenne du bassin
	Elev. Station : élévation de la station
Variables de localisation	Longitude et XCcentroid : longitude de la station et du centroïde du bassin
	Latitude et Ycentroid : latitude de la station et du centroïde du bassin
Variable d'énergie	Pente : pente moyenne du terrain dans la région proximale de la station (Buffer 10 km)

Tableau 2. Étendues des valeurs des variables les mieux corrélées avec le paramètre a et sélectionnées pour les analyses de groupement des stations (161 stations/BV).

Variables (et niveau de caractérisation : BV ou Buffer)	Coefficient de corrélation avec paramètre a (p<0,01)	Max	Min	Moyenne
BV_ElevMoy (m)	-0,35	728,81	15,83	289,07
BV_Ratiov_conifere (%)	-0,53	0,78	0,00	0,17
BV_Ratiov_feuillus (%)	0,50	0,47	0,01	0,20
Latitude (station)	-0,67	50,3525	45,0506	46,8999
Longitude (station)	-0,65	-63,6186	-78,8544	-71,2624
BV_Ratio_Alteration_versants (%)	-0,39	1,00	0,00	0,09
Buffer_Ratiov_terres cultivées (%)	0,54	0,93	0,00	0,33
Buffer Ratio Moraine de fond (épais) remaniée (%)	0,18	0,39	0,00	0,02
Buffer_Ratio Glacio-marin (calme) (%)	0,32	1,00	0,00	0,17
Buffer Ratio_Alteration_versants	-0,35	1,00	0,00	0,08
Buffer_Pente (m/m)	-0,62	12,63	0,24	3,28

Tableau 3. Étendues des valeurs des variables les mieux corrélées avec le BFI et sélectionnées pour les analyses de groupement des stations (105 stations).

Variables (et niveau de caractérisation : BV ou Buffer)	Coefficient de corrélation avec l'index BFI ($p < 0,01$)	Max	Min	Moyenne
BV YCentroid	0,44	51,74	44,87	46,86
BV_ElevMoy (m)	0,37	728,81	45,05	318,08
1AER : Moraine de fond (épais) remaniée	-0,35	1,0	0,0	0,21
Buffer_Ratio_v_terres cultivées (%)	-0,44	0,93	0,0	0,31
Buffer_Pente (m/m)	0,40	12,63	0,24	3,64

3 RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 CARACTÉRISATION DES RÉGIMES THERMIQUES

Les nombres de stations retenues dans chacune des deux bases de données et pour chacune des deux périodes sont résumés dans le Tableau 4.

Tableau 4. Caractéristiques des séries retenues pour les périodes 2000-2019 et 1981-2000. Seules les stations avec des séries comptant au moins cinq ans de données et au moins 40 mesures pour la BQMA sont comptabilisées.

Période	2000-2019	1981-2000
Nb de stations	299	223
Nb moyen d'années/station	15	12
Nb stations communes avec 2000-2019	299	169

3.1.1 Ajustement du modèle gaussien aux données des stations de la BQMA

Le modèle gaussien a été ajusté sur les données des stations de la BQMA disposant d'au moins 40 mesures acquises sur une période d'au moins cinq années, et ce, sur les périodes 2000-2019 et 1981-2000. La station retenue disposant du plus petit nombre de mesures dans la période 2000-2019 est la 01010002 (La Grande Rivière à la hauteur de la prise d'eau, rive gauche 1,5 km en amont du pont-route 132 à Grande-Rivière; 45 mesures sur six ans entre 2014 et 2019), et celle ayant le plus de données est la 03040010 (Richelieu 125 m en amont du barrage Fryer, rive droite, en aval de Saint-Jean-sur-Richelieu; 234 mesures sur les 20 ans) (Figure 7).

Les lignes pointillées sur les figures représentent l'intervalle de confiance sur les prédictions de l'ajustement. Cet intervalle de confiance est relatif à l'ajustement du modèle sur les données disponibles ; *il ne s'agit donc pas de l'intervalle de confiance sur la forme du régime thermique moyen interannuel*, puisqu'aucune notion de la variabilité interannuelle n'est prise en compte.

Les valeurs minimale et maximale obtenues pour le paramètre a sur la période 2000-2019 sont de $14,6^{\circ}\text{C}$ et $26,1^{\circ}\text{C}$, pour les stations 01120005 (Nouvelle au pont de la route de Miguasha (pont Kearney) à Nouvelle) et 04320006 (Des Mille Îles à l'usine de filtration de Sainte-Thérèse à 100 m en amont du pont-route 117), respectivement (Figure 8).

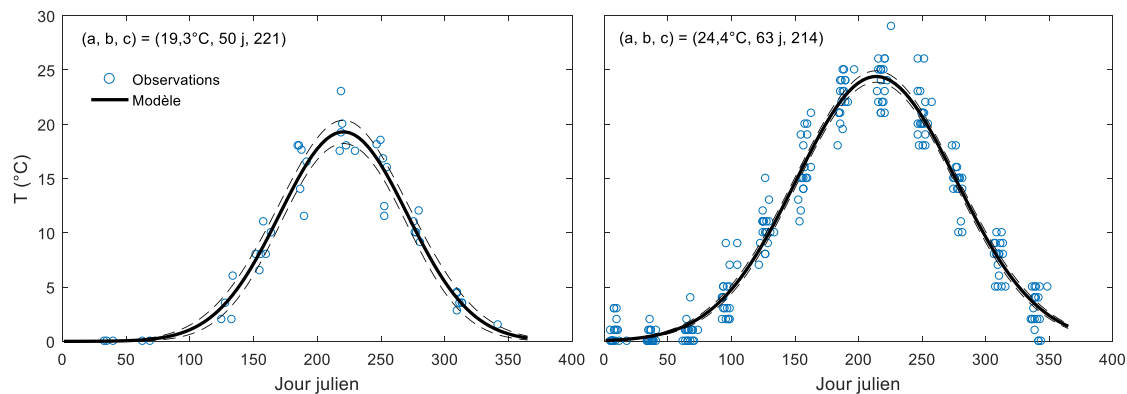


Figure 7. De gauche à droite : ajustements du modèle gaussien sur les données 2000-2019 des stations 01010002 (La Grande Rivière à la hauteur de la prise d'eau, rive gauche 1,5 km en amont du pont-route 132 à Grande-Rivière; 45 mesures sur six ans entre 2014 et 2019), et 03040010 (Richelieu 125 m en amont du barrage Fryer, rive droite, en aval de Saint-Jean-sur-Richelieu; 234 mesures entre 2000 et 2019).

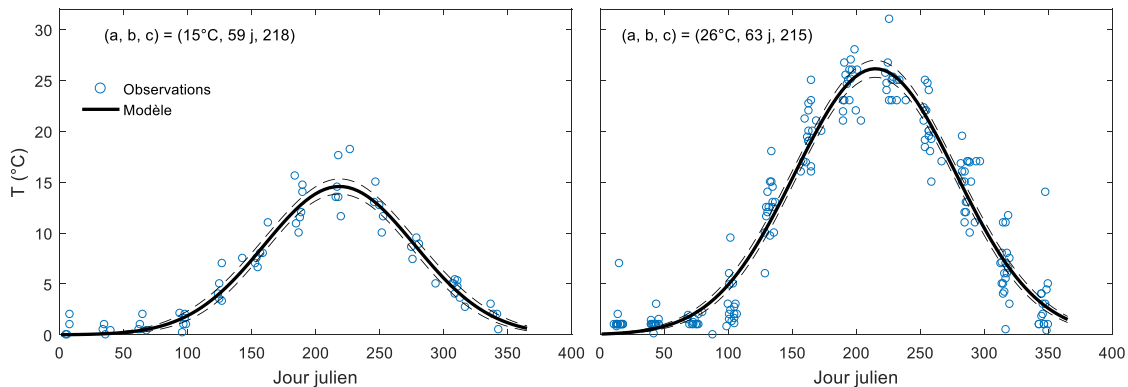


Figure 8. De gauche à droite : ajustements du modèle gaussien sur les données 2000-2019 des stations 01120005 (Nouvelle au pont de la route de Miguasha (pont Kearney) à Nouvelle) et 04320006 (Des Mille Îles à l'usine de filtration de Sainte-Thérèse à 100 m en amont du pont-route 117).

3.1.1.1 Caractérisation des régimes thermiques de l'ensemble des stations

Les valeurs des paramètres du modèle gaussien ont été estimées pour l'ensemble des stations retenues de la BQMA et pour les périodes 1981-2000 et 2000-2019. Les valeurs obtenues pour la période 2000-2019 sont représentées spatialement aux figures Figure 9 à Figure 11 (et à la section suivante pour une sélection de stations). La Figure 12 montre les changements du paramètre a entre la période 2000-2019 et la période 1981-2000 pour les stations ayant 5 ans et plus et 40 mesures et plus dans les deux périodes. L'histogramme de ces différences indique que pour la majorité des stations, l'estimation du paramètre a varie de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ entre les deux périodes. Pour 72 des 144 stations, la différence est supérieure à $0,5^{\circ}\text{C}$ et pour 39 stations la différence est inférieure à $-0,5^{\circ}\text{C}$.

La variabilité interannuelle du régime thermique à chaque station a été évaluée par la moyenne des écarts-types mensuels interannuels de la température pour les quatre mois des plus chauds de l'année. Pour ce faire, on a calculé l'écart-type interannuel des températures mesurées un même mois, et fait la moyenne de ces écarts-types mensuels entre juin et septembre inclusivement. Ces calculs ont été faits lorsque le nombre de mesures mensuelles était d'au moins cinq ans pour chacun de ces quatre mois. Les observations suggèrent que la variabilité interannuelle est similaire (écarts $\pm 0,5$) entre la période 1981-2000 et la période 2001-2019, pour 56% des stations (76/135) (Figure 14). La variabilité est toutefois inférieure au cours de la période la plus récente (écart $< -0,5$) pour 39% des stations (52/135). La Figure 15 montre les valeurs des paramètres et de la variabilité interannuelle obtenues pour l'ensemble des stations (BQMA et RivTemp) et pour les deux périodes considérées. La Figure 16 montre la distribution spatiale de la variabilité des températures des mois juin à septembre pour les périodes 2000-2019.

