



Université du Québec
à Rimouski

Étude de la variabilité spatio-temporelle des apports d'eau douce dans la baie James

Mémoire présenté

dans le cadre du programme de maîtrise en océanographie

en vue de l'obtention du grade de maître ès sciences

PAR

© **RÉMI COSTANZO**

Avril 2023

Composition du jury :

Cédric Chavanne, président du jury, Université du Québec à Rimouski

Urs Neumeier, directeur de recherche, Université du Québec à Rimouski

Michel Gosselin, codirecteur de recherche, Université du Québec à Rimouski

Joël Chassé, examinateur externe, Pêches et Océans Canada

Dépôt initial le 6 mai 2022

Dépôt final le 4 avril 2023

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI
Service de la bibliothèque

Avertissement

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

À Claude Lanteigne, un ami parti
trop rapidement.

REMERCIEMENTS

Ce travail n'aurait pas été possible sans l'aide précieuse de mes directeur et co-directeur de recherche Urs Neumeier et Michel Gosselin qui m'ont tous deux apportés leur énorme soutien dans leur sphère de connaissances respectives. Je remercie également mon père Michel Costanzo et ma mère Claire Lavoie qui m'ont encouragé à continuer jusqu'au bout tout au long de ce périple. Merci également à la Société Niskamoon et à l'ISMER pour le soutien logistique et financier. Je remercie également Cédric Chavanne qui a accepté d'être président du jury de ce mémoire. Un gros merci à Martine Belzile qui a été d'une aide précieuse pour traiter rapidement toutes les difficultés administratives. Énorme merci également à Joël Chassé pour son aide rapide dans la correction de ce mémoire malgré les circonstances particulières ! Sans vous tous, la rédaction de ce mémoire n'aurait pas été possible.

Je désire enfin remercier tous ceux qui, sans les nommer, m'ont encouragé de près ou de loin dans l'accomplissement de cette tâche. Merci aussi à Claude Lanteigne qui a été l'un des premiers à me transmettre sa fascination des sciences et le plaisir d'apprendre.

RÉSUMÉ

Le débit des rivières de la baie James a été affecté non seulement par les changements climatiques, mais aussi par les dérivations de bassins versants qui ont augmentées artificiellement le débit de la Grande Rivière à des fins de production hydro-électrique. Le but de cette recherche est de décrire la variabilité spatio-temporelle du débit annuel de ruissellement à la baie James en utilisant les données de modélisation de ERA5 de 1951 à 2020. La somme des débits annuels de précipitations et d'évaporation a permis de modéliser le débit de ruissellement par année hydrologique (octobre à septembre). La validation du modèle avec les données de stations hydrométriques présentes dans la zone d'étude a démontré qu'une calibration préalable était nécessaire. Les données calibrées ont été comparées aux valeurs des stations et ne montrent pas de différences significatives (test de rangs signés de Wilcoxon; $p = 0.769$). Le débit des rivières et les précipitations nettes sur le bassin versant de la baie James ont augmenté significativement de $0.88 \text{ km}^3/\text{an}^2$ (soit 0.25 % par an) entre 1951 et 2020. Toutefois, cette hausse est principalement causée par la dérivation de la partie amont de la rivière Caniapiscou. En l'absence des dérivations, la hausse n'aurait été que de $0.27 \text{ km}^3/\text{an}^2$ (valeur non significative). Sur cette période, aussi bien les précipitations que l'évaporation ont augmenté de manière significative. Le ruissellement, les précipitations et l'évaporation ont diminué à la baie James entre 1951 et 1976 et ont ensuite augmenté rapidement de 1976 à 2020. Le débit annuel des rivières du nord-est de la baie James a augmenté suite aux dérivations successivement de $69.38 \text{ km}^3/\text{an}$ (moyenne pour 1951-1978) à $116.28 \text{ km}^3/\text{an}$ (moyenne pour 1985-2009) après les dérivations des rivières Caniapiscou, Grande rivière de la Baleine et Eastmain, puis à $145.12 \text{ km}^3/\text{an}$ (moyenne pour 2010-2020) après la dérivation de la rivière Rupert. Entre 1951 et 2020, la baie James a reçu, en moyenne, $133.9 \text{ km}^3/\text{an}$ d'eau douce de sa rive ouest et $180.0 \text{ km}^3/\text{an}$ (excluant l'effet des dérivations) ou $192.3 \text{ km}^3/\text{an}$ (incluant les dérivations) de sa rive est. Cette étude présente une nouvelle façon d'estimer les débits annuels de ruissellement permettant une meilleure vue globale du cycle de l'eau douce de la baie James à long terme, ce qui permettra d'affiner nos connaissances océanographiques de cette région.

Mots clés : baie James, débit annuel, rivières, dérivation de rivière, ERA5, évaporation, précipitations, modélisation, eau douce, hydrologie.

ABSTRACT

Discharge of the James Bay rivers has not only been affected by climate change, but also by watershed diversions, which increased artificially the flow of the Grande Rivière for hydroelectric production purposes. The goal of this research is to describe the spatiotemporal variability of the annual river discharge into James Bay using ERA5 modeling data from 1951 to 2020. The sum of annual precipitation and evaporation has allowed to model runoff for each hydrological year (October to September). The model validation with observation from hydrometric stations located in the study area demonstrated that a data calibration was necessary. Calibrated data were compared to hydrometric station values and showed no significant differences (Wilcoxon signed rank test; $p = 0.769$). River discharge and net precipitation on the James Bay watershed increased significantly by $0.88 \text{ km}^3/\text{yr}^2$ (i.e., 0.25% per yr) between 1951 and 2020. However, this increase is mainly caused by the diversion of the upstream part of the Caniapiscou River. In the absence of diversions, the increase would have been only $0.27 \text{ km}^3/\text{yr}^2$ (non-significant value). Over this period, both evaporation and precipitation increased significantly. Runoff, evaporation and precipitation decreased in James Bay between 1951 and 1976 and then increased rapidly from 1976 to 2020. The annual river discharge in northeast James Bay increased following diversions successively from $69.38 \text{ km}^3/\text{yr}$ (average for 1951-1978) to $116.28 \text{ km}^3/\text{yr}$ (average for 1985-2009 after the diversions of the Caniapiscou, Grande rivière de la Baleine and Eastmain), then to $145.12 \text{ km}^3/\text{yr}$ (average for 2010-2020 after diversion of the Rupert River). Between 1951 and 2020, James Bay received, on average, $133.9 \text{ km}^3/\text{yr}$ of fresh water from its western shore and $180.0 \text{ km}^3/\text{yr}$ (excluding the effect of diversions) or 192.3 km^3 (including diversions) from its eastern shore. This study presents a new way of estimating annual runoff flows, allowing a better global view of the James Bay freshwater cycle in the long term, which will help refine our oceanographic knowledge of this region.

Keywords: James Bay, annual flow, rivers, river diversion, ERA5, evaporation, precipitation, modeling, fresh water, hydrology.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	IX
RÉSUMÉ	XI
ABSTRACT	XIII
TABLE DES MATIÈRES	XV
LISTE DES TABLEAUX	XIX
LISTE DES FIGURES	XXIII
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
IMPACT DES AMENAGEMENTS HYDRO-ELECTRIQUES.....	1
PRÉSENTATION GÉNÉRALE DE LA BAIE JAMES	3
VARIATIONS SAISONNIÈRES	8
ÉCOULEMENTS SOUS-TERRAINS	10
TRAVAUX ANTÉRIEURS SUR LE DÉBIT DES RIVIÈRES	12
INFLUENCE DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES	13
OBJECTIFS	15
CHAPITRE 1 MÉTHODOLOGIE	17
1.1 ZONE D'ETUDE.....	17
1.2 DELIMITATION SPATIALE DES BASSINS VERSANTS DE LA ZONE D'ETUDE	21
1.3 LES DETOURNEMENTS POUR LE DEVELOPPEMENT HYDRO-ELECTRIQUE	23
1.3.1 <i>Résumé des périodes de détournement et remplissage des réservoirs</i>	23
1.3.2 <i>Représentation des modifications anthropiques dues aux développements hydro-électriques dans l'algorithme</i>	27
1.4 LE MODELE ERA5	28

1.4.1	<i>Présentation du modèle</i>	28
1.4.2	<i>Extraction et traitement des données de réanalyse de modélisation numérique ERA5</i>	31
1.5	STATIONS HYDROMETRIQUES	35
1.5.1	<i>Débits d'eau mesurés aux stations hydrométriques</i>	35
1.5.2	<i>Sources d'erreurs sur les données de débit de ruissellement observés aux stations hydrométriques.</i>	37
1.6	ANALYSE STATISTIQUE ET CALIBRATION AVEC LES STATIONS HYDROMETRIQUES.....	39
1.6.1	<i>Comparaisons des débits annuels obtenus à partir des données ERA5 avec les débits mesurés aux stations hydrométriques</i>	39
1.6.2	<i>Tests statistiques utilisés pour vérifier la correspondance entre les données observées et modélisées aux stations hydrométriques</i>	40
1.6.3	<i>Calibration suivie d'un nouveau test de Wilcoxon sur les données calibrées</i> ..	40
1.6.4	<i>Test préliminaire de Khi-2 de conformité</i>	41
1.6.5	<i>Fiabilité du modèle</i>	41
1.6.6	<i>Test de tendance de Mann-Kendall sur les résultats de modélisation</i>	42
CHAPITRE 2 RÉSULTATS		45
2.1	VALIDATION DES DEBITS ANNUELS OBTENUS PAR MODELISATION AVEC LES DONNEES DE TERRAIN	45
2.1.1	<i>Mise en contexte</i>	45
2.1.2	<i>Comparaison statistique des observations des stations hydrométriques et des valeurs de modélisation</i>	45
2.1.3	<i>Séries temporelles et débits annuels par station</i>	51
2.1.4	<i>Les erreurs relatives</i>	54
2.2	RÉSULTATS DE LA MODÉLISATION	59
2.2.1	<i>Rivières dont le cours a été altéré par le développement hydro-électrique</i>	59
2.2.2	<i>Les débits annuels de ruissellement par secteurs</i>	71
2.2.3	<i>Précipitation nette moyenne en hauteur d'eau par secteur</i>	82
2.2.4	<i>Volume d'eau modélisé sur l'ensemble des secteurs</i>	85

2.2.5	<i>Évaluation des tendances linéaires des débits annuels de ruissellement, évaporation et précipitation.....</i>	<i>106</i>
CHAPITRE 3	DISCUSSION.....	117
3.1	LIMITATIONS DE LA METHODE D’EVALUATION DU DEBIT ANNUEL DE RUISSellement PAR L’UTILISATION DU MODELE ERA5	117
3.1.1	<i>Limitation dans la délimitation des bassins versants</i>	<i>117</i>
3.1.2	<i>Limitation du modèle ERA5 et de l’algorithme pour évaluer le ruissellement</i>	<i>118</i>
3.1.3	<i>Limitations dans l’utilisation des données de stations hydrométriques</i>	<i>120</i>
3.2	COMPARAISON DES DEBITS DE RIVIERE MODELISES PAR ERA5 ET LES TRAVAUX DE DERY ET AL. (2016)	125
3.2.1	<i>Limitation majeure de la comparaison des débits de rivières modélisés par ERA5 et estimés par Déry et al. (2016)</i>	<i>130</i>
3.2.2	<i>Limitations dans l’utilisation des données de stations hydrométriques par Déry et al. (2016).....</i>	<i>132</i>
3.3	LE CYCLE DE L’EAU DOUCE DANS LA BAIE JAMES	133
3.3.1	<i>L’eau souterraine.....</i>	<i>133</i>
3.3.2	<i>Apport d’eau saumâtre de l’ouest de la baie d’Hudson et des rivières Nelson et Severn et circulation d’eau de surface de la baie James.....</i>	<i>134</i>
3.4	IMPACT DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LA BAIE JAMES ET CONTRIBUTION DE LA PRESENTE RECHERCHE	137
3.4.1	<i>Ruissellement, précipitations et évaporation dans le contexte des changements climatiques</i>	<i>137</i>
3.4.2	<i>Prévisions selon un nouveau scénario.....</i>	<i>140</i>
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	147	
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	151	
ANNEXE I SÉRIES TEMPORELLES, COMPARATIFS DU RUISSellement OBSERVÉ ET MODÉLISÉ ET ERREURS RELATIVES AUX STATIONS HYDROMÉTRIQUES	162	

ANNEXE II COMPARATIF EST VS OUEST INCLUANT LES DÉRIVATIONS. 190

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Liste des rivières étudiées et l'aire de leur bassin versant pour les secteurs 0 à 3. Les identifiants (ID) sont présentés dans la Figure 4.	19
Tableau 2. Liste des rivières étudiées et l'aire de leur bassin versant pour les secteurs 4 à 6. Les identifiants (ID) sont présentés dans la Figure 4.	20
Tableau 3. Liste des bassins versants de sections de rivière dérivée. Les identifiants (ID) sont présentés dans la Figure 4.	21
Tableau 4. Récapitulatif des dérivations de rivière et des remplissages de réservoir à des fins de production hydroélectrique sur le bassin versant de la Grande Rivière au cours des trois phases de développement. Un « * » signifie que le jour exact n'est pas connu.	26
Tableau 5. Détail des stations hydrométriques utilisées : la rivière dont le débit est mesuré (principale ou secondaire si applicable), le numéro d'identification d'Environnement Canada, le secteur correspondant, la localisation, les années d'opération et l'aire du sous-bassin versant spécifique à la station. Le Tableau 6 présente le nombre d'années valides et le débit moyen pour chaque station.	36
Tableau 6. Résumé des débits pour l'ensemble des stations hydrométriques (Ense) ainsi que pour les stations des rivières Albany, Attawapiskat, Broadback, Ekwan, Grande rivière de la Baleine (GRDLB), Moose, Nottaway, Pontax et Winisk avec le nombre d'années de comparaison disponibles (N), les moyennes, médianes et écarts types (SD) des valeurs de station (Observé) et de modélisation par ERA5 (Modélisé), le coefficient de corrélation (r), les coefficient Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) et Kling-Gupta Efficiency (KGE) et le p-value du test de rangs signés de Wilcoxon. Pour ce dernier, une étoile indique que les distributions sont différentes ($p < 0.05$).	50
Tableau 7. Apports d'eau douce en provenance de la rivière Caniapiscou ajoutés au système de la baie James en valeur absolue et relative à la quantité d'eau globale reçue à la baie James	62
Tableau 8. Rapport exhaustif des altérations du débit de la Grande Rivière.	69

Tableau 9. Résumé des moyennes, pentes, R^2 et écart type des sept secteurs. Les scénarios réel et naturel sont présentés en parallèle. *Le R^2 est significatif à $p = 0.10$. **Le R^2 est significatif à $p = 0.05$. *** Le R^2 est significatif à $p = 0.01$	71
Tableau 10. Précipitations nettes annuelle moyennes par période de 10 ans entre 1951 et 2020, ainsi que pour toute la période 1951-2020. Les écarts types sont présentés pour visualiser la variabilité interannuelle de chaque période. La moyenne et l'écart type pour 1951-2020 sont en caractère gras.	84
Tableau 11. Statistiques concernant le ruissellement, les précipitations et l'évaporation sur le bassin versant de la baie James (secteurs 0, 2 à 5) de 1951 à 2020. * R^2 est significatif à $p = 0.10$. ** R^2 est significatif à $p = 0.05$. *** R^2 est significatif à $p = 0.01$	88
Tableau 12. Statistiques concernant le ruissellement, les précipitations et l'évaporation sur l'ensemble des secteurs 0 à 6 de 1951 à 2020. * R^2 est significatif à $p = 0.10$. ** R^2 est significatif à $p = 0.05$. *** R^2 est significatif à $p = 0.01$	93
Tableau 13. Pour l'ensemble de la zone d'étude (secteur 0 à 6) et le bassin versant de la baie James (secteur 0, 2 à 5) : débit annuel moyen, écart type et erreur type par période (années hydrologiques).....	95
Tableau 14. Moyenne des débits de ruissellement sur la période de 1951 à 2020 avec les pentes de régressions linéaires et leur coefficient de détermination pour l'ouest et l'est (avec et sans l'effet des dériviations). Le ratio de variation est calculé comme le quotient de la pente par la moyenne. * R^2 est significatif à $p = 0.10$. ** R^2 est significatif à $p = 0.05$. *** R^2 est significatif à $p = 0.01$	97
Tableau 15. Sommaire des pentes et coefficients de détermination de chaque mois pour les Figures 40, 41 et 42 en incluant et en excluant les dériviations de bassins versants aux fins de développement hydro-électrique. *Le R^2 est significatif à $p = 0.10$. **Le R^2 est significatif à $p = 0.05$. ***Le R^2 est significatif à $p = 0.01$	104
Tableau 16. Période de 1951 à 2020, résultat des tests de Mann-Kendall pour les débits annuels de ruissellement par secteur, sur le bassin versant de la baie James et sur l'ensemble des secteurs. Les résultats sont présentés avec et sans les dériviations et en hauteur d'eau avec les dériviations. La pente de la régression linéaire est significativement différente de 0 si le p-value du test de Mann-Kendall est inférieur à 0.05. La pente de la régression linéaire et R^2 sont aussi présentés. * R^2 est significatif à $p = 0.10$. ** R^2 est significatif à $p = 0.05$. *** R^2 est significatif à $p = 0.01$	108

Tableau 17. Période de 1951 à 2020, résultat des tests de Mann-Kendall pour les débits annuels de précipitations totales et d'évaporation sur le bassin versant de la baie James et sur l'ensemble des secteurs. La pente de la régression linéaire est significativement différente de 0 si le p-value du test de Mann-Kendall est inférieur à 0.05. Les tendances de Mann-Kendall ont été notés selon trois scénarios : le scénario naturel où les dériviations de bassins versant ne sont pas considérées, le scénario réel où on les y ajoute et le scénario où ce sont les hauteurs d'eau par taille de bassin versant qui modère l'impact des dériviations. La pente de la régression linéaire et R^2 sont aussi présentés. * R^2 est significatif à $p = 0.10$. ** R^2 est significatif à $p = 0.05$. *** R^2 est significatif à $p = 0.01$	110
Tableau 18. Équivalent des Tableaux 16 et 17 pour la période de 1951 à 1976. *Le R^2 est significatif à $p = 0.10$. **Le R^2 est significatif à $p = 0.05$. ***Le R^2 est significatif à $p = 0.01$	112
Tableau 19. Équivalent du Tableau 16 pour la période de 1976 à 2020. *Le R^2 n'est pas significatif à $p = 0.05$, mais significatif à $p = 0.10$. **Le R^2 est significatif à $p = 0.05$. ***Le R^2 est significatif à $p = 0.01$	113
Tableau 20. Équivalent du Tableau 17 pour la période de 1976 à 2020. *Le R^2 est significatif à $p = 0.10$. **Le R^2 est significatif à $p = 0.05$. ***Le R^2 est significatif à $p = 0.01$	114
Tableau 21. Débits de ruissellement annuels par période de 10 ans (années civiles) entre 1964 et 2013 selon Déry et al. (2016) et le modèle ERA5 calibré (valeurs moyennes et écarts types). Les noms complets des rivières sont : Winisk, Ekwan, Attawapiskat, Albany, Moose, Harricana, Nottaway, Broadback, Rupert, Pontax, Eastmain, La Grande et Grande rivière de la Baleine.....	127
Tableau 22. Comparatif des débits moyens annuels par période selon qu'ils ont été rapportés par Déry et al. (2016), calculé avec le modèle ERA5 pour tout le bassin versant ou mesurés par la station hydrométrique 04HA001, soit la station la plus en aval de la rivière Albany. Deux périodes sont manquantes pour les données de stations puisque les années de la période n'étaient pas toutes disponibles. À noter qu'une journée était aussi manquante pour la période de 2004 à 2013 (le 25 septembre 2012), la moyenne du débit de la journée précédente et suivante a été appliqué pour représenter le débit de cette journée. À noter qu'il s'agit ici d'années civiles.	131
Tableau 23. Variations du ruissellement sans et avec dériviations et de la hauteur d'eau pour les différents secteurs de la baie James entre 1951-2020 et 1976-2020. La pente est obtenue en utilisant la régression linéaire et le pourcentage de variation (Δ) est calculé entre le début et la fin de chaque	

période par rapport au débit moyen. Les pentes mises en gras sont significatives à $p=0.05$ selon le test de Mann-Kendall (voir la section 2.2.5).... 139