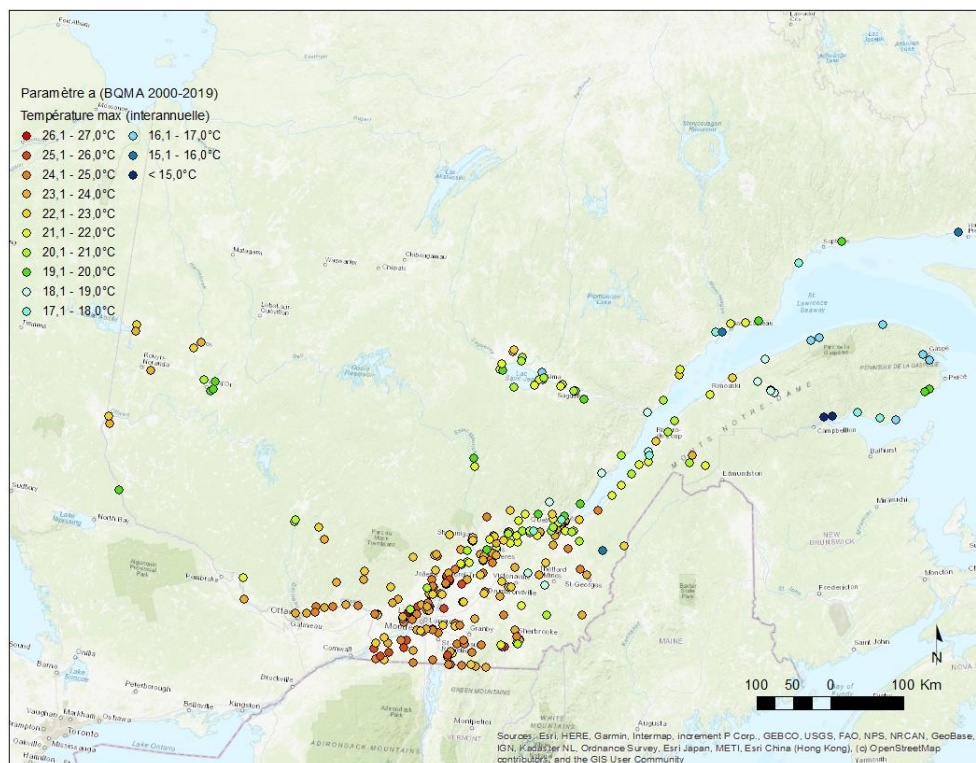


Figure 9. Valeurs estimées du paramètre *a* dans l'espace géographique pour les périodes 2000-2019 (299 stations de la BQMA). Les valeurs sont affichées par classes de 1°C.

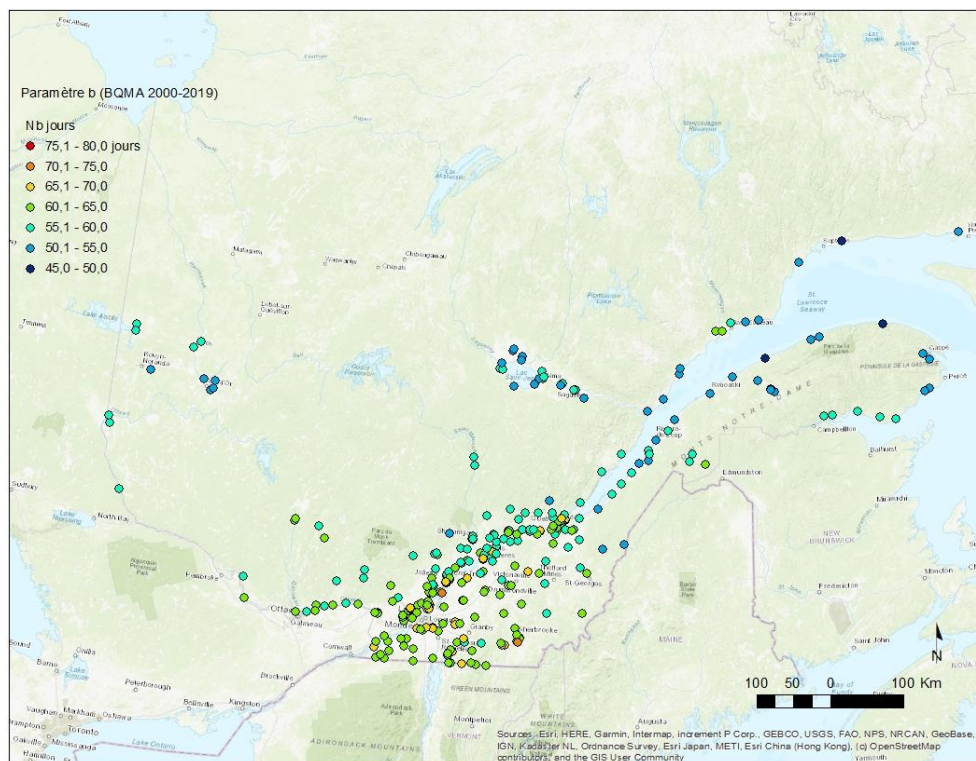


Figure 10. Valeurs estimées du paramètre *b* dans l'espace géographique pour les périodes 2000-2019 (299 stations de la BQMA). Les valeurs sont affichées par classes de 5 jours.

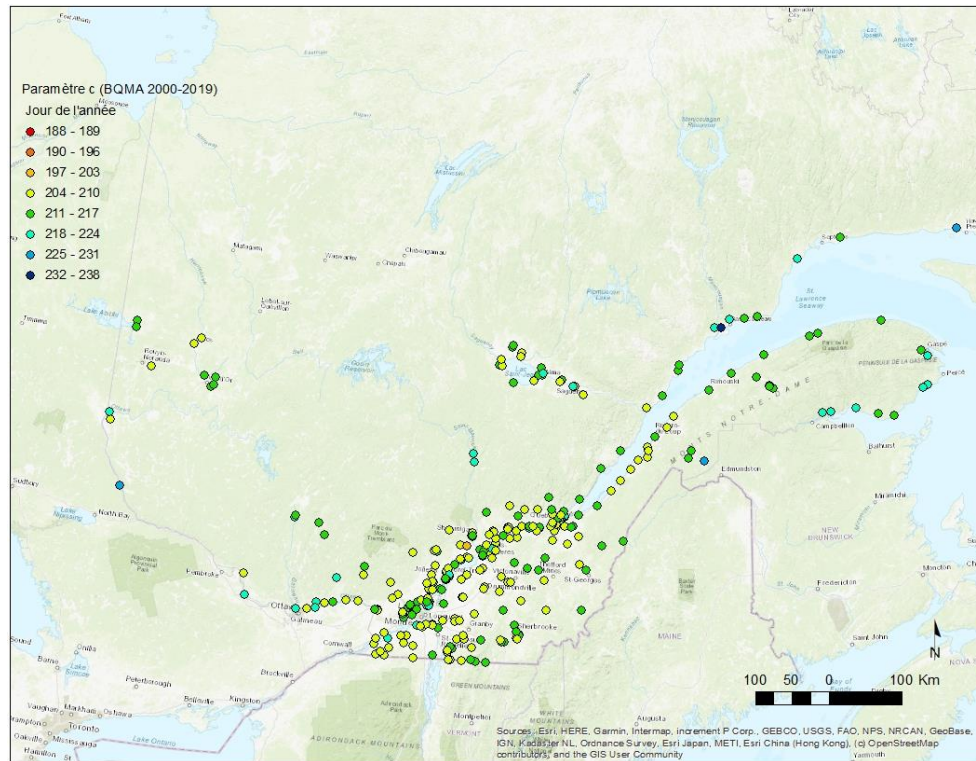


Figure 11. Valeurs estimées du paramètre c dans l'espace géographique pour les périodes 2000-2019 (299 stations de la BQMA). Les valeurs sont affichées par classes de 7 jours.

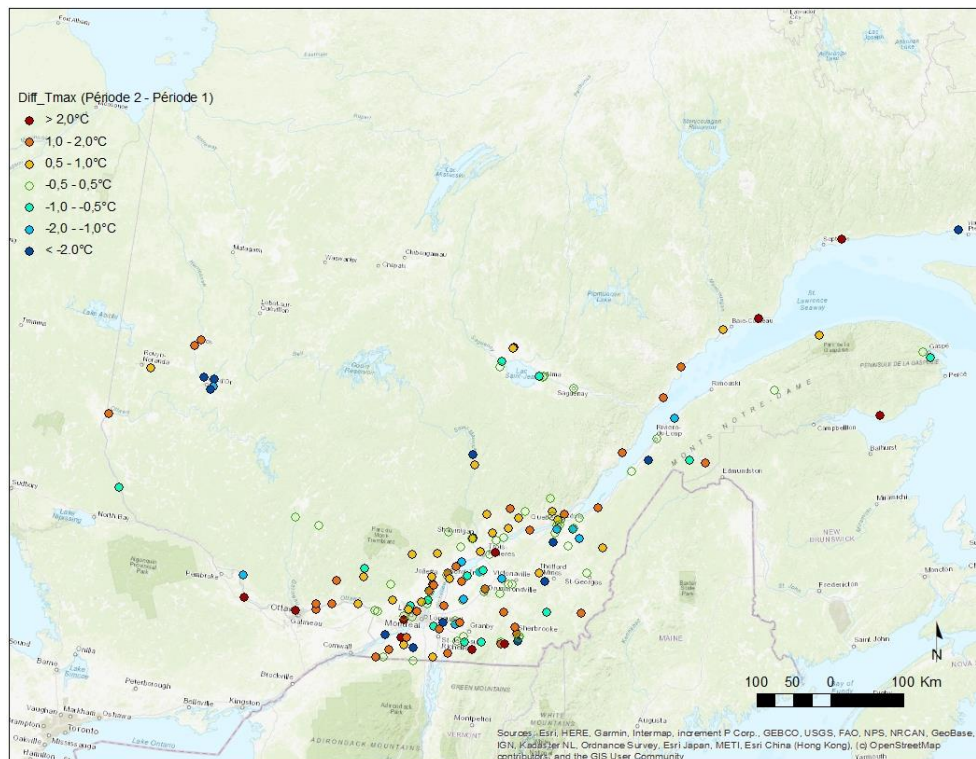


Figure 12. Différence du paramètre a entre la période 2000-2019 et 1981-2000 (144 stations ayant 5 ans et plus et 40 mesures et plus).

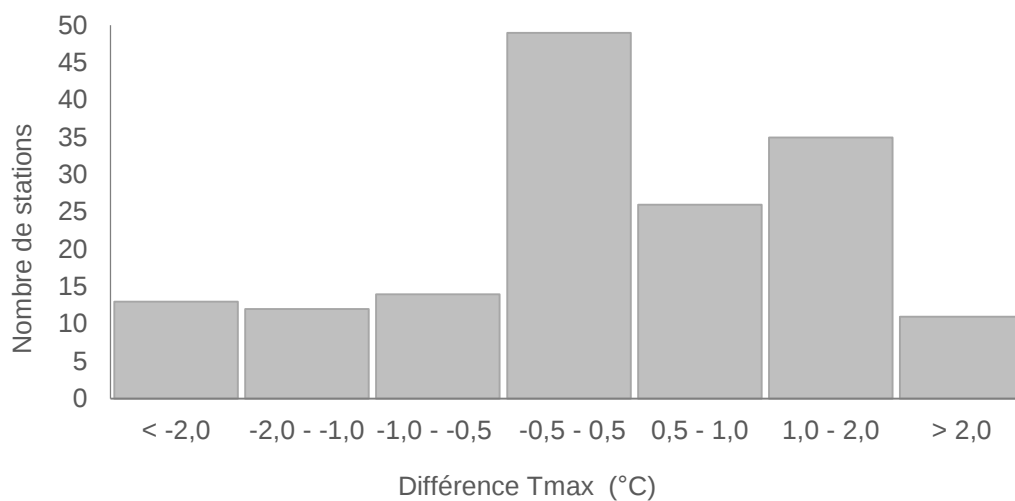


Figure 13. Histogramme des différences du paramètre a entre la période 2000-2019 et 1981-2000 (144 stations ayant 5 ans et plus et 40 mesures et plus).