Tableau 24. Variations des précipitations et de l'évaporations sans et avec dériviations pour les différents secteurs de la baie James entre 1951-2020 et 1976-2020. La pente est calculée par régression linéaire et le pourcentage de variation est calculé entre le début et la fin de chaque période par rapport au débit moyen. Les pentes mises en gras sont significatives à $p=0.05$ selon le test de Mann-Kendall (voir la section 2.2.5)..... 140

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Cycle de l'eau douce, tiré de Bush et Lemmens (2019).	3
Figure 2. Courant de surface moyen mensuel au nord de la baie James antérieur au développement hydroélectrique pour les années 1972-1973 pour les mois d'août et d'octobre respectivement, tiré d'El-Sabh et Koutitonsky (1977).....	5
Figure 3. Circulation estivale moyenne des courants de surfaces dans les baies d'Hudson et James, tiré de Stewart et Lockhart (2005).....	6
Figure 4. Délimitation des bassins versants des rivières dont l'embouchure se situe dans la baie James ou dans ses pourtours immédiats (voir Tableaux 1-3 pour les IDs des bassins versants de rivières).....	7
Figure 5. Moyenne saisonnière de la salinité de surface (psu) dans le système de la baie d'Hudson pour l'année 1996-1997 (ou l'année hydrologique 1997). La première image représente l'automne avec les mois d'octobre, novembre et décembre 1996, la seconde, les mois d'hiver avec janvier, février et mars 1997, la troisième, les mois du printemps avec avril, mai et juin 1997 et la dernière, les mois d'été avec juillet, août et septembre 1997), tiré du modèle 3D de Saucier et al. (2004).....	9
Figure 6. Distribution de salinité de surface hivernale et magnitude des courants de surface de la baie James tel que mesurées (A) avant les développements hydroélectriques et (B) prédit après ces développements, tiré de Prinsenberg (1982).	10
Figure 7. Relation entre la contribution relative des eaux souterraines à la circulation totale de l'eau et l'aire de bassins versants pour une période humide et sèche pour le sous-bassin versant de la rivière Nayshkootayaow, un affluent mineur de la rivière Attawapiskat, tiré d'Orlova et Branfireun (2014).....	12
Figure 8. Agrandissement de la zone d'étude à proximité de la baie James (voir Tableaux 1-3 pour les ID des rivières).	18
Figure 9. Diagramme schématique des différents processus physiques représentés dans le modèle Integrated Forecasting System (IFS) utilisé par ERA5. Tirée de ECMWF (2016).....	30
Figure 10. Représentation schématique du modèle de prévision pour les nuages. Tirée de ECMWF (2016).....	30
Figure 11. Découpage des tuiles d'un bassin versant.....	32

Figure 12. Superposition des tuiles issues des données modélisées ERA5 aux polygones délimitant les tracés des bassins versants de la zone d'étude. Un agrandissement permet de montrer que certaines tuiles ont été découpées pour s'adapter au contour d'un bassin versant spécifique.	33
Figure 13. Carte des sous-bassins versants de stations hydrométriques utilisées pour valider la modélisation par ERA5 du débit annuel de ruissellement.....	37
Figure 14. Comparaison entre les débits annuels modélisés par ERA5 sur les sous-bassins des stations hydrométriques et ceux mesurés par ces stations hydrométriques. Le graphique du haut présente seulement les données avec toutes les journées de l'année sans flag de qualité (n=31) alors que le graphique du bas présente toutes les données (n=331).....	47
Figure 15. Comparaison des histogrammes des débits mesurés aux stations hydrométriques et des débits modélisés avec ERA5. L'hypothèse nulle du test de khi-2 de conformité selon laquelle la distribution des données modélisées est conforme à celle des données des stations hydrométriques n'est pas rejetée (p-value = 0.7).....	48
Figure 16. Rivière Attawapiskat. Haut : série temporelle des débits mesurés à la station hydrométrique et des débits modélisés par ERA5. Bas : débits annuels modélisés par ERA5 en fonction des débits observés à la station hydrométrique.....	52
Figure 17. Rivière Nottaway. Haut : série temporelle des débits mesurés à la station hydrométrique et des débits modélisés par ERA5. Bas : débits annuels modélisés par ERA5 en fonction des débits observés à la station hydrométrique.....	53
Figure 18. Erreurs relatives des données modélisées avec ERA5 par rapport aux stations hydrométriques sur l'ensemble des stations hydrométriques.	55
Figure 19. Rivière Ekwan. Haut : série temporelle des débits annuels de ruissellement observés à la station hydrométrique en comparaison avec ceux de modélisation. Bas : erreurs relatives des données modélisées par rapport aux observations de la station.....	58
Figure 20. Rivière Pontax. Haut : série temporelle des débits annuels de ruissellement observés à la station hydrométrique en comparaison avec ceux de modélisation. Bas : erreurs relatives des données modélisées par rapport aux observations de la station.....	59
Figure 21. Débit annuel de la section amont de la rivière Caniapiscou pour la période de 1951 à 2021, soit avant et après la dérivation qui a eu lieu en octobre 1981.	61

Figure 22. Comparatif entre le débit naturel de la Grande rivière de la Baleine et en considérant la dérivation à partir d'août 1983 aux fins de développement hydro-électrique. Excluant la dérivation, la régression linéaire sur la période de 1951 à 2020 donne un coefficient de régression de $-0.0143 \text{ km}^3/\text{an}^2$ avec un R^2 de 0.0082 ($p > 0.10$).	63
Figure 23. Comparatif entre le débit naturel de la rivière Eastmain et en considérant la dérivation à partir d'avril 1980 aux fins de développement hydro-électrique. La régression linéaire excluant la dérivation présente une pente de $0.0253 \text{ km}^3/\text{an}^2$ avec un R^2 de 0.016 ($p > 0.10$).	65
Figure 24. Comparatif entre le débit annuel naturel de la rivière Rupert et en considérant la dérivation à partir de novembre 2009 aux fins de développement hydro-électrique. La régression linéaire annuelle présente un coefficient de régression linéaire de $0.0529 \text{ km}^3/\text{an}^2$ avec un R^2 de 0.0641 ($p < 0.05$).	67
Figure 25. Comparatif entre le débit naturel de la Grande Rivière et en considérant les dérivations et remplissage de réservoir aux fins de développement hydro-électrique. La régression linéaire signale une augmentation moyenne du débit naturel de $0.0007 \text{ km}^3/\text{an}^2$ avec un $R^2 < 0.001$ ($p > 0.10$). La différence entre les deux débits représente un nouvel intrant dans le secteur nord-est de la baie James en provenance des secteurs baie d'Hudson est, baie James sud-est et de la baie d'Ungava.....	70
Figure 26. Secteur 0 : baie James (eau et îles non côtières). Série temporelle des précipitations nettes (équivalent au débit de ruissellement) sur la période de 1951 à 2020. La régression linéaire témoigne d'une diminution moyenne de $0.0817 \text{ km}^3/\text{an}^2$ avec un R^2 de 0.111 ($p < 0.01$).	72
Figure 27. Secteur 1 : baie d'Hudson à l'est de la baie James. Série temporelle du débit de ruissellement sur la période de 1951 à 2020 en incluant et excluant les dérivations de bassins versants. La régression linéaire du débit naturel témoigne d'une diminution moyenne du débit de $0.0166 \text{ km}^3/\text{an}^2$ avec un R^2 de 0.0091 ($p > 0.10$). La régression linéaire du débit incluant l'impact de la dérivation montre une diminution moyenne du débit de $0.0406 \text{ km}^3/\text{an}^2$ avec un R^2 de 0.0531 ($p < 0.10$).	74
Figure 28. Secteur 2 : nord-est de la baie James. Série temporelle du débit de ruissellement sur la période de 1951 à 2020 en incluant et excluant les dérivations de bassins versants. La régression linéaire du débit naturel témoigne d'une diminution moyenne du débit de $0.0003 \text{ km}^3/\text{an}^2$ avec un R^2 de < 0.0001 ($p > 0.10$). La régression linéaire du débit après dérivation et tenant compte du remplissage des réservoirs montre une augmentation moyenne de $1.3620 \text{ km}^3/\text{an}^2$ avec un R^2 de 0.707 ($p < 0.01$).	76

Figure 29. Secteur 3 : sud-est de la baie James. Série temporelle du débit de ruissellement sur la période de 1951 à 2020 en incluant et excluant les dérivations de bassins versants. La régression linéaire du débit naturel témoigne d'une augmentation moyenne du débit de $0.1833 \text{ km}^3/\text{an}^2$ avec un R^2 de 0.049 ($p < 0.10$). La régression linéaire du débit après dérivation montre plutôt une diminution moyenne du débit de $0.5720 \text{ km}^3/\text{an}^2$ avec un R^2 de 0.324 ($p < 0.01$).....	78
Figure 30. Secteur 4 : sud-ouest de la baie James. Série temporelle du ruissellement pour la période de 1951 à 2020. La pente de régression linéaire du débit est de $0.1430 \text{ km}^3/\text{an}^2$ avec un R^2 de 0.022 ($p > 0.10$).....	79
Figure 31. Secteur 5 : nord-ouest de la baie James. Série temporelle du ruissellement pour la période de 1951 à 2020. La pente de régression linéaire du débit est de $0.0260 \text{ km}^3/\text{an}^2$ avec un R^2 de 0.004 ($p > 0.10$).....	80
Figure 32. Secteur 6 : ouest de la baie James dans la baie d'Hudson. Série temporelle du ruissellement pour la période de 1951 à 2020. La pente de régression linéaire du débit est de $0.0041 \text{ km}^3/\text{an}^2$ avec un R^2 de 0.0001 ($p > 0.10$).	81
Figure 33. Précipitation nette annuelle moyenne par période de 10 ans par secteur. Les débits sont divisés par l'aire du bassin versant. Les modifications de l'aire des bassins versant pour le développement hydro-électrique ont été prises en considération. Les barres d'erreur représentent ± 1 erreur type.	83
Figure 34. Baie James (secteurs 0 et 2 à 5) : série temporelle de 1951 à 2020 des débits annuels de ruissellement, précipitations et évaporation en incluant et en excluant les dérivations de bassins versants (axe Y de gauche) et les précipitations nettes (en noir) en m/an (axe Y de droite). Des régressions linéaires ont été calculées pour les différentes séries temporelles. Le détail des pentes, moyennes et écarts types est résumé au Tableau 11. À noter que l'effet des remplissages de réservoir a été ajouté à la valeur de débit de ruissellement réel.	87
Figure 35. Débits annuels du ruissellement, des précipitations totales et de l'évaporation excluant et incluant les dérivations de bassin versant pour la période de 1951 à 2020 sur l'ensemble des secteurs 0 à 6. La valeur des pentes de régression linéaire et leur R^2 sont présentées dans le Tableau 12.	90
Figure 36. Hauteurs d'eau du ruissellement réel, des précipitations totales et de l'évaporation pour la période de 1951 à 2020 sur l'ensemble des secteurs 0 à 6. Les pentes de ruissellement, précipitation et évaporation en hauteur d'eau (mm/an^2) sont présentées au Tableau 12 avec leur R^2 respectif.	92
Figure 37. Débit de ruissellement annuel moyenné par décennie entre 1951 et 2020 avec et sans les dérivations et remplissage de réservoirs. Le graphique du	

haut présente les données pour la baie James (secteurs 0 et 2-5) alors que celui du bas considère l'ensemble de la baie James et de ses environs entre les bassins versants des rivières Winisk et Grande rivière de la Baleine. Les barres d'erreurs représentent ± 1 erreur type.	96
Figure 38. Série temporelle du débit annuel du ruissellement à l'est (secteurs 2 et 3) et à l'ouest (secteurs 4 et 5) de la baie James avec et sans dérivations. Le détail des pentes de régression linéaire et coefficients de détermination est explicité au Tableau 14.	98
Figure 39. Régression entre le débit annuel de ruissellement de l'est et celui de l'ouest de la baie James en excluant l'effet des dérivations pour chaque année hydrologique entre 1951 et 2020. La formule de la régression linéaire est : Débit de l'est = $0.6288 * \text{Débit de l'ouest} + 95.8046$. Le R^2 est de 0.398 ($p < 0.01$).	99
Figure 40. Séries temporelles des précipitations nettes (précipitation + évaporation en valeur négative) sur l'ensemble de la baie James (secteur 0, 2 à 5) perçues à chaque mois pour la période de 1951 à 2020 avec et sans dérivations de bassin versant. Mois de janvier à avril. Les valeurs des pentes et coefficients de détermination sont regroupées dans le Tableau 15.....	101
Figure 41. Suite de la Figure 40 pour mai à août. Les valeurs des pentes et coefficients de détermination sont regroupées dans le Tableau 15.....	102
Figure 42. Suite de la Figure 40 pour septembre à décembre. Les valeurs des pentes et coefficients de détermination sont regroupées dans le Tableau 15.....	103
Figure 43. Moyenne mensuelle des précipitations nettes sur la période de 1950 à 2019 en années civiles pour la zone d'étude selon la modélisation par ERA5. Chaque pixel est une tuile du modèle ERA5.....	105
Figure 44. Cartes topographiques de la baie James à deux échelles (source des données https://:fr-ca.topographic-map.com). On remarque l'escarpement croissant à l'est et la topographie plus plane à l'ouest.	122
Figure 45. Comparaison des débits annuels moyens de rivières (années civiles) (en km^3/an) pour les périodes 1964-1973, 1974-1983, 1984-1993, 1994-2003 et 2004-2013 mesurés par Déry et al. (2016) (en bleu) et à partir du modèle ERA5 calibré (orange) pour les rivières Winisk, Ekwan, Attawapiskat, Albany, Moose, Harricana, Nottaway. Les barres d'erreur représentent ± 1 erreur type.	128
Figure 46. Comparaison des débits annuels moyens de rivières (années civiles) (en km^3/an) pour les périodes 1964-1973, 1974-1983, 1984-1993, 1994-2003 et 2004-2013 mesurés par Déry et al. (2016) (bleu) et à partir du modèle	

ERA5 calibré (orange) pour les rivières Broadback, Rupert, Pontax, Eastmain, La Grande et Grande rivière de la Baleine. Les barres d'erreur représentent ± 1 erreur type.	129
Figure 47. Débits annuels moyens par période de 10 ans entre 1964 et 2013 sur l'ensemble des 13 rivières modélisées par ERA5 en fonction des débits obtenus par Déry et al. (2016). La droite noire présente ce que serait une relation parfaite alors que la régression linéaire est affichée en pointillé bleu. Notez que l'écart entre les deux modèles est plus important en proportion des volumes plus faibles pour les rivières ayant un faible débit (inférieure à 20 km ³ /an).	130
Figure 48. Débit annuel (année hydrologique) mesuré à la station 05UF007 située à proximité de l'embouchure de la rivière Nelson. Il faut noter que cette station ne contenait aucun flag et qu'une donnée manquante (19 janvier 2010) a été estimée en calculant la moyenne du jour précédent et du jour suivant (4040 m ³ /s).	135
Figure 49. Débit de ruissellement annuel mesuré à la station 04CC001 située à proximité de l'embouchure de la rivière Severn.	136
Figure 50. Modèle de prévision linéaire des précipitations, de l'évaporation et du ruissellement basé sur la période de 1951 à 2020 en assumant les dérivations actuelles pour toute la période et aucun remplissage de réservoir.	142
Figure 51. Modèle de prévision linéaire des précipitations, de l'évaporation et du ruissellement basé sur la période de 1976 à 2020 en assumant les dérivations actuelles pour toute la période et aucun remplissage de réservoir.	143
Figure 52. a) Tendances annuelles des précipitations totales de 1948 à 2012 [% (65 ans) ⁻¹]. Les zones où les tendances sont significatives à 0.05 sont marqués par des points. b) Anomalies de précipitations annuelles pour le Canada de 1948 à 2012. La ligne noire est une moyenne mobile de 11 années, tiré de Vincent et al. (2015).	144
Figure 53. Prévision des changements de précipitations annuelles par rapport au niveau de 1986 à 2005 selon les scénarios RCP2.6 (gauche) et RCP8.5 (droite) pour la période de 2031 à 2050, tiré de Zhang et al. (2019).	145
Figure 54. Grande rivière de la Baleine, série temporelle du débit mesuré à la station hydrométrique et débit modélisé par ERA5.	163
Figure 55. Grande rivière de la Baleine, débit annuel modélisé par ERA5 en fonction du débit observé à la station hydrométrique.	164

Figure 56. Grande rivière de la Baleine, erreurs relatives sur les données ERA5 par rapport à la station hydrométrique.	165
Figure 57. Rivière Pontax, série temporelle du débit mesuré à la station hydrométrique et débit modélisé par ERA5.	166
Figure 58. Rivière Pontax, débit annuel modélisé par ERA5 en fonction du débit observé à la station hydrométrique.....	167
Figure 59. Rivière Pontax, erreurs relatives sur les données ERA5 par rapport à la station hydrométrique.....	168
Figure 60. Rivière Broadback, série temporelle du débit mesuré à la station hydrométrique et débit modélisé par ERA5.	169
Figure 61. Rivière Broadback, débit annuel modélisé par ERA5 en fonction du débit observé à la station hydrométrique.....	170
Figure 62. Rivière Broadback, erreurs relatives sur les données ERA5 par rapport à la station hydrométrique.....	171
Figure 63. Rivière Nottaway, série temporelle du débit mesuré à la station hydrométrique et débit modélisé par ERA5.	172
Figure 64. Rivière Nottaway, débit annuel modélisé par ERA5 en fonction du débit observé à la station hydrométrique.....	173
Figure 65. Rivière Nottaway, erreurs relatives sur les données ERA5 par rapport à la station hydrométrique.....	174
Figure 66. Rivière Moose, série temporelle du débit mesuré à la station hydrométrique et débit modélisé par ERA5.	175
Figure 67. Rivière Moose, débit annuel modélisé par ERA5 en fonction du débit observé à la station hydrométrique.....	176
Figure 68. Rivière Moose, erreurs relatives sur les données ERA5 par rapport à la station hydrométrique.....	177
Figure 69. Rivière Albany, série temporelle du débit mesuré à la station hydrométrique et débit modélisé par ERA5.	178
Figure 70. Rivière Albany, débit annuel modélisé par ERA5 en fonction du débit observé à la station hydrométrique.....	179
Figure 71. Rivière Albany, erreurs relatives sur les données ERA5 par rapport à la station hydrométrique.....	180

Figure 72. Rivière Attawapiskat, série temporelle du débit mesuré à la station hydrométrique et débit modélisé par ERA5.	181
Figure 73. Rivière Attawapiskat, débit annuel modélisé par ERA5 en fonction du débit observé à la station hydrométrique.	182
Figure 74. Rivière Attawapiskat, erreurs relatives sur les données ERA5 par rapport à la station hydrométrique.	183
Figure 75. Rivière Ekwan, série temporelle du débit mesuré à la station hydrométrique et débit modélisé par ERA5.	184
Figure 76. Rivière Ekwan, débit annuel modélisé par ERA5 en fonction du débit observé à la station hydrométrique.	185
Figure 77. Rivière Ekwan, erreurs relatives sur les données ERA5 par rapport à la station hydrométrique.	186
Figure 78. Rivière Winisk, série temporelle du débit mesuré à la station hydrométrique et débit modélisé par ERA5.	187
Figure 79. Rivière Winisk, débit annuel modélisé par ERA5 en fonction du débit observé à la station hydrométrique.	188
Figure 80. Rivière Winisk, erreurs relatives sur les données ERA5 par rapport à la station hydrométrique.	189
Figure 81. Pour chaque année hydrologique entre 1951 et 2020 inclusivement, débits annuels de ruissellement de l'est (secteurs 2 et 3) en fonction des débits annuels de ruissellement de l'ouest (secteurs 4 et 5) en incluant l'effet des dérivations de bassin versant. La formule de la régression linéaire est : Débit de l'est = 0.7161 * Débit de l'ouest + 96.4969. Le R ² est de 0.336 (p<0.01).	190

INTRODUCTION GÉNÉRALE

IMPACT DES AMENAGEMENTS HYDRO-ELECTRIQUES

La baie James, cette grande étendue d'eau bordant le nord du Québec et de l'Ontario, est la petite voisine du sud de la baie d'Hudson. Elle passe souvent inaperçue en comparaison de cette dernière. Et pourtant, le débit annuel d'eau douce pour la baie James est de 346.7 km³, correspondant à 45% des apports d'eau douce de toute la baie d'Hudson, alors que son bassin versant ne représente en superficie que 22% de celui de la baie d'Hudson (Prinsenberg, 1980, 1986; Leblond et al., 1996). Cette différence s'explique par les régimes globaux des systèmes atmosphériques d'ouest en est (Prinsenberg, 1980, 1986) et témoigne de l'intérêt particulier de cette zone pour le développement hydroélectrique. Le territoire de la baie James a d'ailleurs subi plusieurs dérivations de cours supérieurs de rivières en direction de la Grande Rivière afin de développer son potentiel hydro-électrique dans le cadre du « Projet de la baie James ».