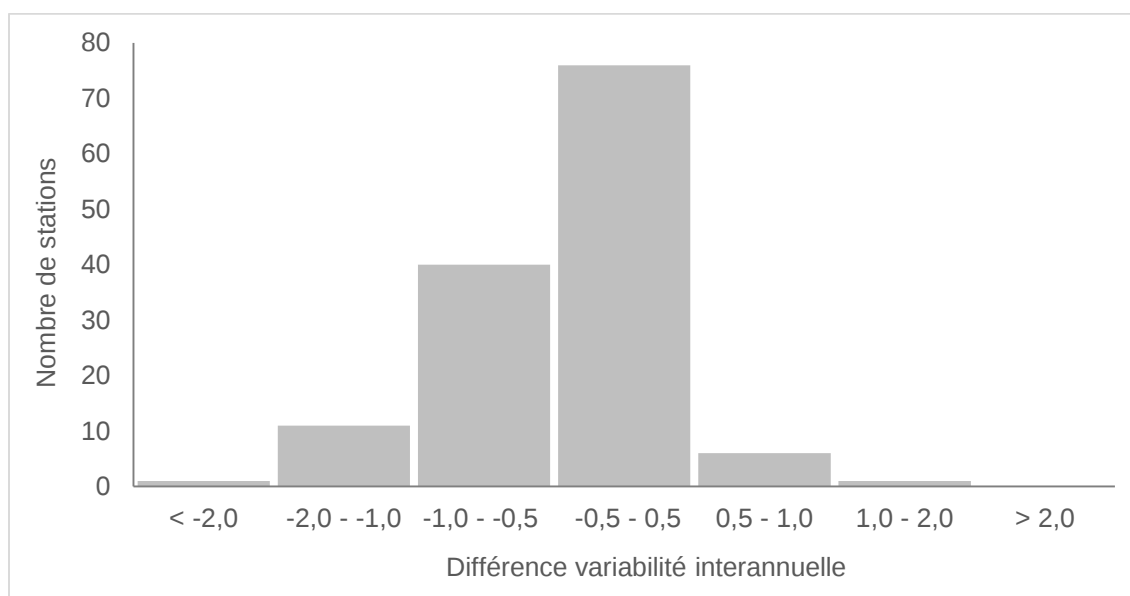


Figure 14. Histogramme des différences de l'écart-type moyen juin-sept entre la période 2000-2019 et 1981-2000 (135 stations).

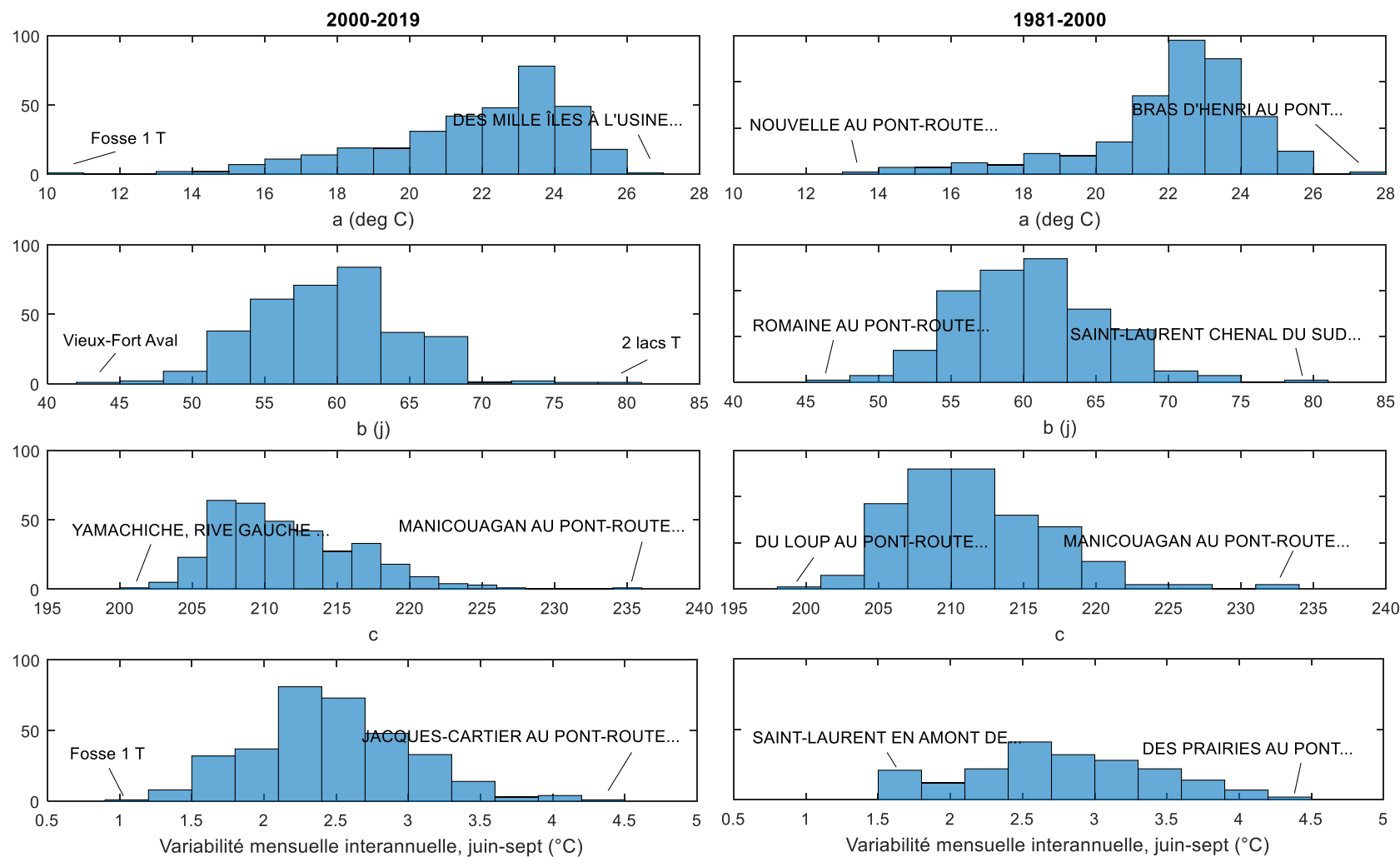


Figure 15. Valeurs des paramètres et de la variabilité interannuelle obtenues pour l'ensemble des stations (BQMA et RivTemp) et pour les deux périodes considérées.

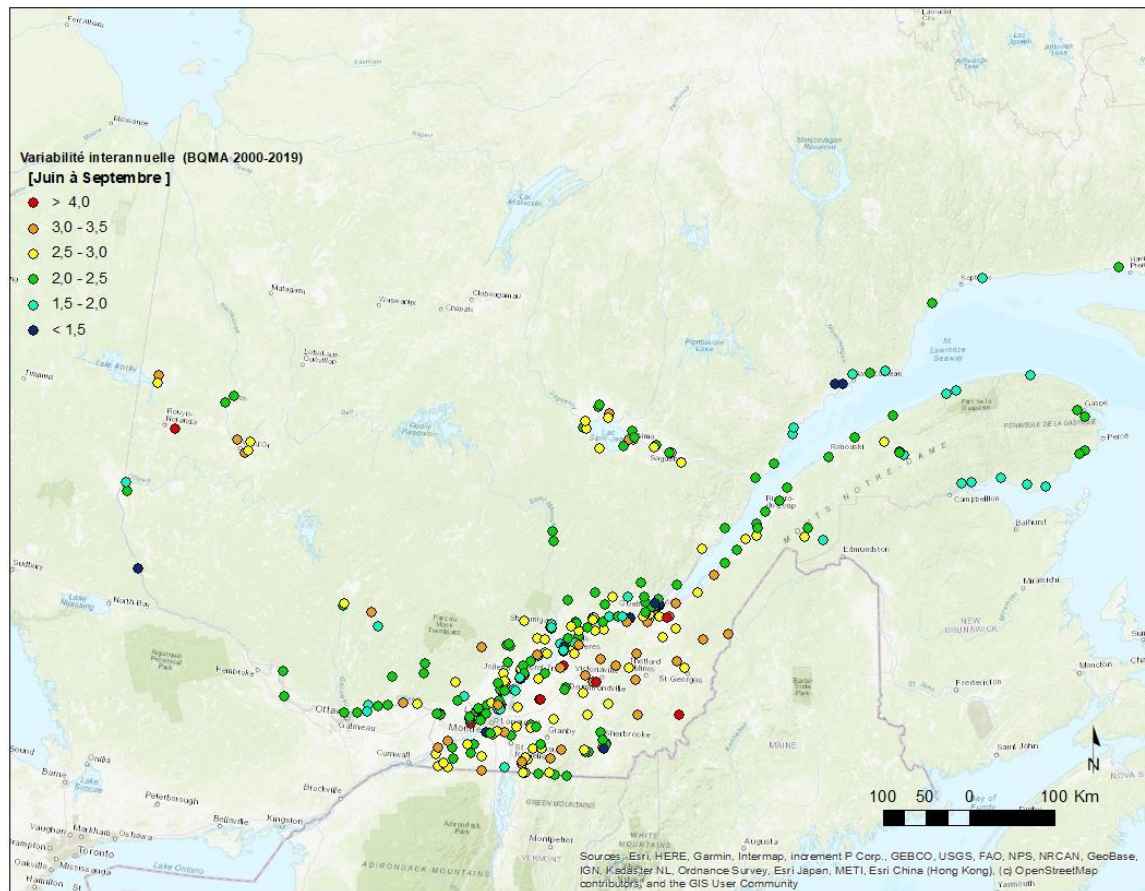


Figure 16. Écart-type mensuel interannuel moyen des températures des mois juin à septembre pour les périodes 2000-2019. Les valeurs sont présentées par classe de 0,5°C.

3.2 SPATIALISATION DE LA TEMPÉRATURE MAXIMALE INTERANNUELLE

La caractéristique thermique retenue pour la définition de l'indice de sensibilité aux prélèvements d'eau est le paramètre a du modèle gaussien (équation 1). En effet, ce paramètre peut être directement interprété comme une mesure interannuelle du maximum annuel du régime thermique et semble donc tout indiqué pour mesurer la sévérité d'un épisode de stress thermique pour les organismes aquatiques. De plus, les analyses préliminaires ont révélé que ce paramètre est celui qui est le mieux estimé par l'ajustement du modèle gaussien sur des séries de plus de cinq années de données. Afin d'être le plus représentatif possible des conditions de thermie actuelles, l'exercice de la spatialisation de la thermie s'est concentré sur la distribution spatiale du paramètre a estimé pour les stations de la BQMA ayant des données pour la période 2000-2019. Les valeurs obtenues pour les autres paramètres sont toutefois fournies en annexe.

Dans cette section, la spatialisation est faite pour la sélection de stations décrite à la section 2.2.2.

3.2.1 Classement par la méthode d'analyse des regroupements d'ArcGIS basé sur la valeur du paramètre a (sélection de stations)

L'outil d'analyse des regroupements (« grouping analysis ») de ArcGIS a été utilisé pour créer des groupes basés uniquement sur la valeur estimée du paramètre a . Cet outil permet de passer de la représentation spatiale pour l'ensemble des stations (Figure 9), à un regroupement en 4 groupes définis uniquement à partir de la valeur de a . La représentation ainsi obtenue permettra par la suite de comparer les groupements obtenus à l'aide des prédicteurs physiques (section suivante).