Le projet de la baie James s'est effectué en trois phases (respectivement de 1978 à 1984, de 1983 à 1993 et de 2005 à 2009) (Société d'énergie de la Baie James, 1987, 1996; Hydro-Québec, 2011). Seules les phases 1 et 3 ont impliqué des dérivations de bassins versants. Les sections amonts des rivières Caniapiscau, Grande rivière de la Baleine et Eastmain ont été dérivée pendant la Phase 1 et celle de la rivière Rupert l'a été lors de la Phase 3 vers la Grande Rivière. Par ailleurs, le remplissage de plusieurs réservoirs a temporairement diminué le débit de ruissellement perçu à l'embouchure de la baie James. Au sein de la Grande Rivière, on dénombre selon l'ordre chronologique, les réservoirs Robert-Bourassa (LG2), La Grande 3, La Grande 4, Laforge 1 et La Grande 1; dans la rivière Eastmain, les réservoirs Opinaca (EOL) et Eastmain 1; dans la rivière Caniapiscau, le réservoir Caniapiscau; dans la Grande rivière de la Baleine, le réservoir Laforge 2; dans la

rivière Rupert, les biefs Rupert (pour de plus amples détails, voir la section 1.3.1 et le Tableau 4).

En parallèle du développement hydro-électrique, le milieu subi également l'impact des changements climatiques (Vincent et al., 2015). Or les changements de salinité ont des impacts profonds sur le milieu côtier. L'arrivée d'eau douce en provenance du continent influence la stratification de la colonne d'eau, la salinité, le matériel organique dissous et particulaire et la répartition des communautés benthiques marines (Carrier-Belleau et al., 2021). Elle joue aussi un rôle important pour certaines espèces, comme la zostère marine qui entre dans l'alimentation de la bernache du Canada (Stewart et Lockhart, 2005), et pour la création de modèles biogéochimiques (Hoshiba et al., 2021).

La question se pose donc de comprendre comment l'impact de l'humain altère le milieu de la baie James, d'abord par les modifications anthropiques du bassin versant de la Baie et ensuite par l'effet des changements climatiques. Toutefois, pour comprendre cette question, il importe aussi de mieux comprendre le cycle général de l'eau douce de la Baie. De manière générale, ce cycle est résumé à la Figure 1.

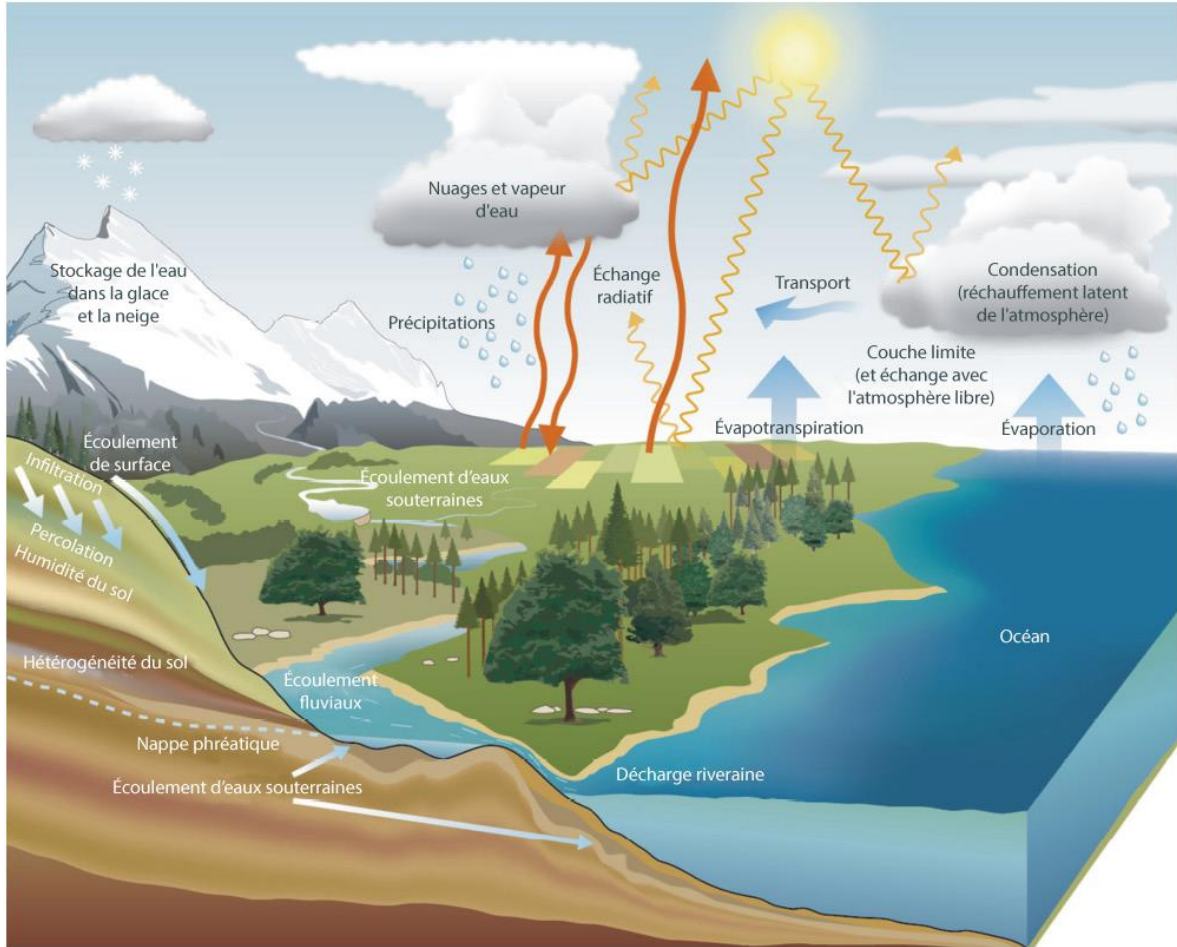


Figure 1. Cycle de l'eau douce, tiré de Bush et Lemmens (2019).

PRÉSENTATION GÉNÉRALE DE LA BAIE JAMES

La baie James possède un bassin versant de 690 468 km² auquel on peut ajouter la baie James en elle-même faisant 72 240 km² (en incluant les îles, dont l'île Akamiski). Il faut aussi tenir compte des dérivations pour développer le potentiel hydro-électrique de la Grande Rivière. La partie supérieure du bassin de la rivière Caniapiscau a été dérivée vers la Grande Rivière en 1981 (Société d'Énergie de la Baie James, 1987) ainsi qu'une petite partie du bassin versant de la Grande rivière de la Baleine pour des apports respectifs de 38 784 km²

et 1 722 km². À noter que nous indiquons ici les superficies de bassin versant qui ont été estimées dans la présente étude.

Les apports d'eau douce de la baie James ont été réduits par trois détournements du bassin versant de la rivière Albany vers le lac Supérieur à des fins de production d'hydro-électricité, totalisant une perte d'apport d'eau douce de 7.8 km³/an (Noone, 2006). Ces détournements ayant été complétés avant la fin des années 1950, ils ne sont pas comptabilisés dans l'aire totale du bassin de la baie James mentionnée plus haut.

La circulation générale des courants de surface de la baie James est caractérisée par les eaux entrant au nord-ouest dans la Baie et en ressortant au nord-est (Figure 2). À plus grande échelle, il existe un courant de surface vers le sud-est longeant la côte sud-ouest de la baie d'Hudson en direction de la baie James (Figure 3), ce qui laisse présager que des rivières se jetant sur la côte ouest de la baie d'Hudson, comme la rivière Nelson, contribuent aux apports d'eau douce de la baie James. Pour les rivières de la baie d'Hudson à l'ouest de la baie James pouvant jouer un rôle dans la circulation d'eau douce de cette dernière, notons d'ouest en est les rivières Nelson (93.4 km³/an), Hayes (21.2 km³/an), Severn (23.6 km³/an) et Winisk (16.9 km³/an) (Leblond et al., 1996) (se référer à la Figure 4 pour la localisation de ces rivières au sein de leur bassin versant).

En ce qui concerne l'apport d'eau douce directement à la baie James, en suivant la côte d'ouest en est (Figure 4), on dénombre notamment les rivières Ekwan (débit moyen de 5.7 km³/an), Attawapiskat (14.8 km³/an), Albany (34.6 km³/an), Moose (41.9 km³/an), Harricana (23.4 km³/an), Nottaway-Broadback-Rupert (78.9 km³/an avant la dérivation), Eastmain (3.9 km³/an après la dérivation), La Grande (106.2 km³/an avec les dérivations d'Eastmain et Caniapiscau) et Roggan (4.0 km³/an), les autres rivières contribuant pour leur part à un débit total de 33.3 km³/an (Leblond et al., 1996).

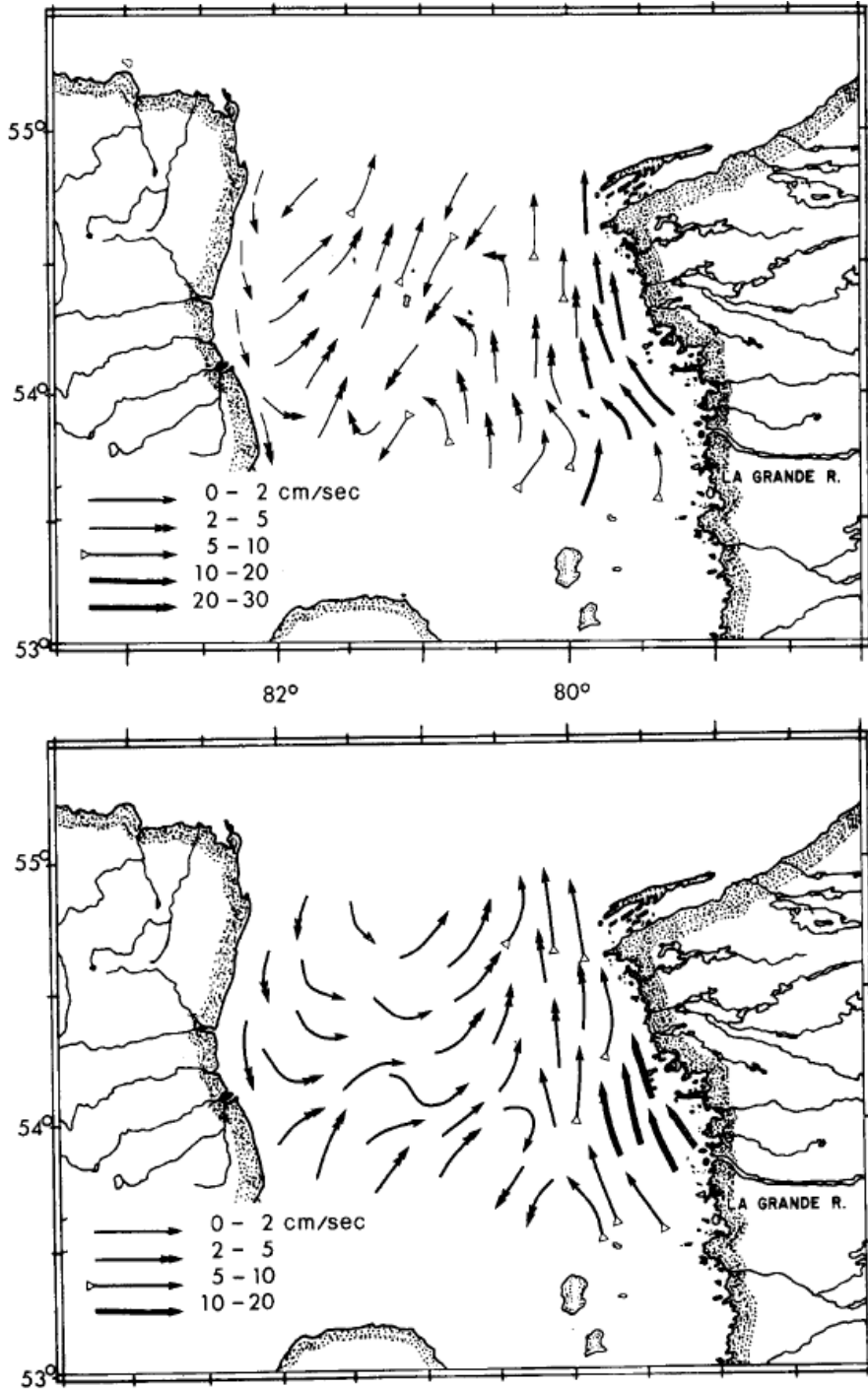


Figure 2. Courant de surface moyen mensuel au nord de la baie James antérieur au développement hydroélectrique pour les années 1972-1973 pour les mois d'août et d'octobre respectivement, tiré d'El-Sabh et Koutitonsky (1977).

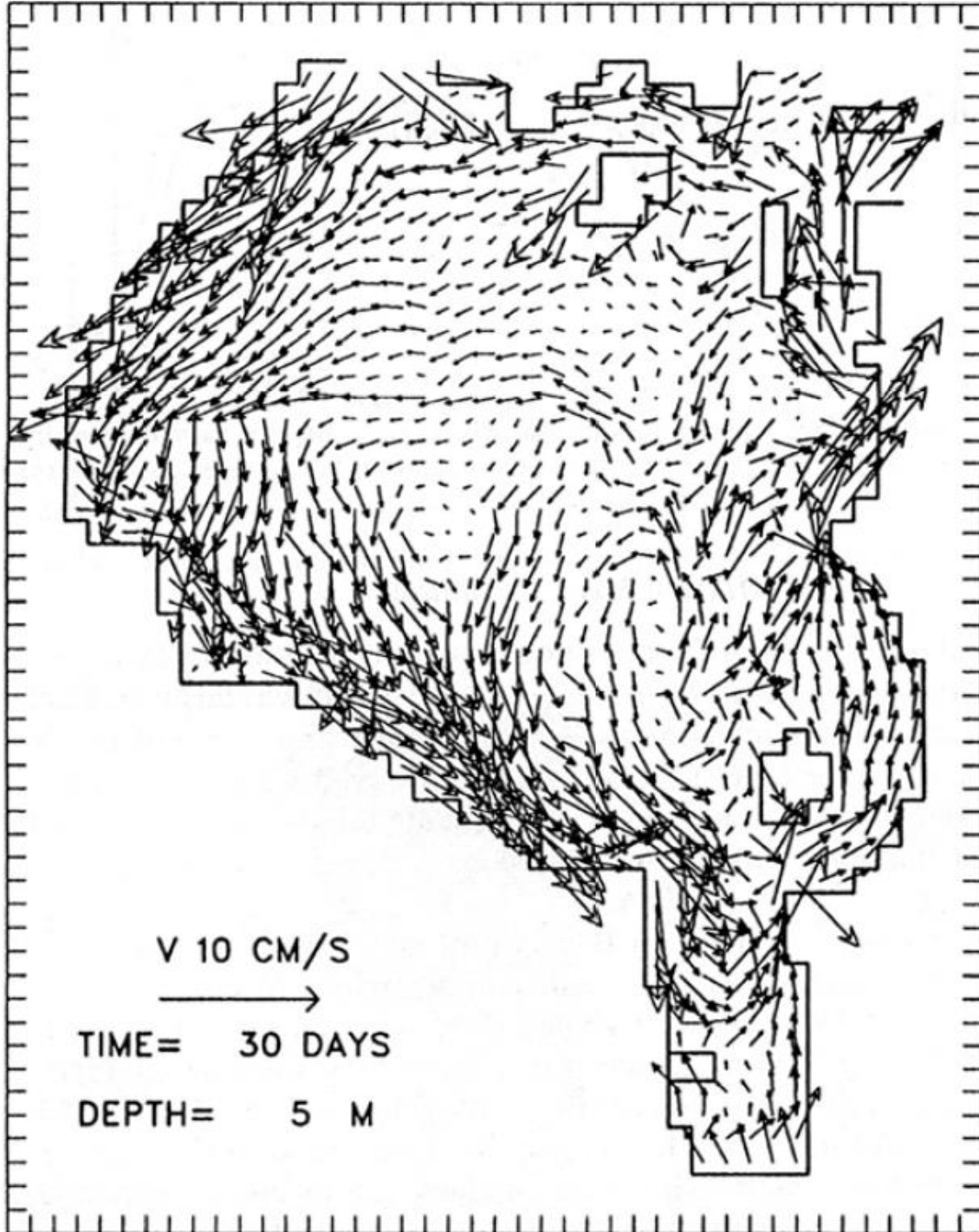


Figure 3. Circulation estivale moyenne des courants de surfaces dans les baies d'Hudson et James, tiré de Stewart et Lockhart (2005).



Figure 4. Délimitation des bassins versants des rivières dont l'embouchure se situe dans la baie James ou dans ses pourtours immédiats (voir Tableaux 1-3 pour les IDs des bassins versants de rivières).

Malheureusement, les débits de rivière de la région demeurent méconnus. Ce que l'on sait provient des stations hydrométriques et des estimations pour combler les vides dans la zone d'étude. Or, ces stations sont rarement situées à l'embouchure des rivières et elles ne fonctionnent pas toujours en continu; il y a donc des données manquantes, parfois sur de longue période de temps. De plus, des valeurs ont subi des correctifs aux stations (voir la

section 1.5.2). Par ailleurs, ces stations n'ont pas été installées ou maintenues sur plusieurs rivières se jetant dans la baie James, en particulier du côté du Québec (Environnement Canada, 2015).

VARIATIONS SAISONNIÈRES

Prinsenbergh (1977, 1986) note que le débit annuel total de l'ensemble des rivières de la baie James est très faible pendant l'hiver (autour de 5 000 m³/s), puis augmente jusqu'à un pic printanier en mai (plus de 20 000 m³/s) suivi par un régime moyen entre juillet et septembre avoisinant 10 000 m³/s. La moyenne du débit pour l'année type est de 10 000 m³/s.

En hiver, la baie James se couvre entièrement de glace. L'épaisseur de la couche de glace moyennée mensuellement pour la période 2003-2016 atteint son maximum en mars avec un couvert de 1.66 m d'épaisseur, équivalent à 1.51 m d'eau, ce qui correspond à un stockage mensuel maximal de 103 km³ (Landy et al., 2017). En avril, 68 km³ d'eau douce demeure sous forme de glace, générant lors de la fonte une couche d'eau douce estivale évaluée à 1.07 m d'épaisseur (Landy et al., 2017). Il y a une grande variabilité interannuelle de la temporalité des saisons (période du début et de la fin des glaces), accentuée par les changements climatiques, qui mériterait d'être approfondie. Toutefois, la présente étude ne s'intéressera que peu aux variabilités saisonnières pour se concentrer sur les apports d'eau douce sur une base annuelle, faisant ainsi peu de cas des gels saisonniers.