L'outil a été utilisé sans contraintes spatiales, ainsi aucune contrainte de contiguïté ni autres critères de proximité aux groupes créés n'a été imposé. Le nombre de groupes choisi pour faire le groupement a été fixé à quatre, tel que fixé avec la méthode de classification ascendante hiérarchique utilisée pour le groupement par prédicteurs physiques (section 2.2.3). Les valeurs initiales de classement sont obtenues à partir de la méthode d'initialisation « *FIND_SEED_LOCATIONS* », laquelle effectue une sélection aléatoire de la première valeur initiale et s'assure par la suite que les valeurs initiales suivantes représentent des entités qui sont éloignées les unes de autres dans l'espace des données. L'association aux groupes est déterminée par la distance euclidienne dans l'espace des données (calculée uniquement avec les valeurs du paramètre a). La Figure 17 montre les groupements obtenus en intégrant l'ensemble des données des 161 stations Teau de la période 2000-2019 retenues pour les analyses. Tel que vu à la Figure 9, la distribution spatiale des stations les plus chaudes et les plus froides suit un patron cohérent, les stations froides étant localisées principalement en Gaspésie et sur la Côte Nord. Les classes intermédiaires n'ont cependant pas de patron spatial évident.

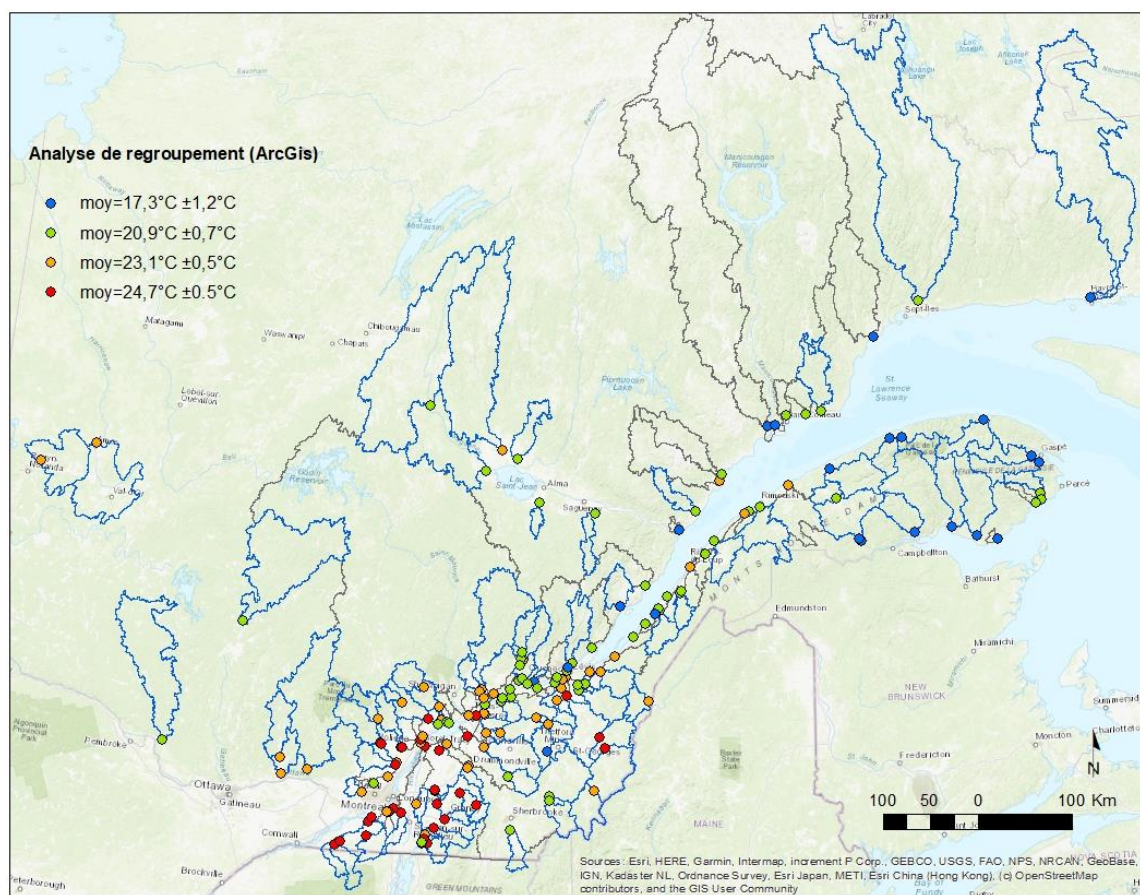


Figure 17. Classification de la valeur du paramètre a estimé à chaque station à l'aide de la méthode d'analyse des regroupements d'ArcGIS.

3.2.2 Groupements homogènes de stations en fonction des caractéristiques des bassins

La Figure 18 montre la distribution spatiale des 161 stations selon le classement obtenu à partir des prédicteurs physiques sélectionnés. Le patron spatial montre une cohérence spatiale par rapport à ce qui est attendu et connu, mais diffère un peu du patron obtenu par la méthode d'analyse des regroupements d'ArcGIS basé directement sur la valeur estimée du paramètre a , principalement pour les classes intermédiaires (Figure 17). Le résultat obtenu est par ailleurs plus homogène en utilisant les prédicteurs physiques. L'ajout d'une variable caractérisant les apports de sous-surfaces pourrait peut-être améliorer le classement de certaines stations. Cette variable n'a pas encore été identifiée ni estimée, car la disponibilité des données pour l'ensemble du territoire demeure incomplète pour l'instant.

Les astérisques noirs sur la Figure 18 indiquent les stations (13) dont la valeur estimée à la station est inférieure à la moyenne de son groupe de plus de $-2,3^{\circ}\text{C}$, tandis que les croix bleues indiquent celles (11 stations) dont la valeur à la station est supérieure de plus de $2,3^{\circ}\text{C}$. Le seuil de $2,3^{\circ}\text{C}$ correspond à l'écart-type maximal calculé pour chacun des groupes.

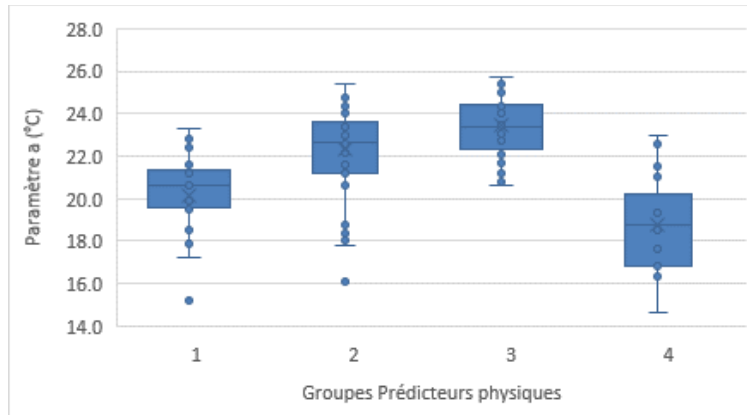


Figure 19. Diagramme en boîte des valeurs du paramètre a des stations pour les différents groupes basés sur les prédicteurs physiques (sans les doublons des stations BFI, soit 149 stations).

Tableau 5. Statistiques descriptives du paramètre a pour les différents groupes de stations Teau définis par les prédicteurs physiques (sans les doublons des stations BFI).

Groupe	N	moyenne	écart-type	min	max	médiane	centile 25%	centile 75%
1	26	20,2	2,1	15,2	23,3	20,7	19,6	21,4
2	66	22,3	1,9	16,1	25,4	22,7	21,2	23,6
3	38	23,4	1,5	20,6	25,7	23,3	22,3	24,5
4	19	18,8	2,3	14,6	23,0	18,8	16,9	20,3

Tableau 6. Écart-type mensuel interannuel moyen des températures des mois juin à septembre en fonction des groupes basés sur les prédicteurs physiques.

Groupe	N	moyenne	écart-type	min	max	médiane	centile 25%	centile 75%
1	27	2,4	0,6	1,3	4,4	2,4	2,1	2,6
2	73	2,6	0,7	0,0	4,2	2,7	2,3	3,0
3	43	2,6	0,4	2,0	3,8	2,5	2,3	2,9
4	18	1,8	0,7	0,0	2,5	2,0	1,6	2,3

Tableau 7. Comparaison de la moyenne du paramètre a entre des groupes basés sur les prédicteurs physiques

Groupe	Groupe	limites inf. (95% intervalle conf.)	différence entre moyenne des groupes	limites sup. (95% intervalle conf.)	p
1	2	-3,23	-2,15	-1,08	0,00000
1	3	-4,42	-3,24	-2,07	0,00000
1	4	0,02	1,44	2,87	0,04647
2	3	-2,01	-1,09	-0,17	0,01274
2	4	2,37	3,59	4,82	0,00000
3	4	3,37	4,68	6,00	0,00000

Le classement en quatre groupes de prédicteurs physiques permet une meilleure discrimination spatiale que les classements en deux ou trois groupes (Figure 20). Avec trois groupes, les stations de la rive nord se distinguent de celles de la Gaspésie, mais l'ensemble des stations du sud du Québec font partie du même groupe.