Le modèle 3D glace-océan de Saucier et al. (2004) montre une forte variabilité saisonnière de la salinité de surface pour l'année 1996-1997 sur l'ensemble des baies d'Hudson et James (Figure 5). Prinsenbergh (1982) constate la présence d'un fort gradient de salinité est-ouest et sud-nord dans la baie James (Figure 6). On observe néanmoins que se sont principalement les panaches des rivières du sud de la baie James et la Grande Rivière qui causent les plus forts gradients horizontaux de salinité. Le mouvement des eaux plus salées de la baie d'Hudson est également visible alors qu'ils entrent à l'ouest de la Baie tel que démontré par Saucier et al. (2004) pour l'année 1996-1997. Pour la même période, Saucier et al. (2004) démontrent aussi la forte circulation d'eau plus douce à partir de la rivière

Nelson formant un corridor d'eau saumâtre s'accroissant aux rivières Severn et Winisk pour se jeter dans la baie James. Les apports d'eau plus douce de la rive sud de la baie d'Hudson sont au plus fort pour les mois d'avril, mai et juin 1997, mais l'effet demeure visible sur toute l'année. Prinsenberg (1982, 1986) observe aussi les très forts débits d'eau plus douce en provenance de la Grande Rivière en hiver (la salinité de surface est de 10 psu à proximité de l'embouchure de cette rivière alors qu'elle est supérieure à 31 psu au nord-ouest de la Baie). En été, après la crue printanière, le gradient de salinité est moindre avec des salinités variant de 10 psu au sud-est à 24 psu au nord-ouest (Ingram et Prinsenberg, 1998).

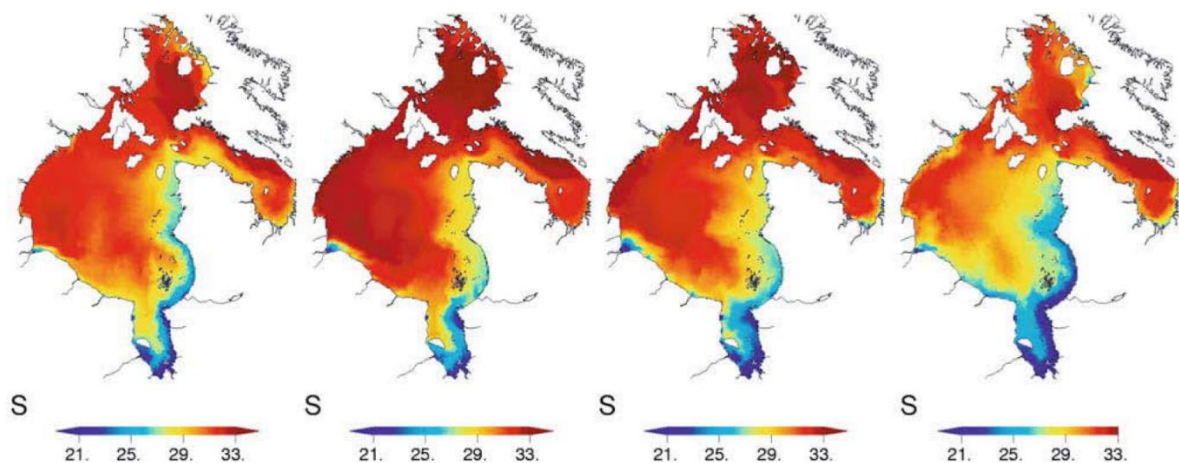


Figure 5. Moyenne saisonnière de la salinité de surface (psu) dans le système de la baie d'Hudson pour l'année 1996-1997 (ou l'année hydrologique 1997). La première image représente l'automne avec les mois d'octobre, novembre et décembre 1996, la seconde, les mois d'hiver avec janvier, février et mars 1997, la troisième, les mois du printemps avec avril, mai et juin 1997 et la dernière, les mois d'été avec juillet, août et septembre 1997), tiré du modèle 3D de Saucier et al. (2004).

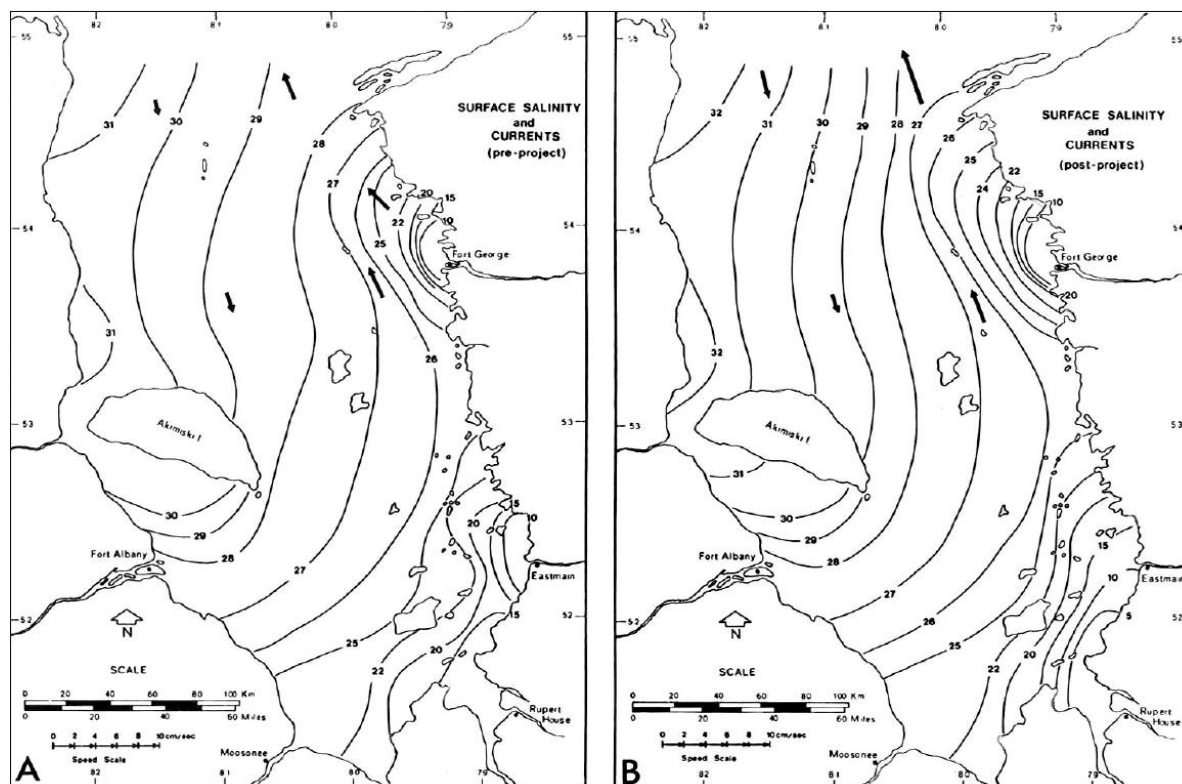


Figure 6. Distribution de salinité de surface hivernale et magnitude des courants de surface de la baie James tel que mesurées (A) avant les développements hydroélectriques et (B) prédit après ces développements, tiré de Prinsenberg (1982).

ÉCOULEMENTS SOUS-TERRAINS

Comme en témoigne Orlova et Branfireun (2014), les connaissances sont lacunaires sur les eaux souterraines de la région de la baie James et de la baie d'Hudson. La contribution de l'eau souterraine à la circulation de l'eau douce varie beaucoup. Durant l'hiver, les sols gelés laissent présager de plus faibles apports des eaux souterraines. Toutefois, cela pourrait changer avec le réchauffement du climat qui augmente la quantité et le cycle saisonnier de la circulation d'eau souterraine. Outre la température, l'humidité fait également grandement varier la circulation de l'eau souterraine comme en témoigne la Figure 7 pour le sous-bassin versant de la rivière Nayshkootayaow, un affluent mineur de la rivière Attawapiskat. Pour un sol sec, la contribution de l'eau souterraine est doublée par rapport à un sol humide. Par

ailleurs, Orlova et Brandireun (2014) atteste d'une relation positive entre l'aire d'un bassin versant et la proportion d'eau souterraine dans le ruissellement total. Toutefois, cet aspect ne s'applique qu'en partie pour de très grands bassins versants où l'eau souterraine a largement le gradient altitudinal requis et le temps pour rejoindre l'affluent principal comme ceux que nous étudions. À noter que l'étude d'Orlova et Brandireun (2014) ne s'intéresse qu'aux basses terres de la baie James et à des bassins versants relativement petits en comparaison de ceux que l'on étudie. La différence d'échelle ne permet donc pas de généraliser le comportement de l'eau souterraine. Par ailleurs, l'apport de l'eau souterraine est très différent dans des zones où les reliefs topographiques sont importants. À noter aussi que l'eau souterraine ne le demeure pas durant tout son parcours jusqu'à la mer et qu'elle alimente également les rivières. Au regard du manque de données à ce sujet, il est difficile de déterminer avec quelle proportion l'eau échappe à la détection aux stations hydrométriques. Nous assumons que cette proportion est faible étant donné la forte topographie de la majorité des bassins de rivières étudiés sur la plus grande partie de leur aire ainsi que leur longueur permettant à l'eau souterraine de rejoindre les lacs et les rivières en amont des stations hydrométriques. L'apport des eaux souterraines semble plus important pour les basses-terres de la baie James. Ce qui n'affecte pas les valeurs observées aux stations hydrométriques puisqu'elles se trouvent généralement en amont de cette zone (voir la Figure 13). Il n'en demeure pas moins que beaucoup de travail reste à faire pour améliorer nos connaissances de ce phénomène méconnu et de son implication dans la baie James.