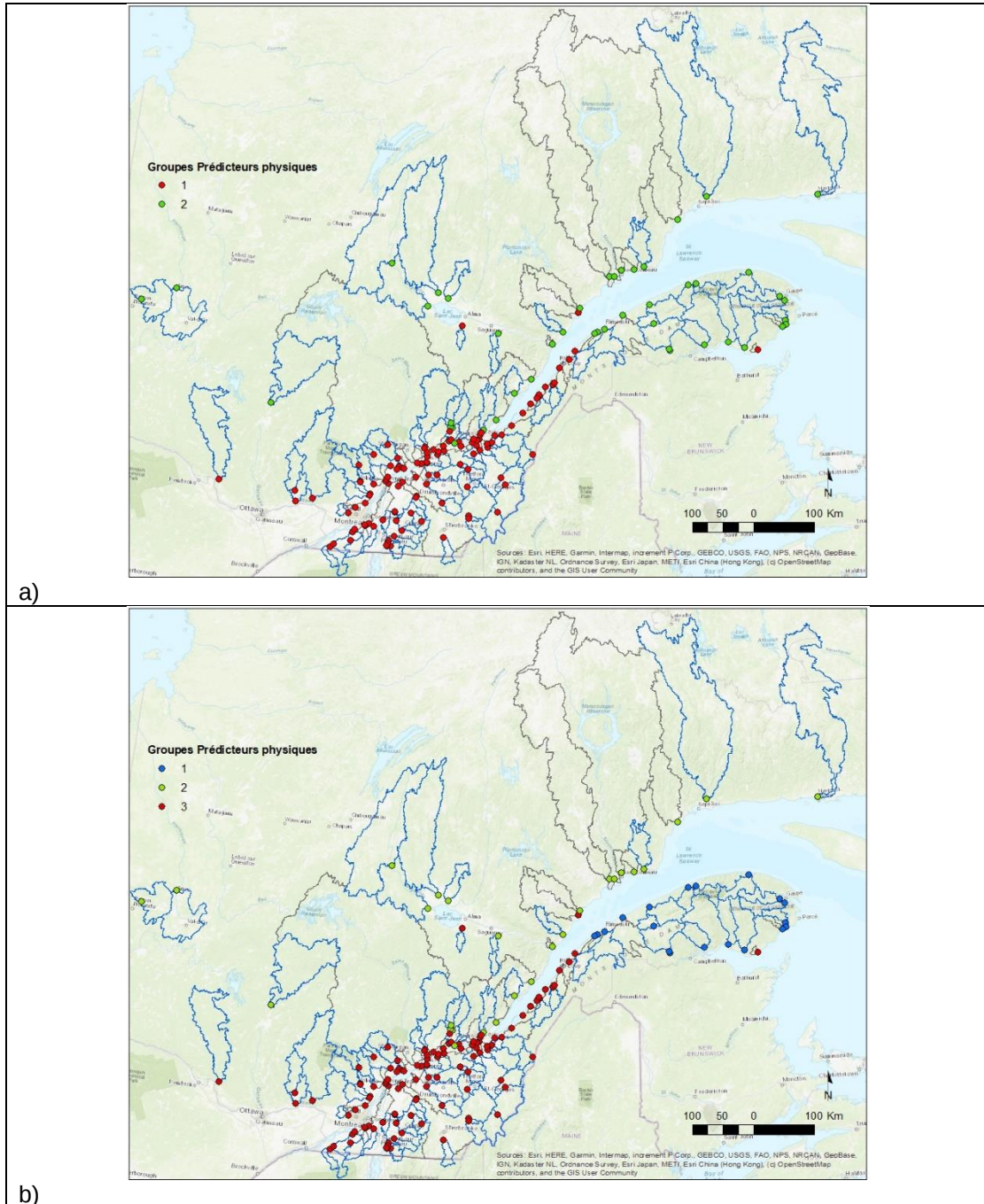


Figure 20. Représentation des stations en fonction d'une division en a) deux groupes ou b) trois groupes prédicteurs physiques.

3.3 SPATIALISATION DU BFI

3.3.1 Groupements homogènes de stations en fonction des caractéristiques physiques des bassins

La Figure 21 montre le classement en 4 groupes obtenu à partir des cinq prédicteurs physiques présélectionnés qui sont corrélés avec le BFI. Seules les 105 stations jumelées aux stations Teau ont été retenues pour cette analyse. La répartition spatiale montre une relative cohérence spatiale par rapport à ce qui est attendu et connu bien que le patron soit moins net que celui obtenu pour les températures moyennes maximales de l'eau (paramètre *a*).

Si on utilise la différence entre la valeur observée aux stations BFI et la moyenne du groupe prédicteur d'appartenance et un seuil de $\pm 0,15$ (écart-type maximum, observé pour le groupe 2) comme critères d'évaluation du classement, le classement serait moins bon pour 26 des 105 stations. Ces stations sont identifiées à la Figure 21 par un astérisque noir (diff. $< -0,15$) ou une croix bleue (diff. $> 0,15$). Les stations qui ont un BFI inférieur à la moyenne de leur groupe sont dans le groupe 2 (sept stations), dans le groupe 4 (neuf stations) et une seule dans le groupe 3. Les stations avec un BFI supérieur à la moyenne de leur groupe sont majoritairement dans le groupe 2 (six des huit stations).

Le diagramme en boîte (Figure 22) montre que l'indice estimé aux stations BFI est très variable dans chacun des groupes, particulièrement pour les groupes 2 et 4 qui ont des indices modérés. Les moyennes entre les groupes 1 et 2 et entre les groupes 3 et 4 ne sont pas significativement distinctes. Le groupement en trois groupes ne permet pas de réduire les ambiguïtés de classement ni l'utilisation ciblée d'une variable pour reclasser ces stations. L'utilisation d'un indice qualifiant les écoulements souterrains est envisagée dans une prochaine étude afin d'évaluer si le classement pourrait être amélioré. Ces données ne sont pas disponibles actuellement pour l'ensemble des stations étudiées.

Les bassins de niveau 1, qui n'ont pas de stations BFI à leur exutoire, ont aussi été classés en fonction des prédicteurs physiques importants pour le BFI et en utilisant les groupes formés précédemment à partir des 105 stations BFI. Le classement obtenu a été révisé pour trois grands bassins : St-Maurice, Manicouagan et Ouartardes dont la taille largement supérieure aux 105 autres bassins. Un critère de taille basé sur un l'aire du bassin (seuil : $\text{Log Aire} \geq 10$) a ainsi été appliqué. Sans ce réajustement, ces bassins sont classés dans le groupe 4. La Figure 23 montre le résultat du classement final et révisé pour ces trois bassins.

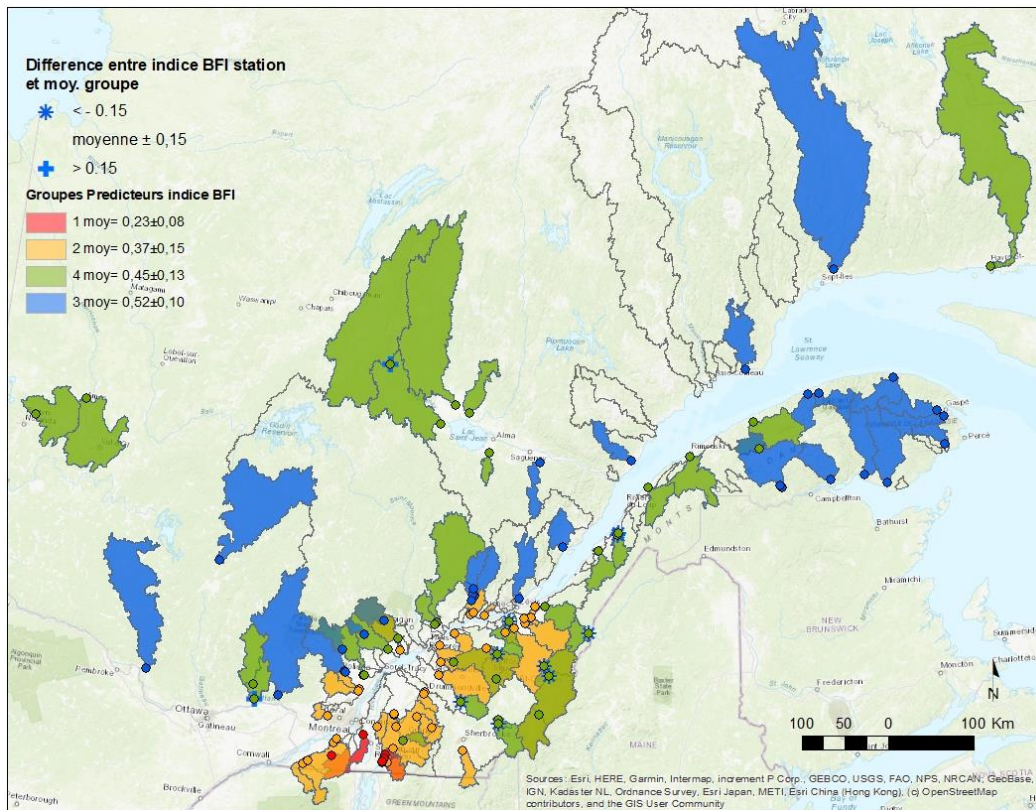


Figure 21. Groupements des 105 stations BFI en fonction des prédicteurs physiques (Tableau 3). Certains bassins sont superposés. Les astérisques bleus indiquent que la valeur BFI à la station est inférieure de plus de 0,15 (env. écart-type maximum observé) à celle de son groupe. Tandis que les croix bleues indiquent que la valeur est supérieure à 0,15 celle de son groupe.

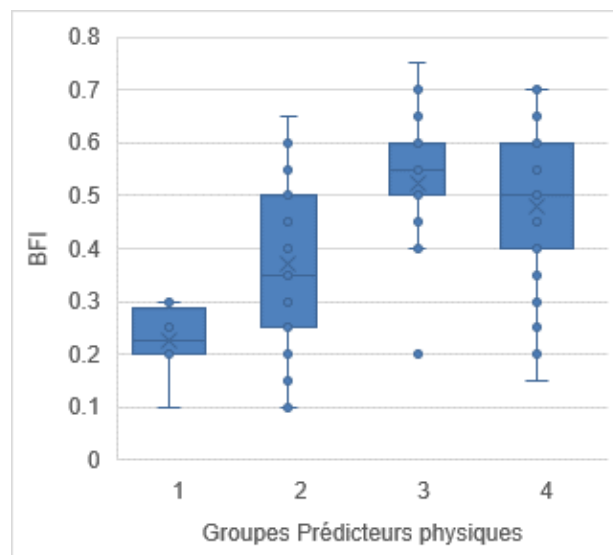


Figure 22. Diagramme en boîte des valeurs de l'index BFI des stations pour les différents groupes basés sur les prédicteurs physiques.

Tableau 8. Statistiques descriptives de l'index BFI pour les différents groupes de stations.

Groupe	N	moyenne	écart-type	min	max	médiane	centile 25%	centile 75%
1	6	0,23	0,08	0,10	0,30	0,23	0,20	0,29
2	33	0,37	0,15	0,10	0,65	0,35	0,25	0,50
3	29	0,52	0,10	0,20	0,75	0,55	0,50	0,60
4	37	0,48	0,15	0,15	0,70	0,50	0,35	0,56

Tableau 9. Comparaison de la moyenne de l'indice BFI entre des groupes basés sur les prédicteurs physiques.

Groupe	Groupe	limites inf. (95% intervalle conf.)	différence entre moyenne des groupes	limites sup. (95% intervalle conf.)	<i>p</i>
1	2	-0,30	-0,14	0,01	0,0786
1	3	-0,46	-0,30	-0,14	0,0000
1	4	-0,41	-0,25	-0,10	0,0002
2	3	-0,24	-0,15	-0,07	0,0001
2	4	-0,19	-0,11	-0,03	0,0049
3	4	-0,04	0,04	0,13	0,5446

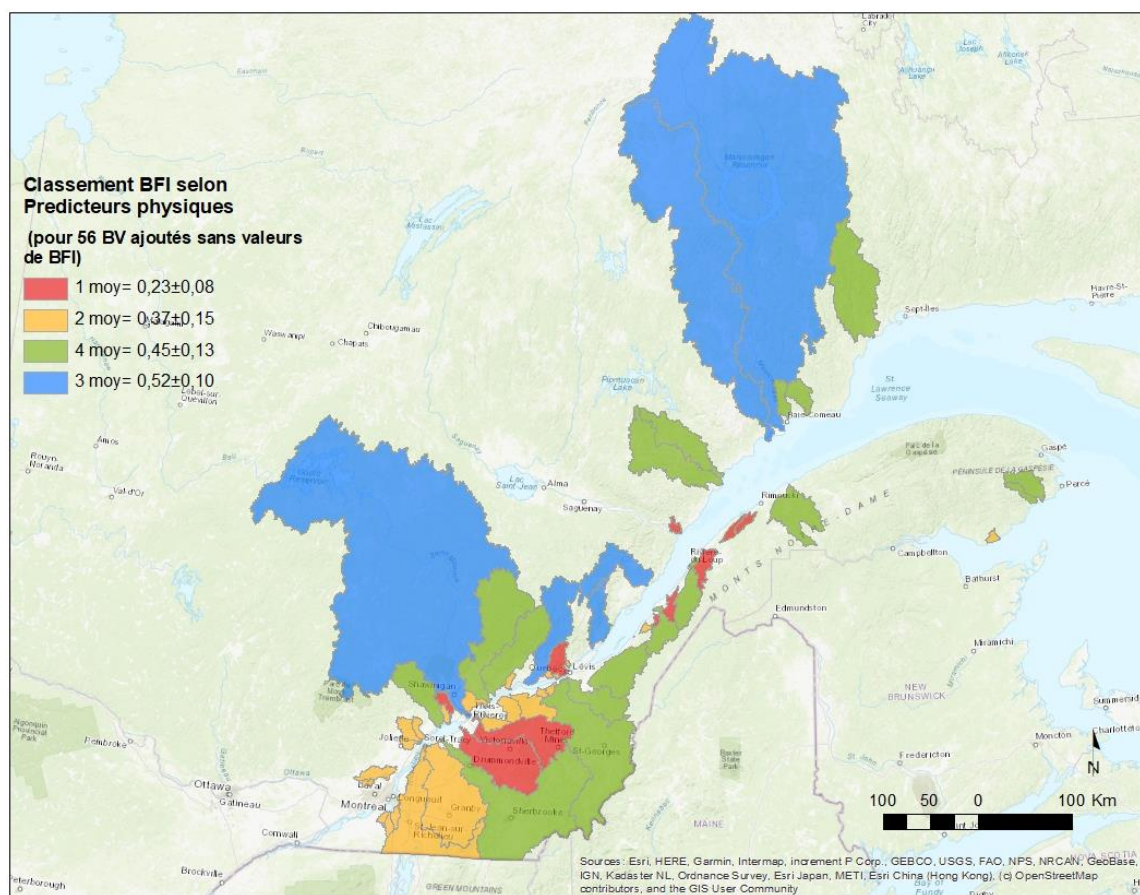


Figure 23. Groupements des bassins de niveau 1 en fonction des prédicteurs physiques importants pour le BFI.

3.4 INDICE COMBINÉ POUR CARACTÉRISER LA SENSIBILITÉ THERMIQUE AUX PRÉLÈVEMENTS D'EAU

Un indice a été créé à partir de la combinaison des groupements obtenus à partir des prédicteurs pour le paramètre α (indice thermique) et de ceux obtenus pour l'indice BFI. Cet indice combiné vise à caractériser la sensibilité thermique aux prélèvements d'eau. Pour réduire le nombre de classes de sensibilité à neuf classes, nous avons choisi de grouper certaines classes obtenues pour chacun des indices. Ainsi, les groupes BFI rassemblant les stations avec des valeurs moyennes de l'indice combiné (groupes 2 et 4) forment un seul groupe pour l'estimation de la sensibilité aux prélèvements d'eau. Pour l'indice thermique, ce sont les groupes représentant les stations avec des températures chaudes (groupes 2 et 3) qui sont rassemblés pour former un seul groupe pour l'estimation de la sensibilité. L'indice combiné s'étend de 1 : faiblement sensible car BFI est « élevé » et l'indice thermique est « froid » à 9 : fortement sensible car BFI est « faible » et l'indice thermique est « chaud » (Figure 10).

Tableau 10. Définition de l'indice combiné à partir des groupements des indices BFI et thermique.

	Classement de l'indice thermique (paramètre a)		
Classement de l'indice BFI	Froid (groupe Teau = 4) a ~ [17-20]°C	Tiède (groupe Teau = 1) a ~ [20-21]°C	Chaud (groupes Teau = 2 et 3) a ~ [21-24,5]°C
Élevé (groupe BFI=3) BFI~[0,5-0,6]	1	2	3
Moyen (groupes BFI=2 et 4) BFI~[0,25-0,56]	4	5	6
Faible (groupe BFI=1) BFI~[0,2-0,3]	7	8	9

La Figure 24 montre la distribution spatiale des indices combinés obtenus pour les 105 stations/bassins retenus pour l'étude. Certaines classes de sensibilité aux prélèvements d'eau ne sont pas représentées dans cet échantillon de stations/bassins retenus. Sur la carte, les astérisques et les croix sous les symboles indiquent que les valeurs estimées à la station sont inférieures ou supérieures à celles du groupe soit pour le BFI (en bleue) soit pour le paramètre a (en noire). Le classement de ces stations est par conséquent plus incertain. Tel que spécifié précédemment, les différences de $\pm 0,15$ pour l'indice BFI et de $\pm 2,3^{\circ}\text{C}$ par rapport à la moyenne du groupe sont considérées comme des classements moins bons. Ces seuils représentent les valeurs maximales des écarts-types dans les différents groupes.

La majorité des stations (62/105) sont représentées adéquatement en tenant compte de ces seuils. Le classement de 40% des stations est moins bon à cause de l'un ou l'autre des indices (paramètre a ou BFI). Seule la station 30420 sur la rivière Aux Brochets est mal classée autant pour le BFI que pour la température. Les classes de sensibilité intermédiaire (groupes 5 et 6) rassemblent proportionnellement le plus grand nombre de stations avec un moins bon classement. Les moins bons classements dans le groupe 6 sont dus à un moins bon classement de l'indice BFI, tandis que pour le groupe 5 ce sont des erreurs dans le classement thermique qui explique les moins bons résultats.

L'indice combiné a aussi été évalué pour les bassins versants de niveau 1 (Figure 25). Pour ces bassins, les erreurs de classement sur cet indice ne peuvent pas être évaluées puisque le BFI n'est pas disponible. Le classement de la sensibilité aux prélèvements d'eau d'au moins 9 bassins est moins bon en lien avec des erreurs dans le classement thermique.

Parmi l'ensemble des 161 stations caractérisées, 13 ont un indice combiné de 9 (faible et chaud) et 11 ont un indice combiné 1 (élevé et froid). Le Tableau 11 identifie ces stations.

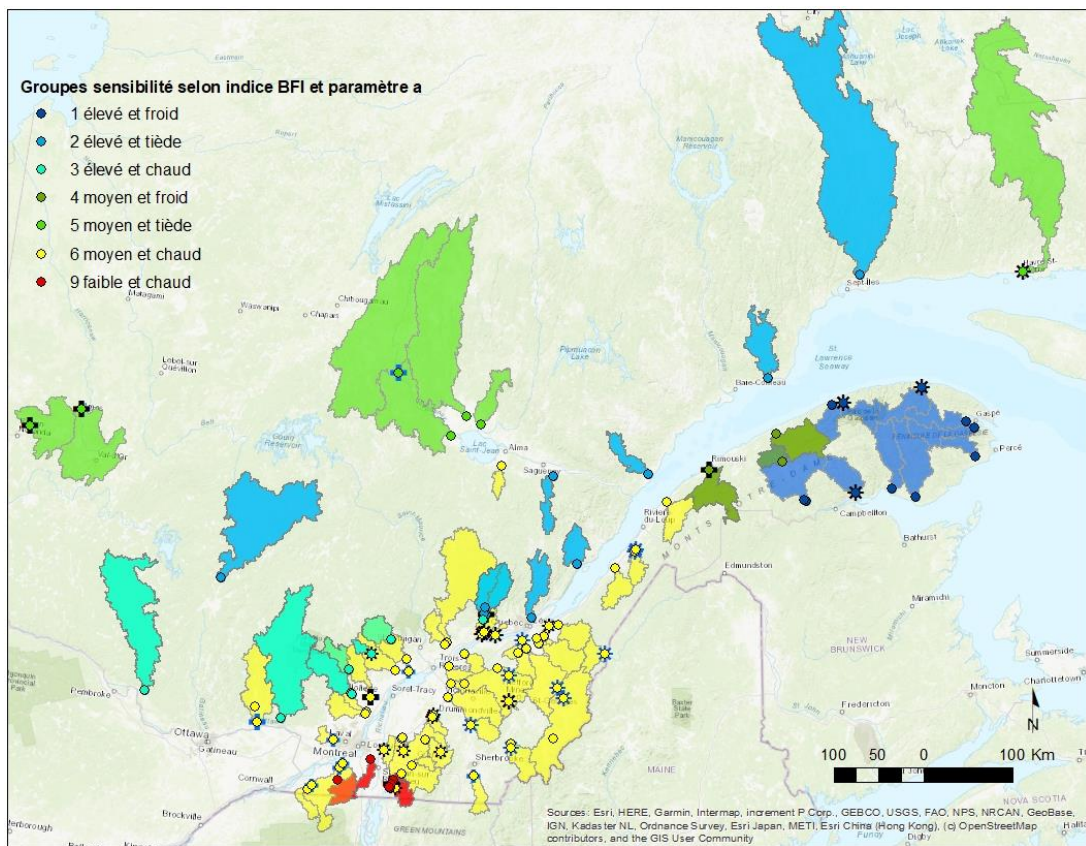


Figure 24. Indice combiné créé à partir de la combinaison des groupements obtenus à partir des prédicteurs pour le paramètre a et de ceux obtenus pour l'indice BFI (105 stations). Les astérisques et les croix sous les symboles indiquent que les valeurs estimées à la station sont inférieures ou supérieures à celles du groupe soit pour le BFI (en bleu) soit pour le paramètre a (en noir).

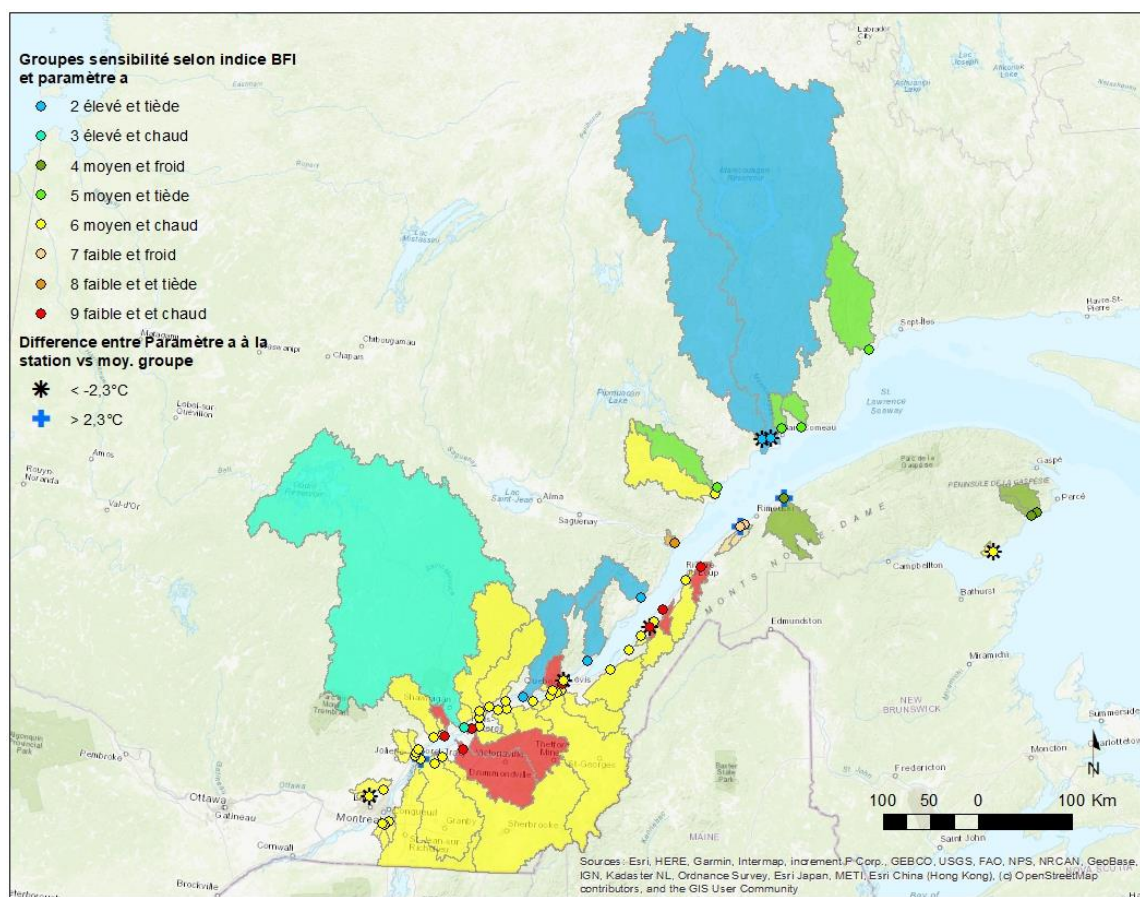


Figure 25. Indice combiné pour les 56 bassins de niveau 1, estimé d'après leurs caractéristiques physiques et les classements des indices thermiques et BFI.

Tableau 11. Liste des stations avec un indice combiné de 9 (faible et chaud) et de 1 (élevé et froid)

Indice combiné : 9 Faible et chaud		Indice combiné : 1 Élevé et froid	
Station	Rivière	Station	Rivière
5090017	Saint-Charles	11204	Nouvelle
5300004	Yamachiche	10101	La Grande Rivière
2240005	Verte	10801	Bonaventure
2260002	Kamouraska	10901	Petite rivière Cascapédia
2400004	Bécancour	20302	Saint-Jean
2540002	Saint-Jean	20401	York
3010008	Nicolet	20802	Madeleine
30424	Aux Brochets	21405	Sainte-Anne
30907	Des Anglais	21502	Cap-Chat
30421	L'Acadie	11509	Matapédia
30423	Morpions	11507	Matapédia
30426	Ewing		
30422	Au Castor		

3.5 CONTRIBUTION DE LA VARIABILITÉ DES RÉGIMES THERMIQUES À LA SENSIBILITÉ

Un aspect que le paramètre a ne permet pas de représenter est la variabilité interannuelle d'un régime thermique. Or, une rivière présentant une température maximale moyenne modérée, mais très variable d'une année à l'autre pourrait se retrouver très peu vulnérable aux prélèvements d'eau un été donné, mais beaucoup plus vulnérable l'été suivant.

La variabilité interannuelle du régime thermique à chaque station a été évaluée par la moyenne des écarts-types mensuels interannuels de la température pour les quatre mois des plus chauds de l'année, telle que décrite à la section 2.1. Le tableau 12 liste les stations dont la variabilité diffère de la moyenne des 161 stations analysées ($\text{moy} \pm 1\sigma$ soit $2,50 \pm 0,66$). 25 stations ont une plus forte variabilité que la moyenne (cellules en vert) et 11 une plus faible variabilité (cellules en grisée).

Tableau 12. Stations ayant une variabilité interannuelle (différente de la moyenne ($\pm 1\sigma$)).

Groupe Teau	a	Station	Rivière	Nb années	Nb mesures	Écart-type juin-sept	Indice combiné
2	22,7	13001	Daaquam	8	62	3,4	6
2	21,4	23002	Boyer Sud	7	57	3,3	6
2	23,0	23004	Boyer	7	59	3,2	6
2	23,5	23401	Beaurivage	20	196	3,3	6
2	23,1	23403	Chaudière	20	192	3,6	6
2	23,6	23432	Bras d'Henri	20	218	4,2	6
2	23,6	23902	Gentilly	15	156	3,2	6
2	23,3	24007	Bécancour	8	59	3,3	6
2	18,8	24013	Bécancour	20	226	3,2	6
2	23,3	24014	Bécancour	8	59	3,3	6
2	23,6	30103	Nicolet	20	180	3,5	6
2	20,7	30219	Au Saumon	20	227	3,3	6
2	20,7	30282	Au Saumon	20	227	3,3	6
3	24,2	30421	L'Acadie	12	117	3,2	9
3	25,7	30424	Aux Brochets	20	183	3,3	9
3	21,4	30426	Ewing	14	124	3,2	9
1	23,3	43012	Kinojévis	20	220	3,6	5
2	22,6	52201	L'Assomption	20	221	3,3	3
2	21,6	2290007	Trois-Saumons	8	66	3,2	6
2	22,6	2330001	Etchemin	20	225	3,3	6
2	21,3	2350003	Beaudet, Ruisseau	8	57	3,2	6
2	23,6	2390001	Gentilly	15	156	3,2	6
3	25,0	3010008	Nicolet	20	207	3,8	9
3	24,3	3070015	de la Tortue	12	103	3,2	6
1	21,6	5080006	Jacques-Cartier	9	99	4,4	2
4	18,8	11507	Matapédia	8	74	1,6	1
4	21,1	11508	Décharge du lac Matapédia	9	82	1,6	4
4	18,8	11509	Matapédia	8	74	1,6	1
4	16,3	20802	Madeleine	8	72	1,8	1
4	16,8	21502	Cap-Chat	8	65	1,7	1
2	16,1	1070001	Paspébiac	8	65	1,7	6
2	25,4	3040009	Richelieu	20	225	1,7	6
2	23,2	5010461	Saint-Maurice	8	77	1,5	3
2	18,0	5400006	Beauport	8	76	1,5	6
1	17,2	7100047	aux Outardes	9	80	1,3	2
1	15,4	7110001	Manicouagan	9	84	1,4	2

4 CONCLUSION

La présente étude visait à évaluer la sensibilité des cours d'eau aux prélèvements d'eau, sur la base de leur régime thermique et de leur débit de base. En particulier, il s'agissait de valoriser l'information incluse dans la base de données BQMA pour caractériser des régimes thermiques des rivières québécoises.

Cette caractérisation s'est faite par l'ajustement d'un modèle gaussien à trois paramètres aux mesures ponctuelles acquises en 299 stations de la BQMA, de même que par le calcul d'une variabilité mensuelle interannuelle. Une caractérisation similaire a été effectuée pour 43 séries de mesures continues dans des rivières incluses dans la base de données RivTemp (documents en annexe). Les valeurs minimale et maximale du maximum interannuel (paramètre a) pour l'ensemble des stations de la BQMA sont de 14,6°C (Rivière Nouvelle) et 25,7°C (Aux Brochets).

La caractérisation physique des bassins associés à 105 stations hydrométriques de la DEHA a permis d'associer certaines de ces variables physiques aux valeurs du paramètre a et du débit de base à l'aide d'arbres de régression. Des classes de paramètres a et de débits de base faibles, moyens et élevés ont ainsi pu être assignées aux rivières à l'étude.

Un indice combiné caractérisant la sensibilité aux prélèvements d'eau basé sur ces classes (Tableau 10) a ensuite pu être assigné aux différentes rivières. Des rivières à l'étude, 13 ont un indice combiné 9 (température moyenne maximale annuelle élevée, débit de base faible) et 11 ont un indice combiné 1 (température moyenne maximale annuelle faible, débit de base élevé).

Limites de l'analyse :

- Les valeurs du paramètre a sont des estimations basées sur des séries de mesures de température de résolutions temporelles et de longueurs limitées. De plus, la présente analyse ne permet pas d'évaluer les incertitudes sur ces valeurs lorsqu'elles sont obtenues à partir de mesures ponctuelles.
- Le manque d'information hydrogéologique à l'échelle de l'ensemble du territoire limite l'ajout de ce type de prédicteurs, qui pourrait possiblement améliorer la spatialisation du BFI et de la thermie dans certaines régions.
- Peu de petites rivières et de rivières de l'Ouest de la province sont représentées dans la présente étude, qui comporte donc un probable biais d'échantillonnage.
- Les stations de mesure du débit et de la température sont parfois éloignées l'une de l'autre.

Cette étude est la première à exploiter des mesures ponctuelles de la température pour l'étude des régimes thermiques et de la sensibilité des rivières québécoises à l'échelle de la province. Les résultats rapportés ici permettent d'affirmer, en tenant compte des recommandations émises à la section 2.1, que l'information contenue dans la BQMA peut servir à dresser un portrait des régimes thermiques québécois, à des échelles spatiale et temporelle inégalées à ce jour. L'amélioration du réseau de mesure de la température des rivières du Québec, par l'installation de stations de mesures permanentes, le maintien et l'expansion du réseau RivTemp et de sa base de données, voire l'utilisation de données satellitaires, permettra une encore meilleure connaissance des régimes thermiques québécois et un meilleur suivi de leur évolution.

5 RÉFÉRENCES

- Boyer, C., A. St-Hilaire, N. Bergeron, A. Daigle, R.A. Curry, D. Caissie. 2016. RivTemp: A water temperature network for Atlantic salmon rivers in eastern Canada. *Water News*, 35(2).
- Daigle, A., C. Boyer, A. St-Hilaire, 2019. A standardized characterization of river thermal regimes in Québec (Canada). *Journal of Hydrology* 577, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.123963.
- Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC). 2021. Banque de données sur la qualité du milieu aquatique (BQMA), Québec, Direction générale du suivi de l'état de l'environnement.
- Poirier, C., 2012. Estimation préliminaire des débits de base à des sites de stations hydrométriques du Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ). Contribution au Programme d'acquisition des connaissances sur les eaux souterraines (PACES). Présentation power point faite aux équipes PACES, 2012-10-30. Données numériques identifiées sous la version beta_v2 2012-10-02, déposés sur le site ftp du PACES.
- Réseau RivTemp : <http://rivtemp.ca/>

6 ANNEXES

6.1 ANALYSE PRÉLIMINAIRE

Daigle, A., Boyer, C., St-Hilaire, A. Évaluation de la sensibilité des cours d'eau aux prélèvements d'eau - Analyse préliminaire : rapport déposé le 24 avril 2020, avec mises à jour mineures (Analyse préliminaire.pdf).

6.2 CARATERISATION_BQMA

Caraterisation_BQMA.xlsx : valeurs des paramètres de la fonction gaussienne ajustée sur les données de la BQMA.

6.3 SOURCES DES DOCUMENTS UTILISÉS POUR LA CARACTÉRISATION PHYSIQUE DES BASSINS VERSANTS EN AMONT DES STATIONS

VARIABLES	DOCUMENT SOURCE	
Délimitation de l'aire de bassin	MNT pour Arc Hydro	Modèle reconstitué 50 m (Ministère de l'Environnement et des changements climatiques)
Aire du bassin		
Élévation	MNT	Modèle numérique d'élévation du Canada (MNEC), geogratix (Ressources naturelles Canada)
Pente		
Aire des lacs	Réseau drainage	Canvec 50K ('WaterLinearFlow1' et 'waterbody_2') (de Ressources naturelles Canada)
Végétation	2010 Land Cover of North America at 30 meters (Commission for Environmental Cooperation (CEC))	
Dépôts de surface	Commission géologique du Canada	
Géologie		
Débit	Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ) du Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC)	

6.4 MÉTHODE ET RÉSULTATS POUR LES STATIONS DU RÉSEAU RivTemp

Méthode et résultats pour les stations du réseau RivTemp.pdf

6.5 TABLEAU DES INDICES PAR STATION

Sites BFI	Indice BFI	Sites BQMA Teau	Indice thermique	Indice combiné	Rivière	base de données
10101	3	1010002	4	1	La Grande Rivière	Thermie et BFI
10801	3	1080001	4	1	Bonaventure	Thermie et BFI
10901	3	1090001	4	1	Petite rivière Cascapédia	Thermie et BFI
11204	3	1120005	4	1	Nouvelle	Thermie et BFI
11507	3	1150004	4	1	Matapédia	Thermie et BFI
11509	3	1150004	4	1	Matapédia	Thermie et BFI
20302	3	2030001	4	1	Saint-Jean	Thermie et BFI
20401	3	2040001	4	1	York	Thermie et BFI
20802	3	2080005	4	1	Madeleine	Thermie et BFI
21405	3	2140002	4	1	Sainte-Anne	Thermie et BFI
21502	3	2150002	4	1	Cap-Chat	Thermie et BFI
40830	3	4080223	1	2	Gatineau	Thermie et BFI
50402	3	5040007	1	2	Sainte-Anne	Thermie et BFI
50403	3	5040113	1	2	Bras du Nord (de la rivière Sainte-Anne	Thermie et BFI
50409	3	5040113	1	2	Bras du Nord	Thermie et BFI
51001	3	5100014	1	2	Montmorency	Thermie et BFI
51301	3	5130016	1	2	Du Gouffre	Thermie et BFI
60703	3	6070006	1	2	À Mars	Thermie et BFI
70204	3	7020002	1	2	Des Escoumins	Thermie et BFI
71401	3	7140001	1	2	Godbout	Thermie et BFI
72301	3	7230003	1	2	Moisie	Thermie et BFI
	3	5080006	1	2	Jacques-Cartier	Thermie
	3	5120021	1	2	Sainte-Anne	Thermie
	3	5150001	1	2	Malbaie	Thermie
	3	7100047	1	2	Rivière aux Outardes	Thermie
	3	7110001	1	2	Manicouagan	Thermie
40204	3	4020003	2	3	Rouge	Thermie et BFI
41301	3	4130002	2	3	Coulange	Thermie et BFI
50408	3	5040116	2	3	Sainte-Anne	Thermie et BFI
52201	3	5220017	2	3	L'Assomption	Thermie et BFI
52203	3	5220012	2	3	Ouareau	Thermie et BFI
52212	3	5220012	2	3	Ouareau	Thermie et BFI
52606	3	5260018	2	3	Mastigouche	Thermie et BFI
52805	3	5280020	2	3	Du Loup	Thermie et BFI
	3	5010461	2	3	Saint-Maurice	Thermie
11508	4	1150018	4	4	Décharge du lac Matapédia	Thermie et BFI
21601	4	2160018	4	4	Matane	Thermie et BFI
22003	4	2200019	4	4	Rimouski	Thermie et BFI
	4	1010002	4	4	La Grande Rivière	Thermie
	4	1020001	4	4	du Petit Pabos	Thermie
	4	2190014	4	4	Mitis	Thermie
43012	4	4300002	1	5	Kinojévis	Thermie et BFI
61801	4	6180001	1	5	Petite rivière Péribonca	Thermie et BFI
61901	4	6190001	1	5	Ashuapmushuan	Thermie et BFI
61905	4	6190001	1	5	Ashuapmushuan	Thermie et BFI
62102	4	6210001	1	5	Mistassini	Thermie et BFI
73801	4	7380003	1	5	Romaine	Thermie et BFI
80101	4	8010064	1	5	Harricana	Thermie et BFI
	4	7050001	1	5	Sault aux Cochons	Thermie
	4	7120007	1	5	aux Anglais	Thermie
	4	7130004	1	5	Franquelin	Thermie
	4	7190016	1	5	Rivière aux Rochers	Thermie
13001	4	1300001	2	6	Daaquam	Thermie et BFI
22301	4	2230001	2	6	Des Trois-Pistoles	Thermie et BFI
22504	4	2250002	2	6	Du Loup (BSL)	Thermie et BFI
22507	4	2250002	2	6	Du Loup (BSL)	Thermie et BFI
22701	4	2270002	2	6	Ouelle	Thermie et BFI
23002	2	2300002	2	6	Boyer Sud	Thermie et BFI
23004	2	2300001	2	6	Boyer	Thermie et BFI

23101	4	2310004	2	6	Du Sud	Thermie et BFI
23301	2	2330006	2	6	Etchemin	Thermie et BFI
23303	2	2330006	2	6	Etchemin	Thermie et BFI
23401	4	2340034	2	6	Beaurivage	Thermie et BFI
23402	2	2340014	2	6	Chaudière	Thermie et BFI
23403	4	2340006	2	6	Chaudière	Thermie et BFI
23426	4	2340004	2	6	Chaudière	Thermie et BFI
23429	4	2340004	2	6	Chaudière	Thermie et BFI
23432	2	2340051	2	6	Bras d'Henri	Thermie et BFI
23701	2	2370002	2	6	Petite rivière du Chêne	Thermie et BFI
23902	2	2390001	2	6	Gentilly	Thermie et BFI
24001	2	2400006	2	6	Bécancour	Thermie et BFI
24003	4	2400006	2	6	Bécancour	Thermie et BFI
24007	2	2400074	2	6	Bécancour	Thermie et BFI
24013	4	2400005	2	6	Bécancour	Thermie et BFI
24014	4	2400074	2	6	Bécancour	Thermie et BFI
30101	4	3010041	2	6	Nicolet Sud-Ouest	Thermie et BFI
30103	2	3010007	2	6	Nicolet	Thermie et BFI
30215	2	3020177	2	6	Coaticook	Thermie et BFI
30219	4	3020042	2	6	Au Saumon	Thermie et BFI
30282	4	3020042	2	6	Au Saumon	Thermie et BFI
30318	2	3030003	2	6	Noire	Thermie et BFI
30339	2	3030003	2	6	Noire	Thermie et BFI
30340	4	3030108	2	6	Yamaska Nord	Thermie et BFI
40401	4	4040039	2	6	De la Petite Nation	Thermie et BFI
40402	4	4040039	2	6	De la Petite Nation	Thermie et BFI
50302	4	5030115	2	6	Batiscan	Thermie et BFI
50304	4	5030115	2	6	Batiscan	Thermie et BFI
50811	2	5080053	2	6	Aux Pommès	Thermie et BFI
52202	4	5220001	2	6	L'Assomption	Thermie et BFI
52211	4	5220001	2	6	L'Assomption	Thermie et BFI
52219	4	5220001	2	6	L'Assomption	Thermie et BFI
52601	4	5260015	2	6	Maskinongé	Thermie et BFI
52801	4	5280019	2	6	Du Loup	Thermie et BFI
61307	4	6130005	2	6	La Belle Rivière	Thermie et BFI
	2	1070001	2	6	Paspébiac	Thermie
	4	2250005	2	6	du Loup (BSL)	Thermie
	4	2270002	2	6	Ouelle	Thermie
	2	2290007	2	6	Trois-Saumons	Thermie
	4	2310004	2	6	Sud, Rivière du	Thermie
	4	2330001	2	6	Etchemin, Rivière	Thermie
	4	2340050	2	6	Chaudière	Thermie
	2	2350003	2	6	Ruisseau Beaudet	Thermie
	2	2360014	2	6	du Chêne	Thermie
	2	2370002	2	6	Petite rivière du Chêne	Thermie
	2	2390001	2	6	Gentilly	Thermie
	2	2500002	2	6	Aulneuse	Thermie
	2	3040009	2	6	Richelieu	Thermie
	2	5020006	2	6	Champlain	Thermie
	4	5030001	2	6	Batiscan	Thermie
	2	5390001	2	6	Cap Rouge	Thermie
	2	5400006	2	6	Beauport	Thermie
	4	7040001	2	6	Portneuf	Thermie
30262	2	3020033	3	6	Saint-Germain	Thermie et BFI
30291	2	3020033	3	6	Saint-Germain	Thermie et BFI
30304	2	3030003	3	6	Noire	Thermie et BFI
30337	2	3030031	3	6	Yamaska sud-est	Thermie et BFI
30341	2	3030026	3	6	Yamaska	Thermie et BFI
30345	2	3030026	3	6	Yamaska	Thermie et BFI
30415	2	3040007	3	6	Des Hurons	Thermie et BFI
30420	2	3040111	3	6	Aux Brochets	Thermie et BFI
30901	2	3090001	3	6	Châteauguay	Thermie et BFI
30905	2	3090001	3	6	Châteauguay	Thermie et BFI
30908	2	3090019	3	6	Trout	Thermie et BFI
30919	2	3090003	3	6	Châteauguay	Thermie et BFI
46708	2	4670004	3	6	Du Chêne	Thermie et BFI

50701	2	5070012	3	6	Portneuf	Thermie et BFI
50702	2	5070012	3	6	Portneuf	Thermie et BFI
52229	2	5220006	3	6	Saint-Esprit	Thermie et BFI
52233	2	5220005	3	6	De l'Achigan	Thermie et BFI
52802	2	5280019	3	6	Du Loup	Thermie et BFI
	2	2280003	3	6	Ferrée	Thermie
	4	3020031	3	6	Saint-François	Thermie
	2	3030023	3	6	Yamaska	Thermie
	2	3060001	3	6	Saint-Jacques	Thermie
	2	3070015	3	6	de la Tortue	Thermie
	2	3080001	3	6	Saint-Régis	Thermie
	2	4640003	3	6	Mascouche	Thermie
	2	4650001	3	6	aux Chiens	Thermie
	4	5040007	3	6	Sainte-Anne	Thermie
	2	5050100	3	6	La Chevrotière	Thermie
	2	5230001	3	6	la Chaloupe	Thermie
	2	5240001	3	6	Bayonne	Thermie
	2	5250002	3	6	Chicot	Thermie
	4	5280064	3	6	Rivière du Loup	Thermie
	2	5290001	3	6	Petite rivière Yamachiche	Thermie
	1	2210009	4	7	du Bic	Thermie
	1	2220004	4	7	du Sud-Ouest	Thermie
	1	7710001	1	8	Moulin à Baude	Thermie
	1	2240005	2	9	Verte	Thermie
	1	2260002	2	9	Kamouraska	Thermie
	1	2540002	2	9	Saint-Jean	Thermie
	1	5090017	2	9	Saint-Charles	Thermie
30421	1	3040116	3	9	L'Acadie	Thermie et BFI
30422	1	3040075	3	9	Au Castor	Thermie et BFI
30423	1	3040071	3	9	Morpions	Thermie et BFI
30424	1	3040015	3	9	Aux Brochets	Thermie et BFI
30426	1	3040073	3	9	Ewing	Thermie et BFI
30907	1	3090002	3	9	Des Anglais	Thermie et BFI
	1	2400004	3	9	Bécancour	Thermie
	1	3010008	3	9	Nicolet	Thermie
	1	5300004	3	9	Yamachiche	Thermie