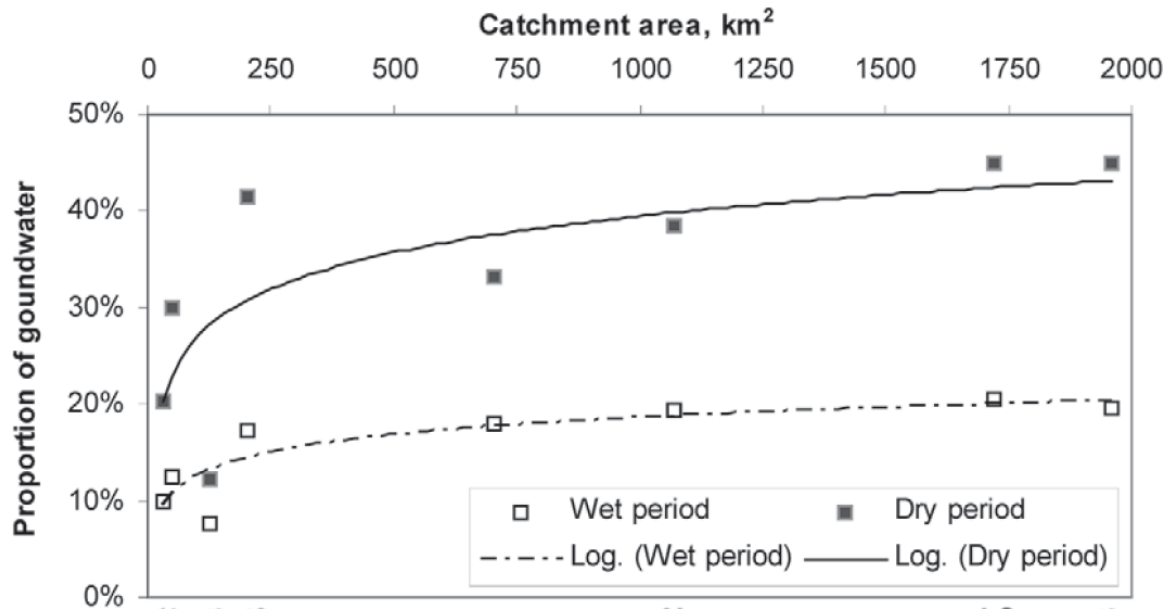


Figure 7. Relation entre la contribution relative des eaux souterraines à la circulation totale de l'eau et l'aire de bassins versants pour une période humide et sèche pour le sous-bassin versant de la rivière Nayshkootayaow, un affluent mineur de la rivière Attawapiskat, tiré d'Orlova et Branfireun (2014).

TRAVAUX ANTÉRIEURS SUR LE DÉBIT DES RIVIÈRES

Les informations dans la littérature récente s'intéressant spécifiquement aux débits de rivières à la baie James sont rares. El-Sabh et Koutitonsky (1977) s'intéressent à l'océanographie de la baie James en incluant certains débits de rivières mensuels de la Baie sur la période de 1964 à 1973. Prinsenber (1982) s'intéresse quant à lui au profil de salinité de la Baie alors que les bassins versants sont dérivés à l'est pour le développement hydro-électrique. Prinsenber (1984; 1986) poursuivront dans cette lancée en portant une attention particulière à la baie James. Certains travaux se sont intéressés à la région recouvrant la baie d'Hudson et la baie James. Déry et Wood (2005) et Déry et al. (2016) se sont intéressés aux débits de rivières de tout le nord du Canada tandis que Déry et al. (2011, 2018) ont étudié la variabilité spatio-temporelle des apports d'eau douce entre 1964 et 2013. Les articles de Prinsenber (1977, 1980) sont parmi les premiers traitant des débits de ruissellement aux

baies James et d'Hudson, mais ceux-ci n'y sont présentés que globalement sur l'ensemble des Baies. Enfin, Saucier et al. (2004) s'intéressent aux impacts de l'anthropisation de la baie James et de la baie d'Hudson, aux profils de salinité, à la glace de mer et aux apports d'eau douce dans ces deux Baies. Tel que mentionné plus haut, ces auteurs utilisent principalement les relevés de débits de rivières prélevés aux stations hydrométriques du Canada. Ces données sont limitées temporellement et géographiquement, ce qui rend difficile la compréhension du régime de ruissellement de la baie James. Il semble donc impératif d'établir une base claire et exhaustive du débit des rivières affluents dans la baie James. Cette base devra également considérer la période antérieure au développement hydroélectrique pour comprendre le régime hydrologique naturel de la Baie. Il sera tout aussi nécessaire d'inclure les aires non jaugées en plus des rivières principales, c'est-à-dire les zones où l'eau s'achemine directement dans la Baie sans passer par une rivière de moyenne ou grande importance.

Lorsqu'il existe peu de stations météorologiques enregistrant les précipitations dans un bassin versant, comme c'est le cas pour la baie James, l'utilisation d'un modèle de réanalyse atmosphérique pour obtenir les précipitations est une approche intéressante (Correa et al., 2017). Le débit horaire ou quotidien des rivières peut être reproduit avec des modèles hydrologiques (Lane et al., 2019), mais ceux-ci requièrent beaucoup d'informations détaillées sur les sols et le réseau hydrographique qu'il n'est pas toujours possible d'obtenir pour des grands bassins versants. Toutefois, pour étudier à long terme des débits annuels, une approche plus simple reliant les quantités annuelles de précipitations et d'évaporation (incluant l'évapotranspiration) au ruissellement peut être utilisée (Dai et Trenberth, 2002).

INFLUENCE DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES

Outre les modifications anthropiques de l'écoulement des rivières, il sera également important de considérer les changements climatiques dans l'équation. Ainsi, une hausse des précipitations de 19% a déjà été observée entre 1948 et 2012 sur tout le Canada et a fortiori vers le nord. Toutefois, une grande variabilité subsiste quant à la répartition de cette hausse, celle-ci étant plus forte dans l'Arctique canadien et dans une moindre mesure sur l'ensemble

de la baie d'Hudson. Les pourtours de la baie James semblent n'avoir subi qu'une hausse ne dépassant pas les 10 % sur la même période et cette hausse ne serait pas significative sur une grande portion du bassin versant de la baie James. A contrario, une petite portion de terre directement au sud de la Baie a même subi une diminution significative de ses précipitations (Vincent et al., 2015). Pour la même période, la température a quant à elle augmenté d'une moyenne de 1.5 °C sur l'ensemble du pays avec des réchauffements accrus en hiver et au printemps (Vincent et al., 2015).

Le rapport IPCC (2014) indique qu'entre 1901 et 2010, le niveau de la mer est monté de 0.19 ± 0.02 m. La concentration atmosphérique de CO₂ est passée de 280 ppm vers 1850 à plus de 400 ppm. La moitié du CO₂ anthropique émis entre 1750 et 2011 est survenu dans les 40 dernières années de ce cycle. Le forçage radiatif a augmenté de 2 W/m² par rapport au niveau de 1750. La température de l'air a quant à elle augmenté globalement de 0.7°C entre 1951 et 2010. Outre la température moyenne, les extrêmes de températures sont également plus fréquents et plus intenses. Les extrêmes de débits quotidiens de rivière sont tout autant en hausse ainsi que ceux des épisodes de précipitations importantes.

Les changements climatiques affectent grandement la baie James et la baie d'Hudson. Entre 2012 et 2064, la température de ces Baies devrait monter de 0.22 ± 0.08 °C par décennie (Lukovich et al., 2021) selon le scénario du GIEC RCP4.5 (forçage radiatif de 4.5 W/m² d'ici l'année 2100) et de 0.31 ± 0.07 °C selon le schéma RCP8.5. La hausse atteindrait même 4.8 ± 1 °C pour le sud-est de la baie James selon le RCP8.5 pour la période de 2046-2065 par rapport à la période de 1986-2005. Cette zone serait sujette à un réchauffement plus fort en été et en automne. Ces hausses de température entraîneraient une diminution de la concentration moyenne de glace de mer de 11.6% (RCP4.5) et 15.6% (RCP8.5) entre les périodes susmentionnées. La saison libre de glace augmenterait quant à elle d'un mois. L'épaisseur de la glace sera également diminuée d'une valeur de 60 % pour la section nord-est de la baie d'Hudson (Lukovich et al., 2021).

Les dérivations de bassin versant ont des effets qui diffèrent de ceux induits par les changements climatiques. L'augmentation des apports d'eau douce par détournement des

rivières faciliterait la formation de glace aux abords des panaches de rivières. Le débit hivernal est également augmenté par les relâchements massifs d'eau douce pour la production d'électricité (Lukovich et al., 2021). Ces relâchements encourageraient la formation hâtive de la pycnocline au printemps, ce qui diminuerait la température et la salinité de surface. L'isolation des eaux de surface des eaux plus chaudes des profondeurs en combinaison du gel à la surface stimulerait une plus forte formation de glace. La tendance s'inverserait l'été du fait de la réduction des apports d'eau douce (Lukovich et al. 2021).

OBJECTIFS

L'objectif principal de cette maîtrise est de mieux comprendre la variabilité spatio-temporelle des apports d'eau douce à la baie James sur une base annuelle de 1951 à 2020. Cette étude permettra d'améliorer la connaissance générale de cette zone et de déterminer les évolutions durant les dernières décennies en relation avec les changements climatiques. L'impact des dérivations de rivières du projet hydro-électrique de la baie James sur les débits annuels pourra aussi être mis en évidence. Ces informations sont essentielles pour le développement de nouveaux modèles 3D glace-océan de la baie James et de la baie d'Hudson et améliorer les connaissances du cycle de l'eau douce de la baie James. Les quatre objectifs spécifiques suivants seront approfondis :

- 1) valider l'utilisation des données du modèle de réanalyse ERA5 pour estimer l'apport en eau douce à la baie James en comparant les débits annuels calculés avec les débits annuels mesurés par station hydrométrique;
- 2) tester l'hypothèse selon laquelle il n'y a pas de variation à long terme (depuis 1951) de l'apport d'eau douce à la baie James;
- 3) examiner l'évolution décennale en comparant l'apport d'eau douce à la baie James entre sept périodes de 10 ans de 1951 à 2020;

4) tester l'hypothèse selon laquelle il n'y a pas de différence entre l'apport d'eau douce du côté ouest et du côté est de la baie James pour la période de 1951 à 2020. Évaluer également les tendances spatiales à long terme de l'apport en eau douce pour sept secteurs (bassins versants du nord-est, du sud-est, du sud-ouest et du nord-ouest de la baie James, bassins versant des affluents à la baie d'Hudson à l'est et à l'ouest de la baie James, ainsi que baie James et îles).

CHAPITRE 1

MÉTHODOLOGIE

1.1 ZONE D'ETUDE

La zone d'intérêt couvre la baie James, ses bassins versants et les bassins versants s'écoulant dans la baie d'Hudson dans son voisinage immédiat allant de la rivière Winisk à la Grande Rivière de la Baleine inclusivement. La Figure 4 présente la localisation des bassins versants des rivières dont l'embouchure se situe dans la baie James ou ses pourtours immédiats. Les petits bassins versants et les aires non jaugées aux abords de la baie James sont présentés à la Figure 8. L'aire des bassins versants des principales rivières et les sept secteurs qui y sont associés sont indiqués dans les Tableaux 1, 2 et 3. Ces secteurs sont : (1) le sud-est de la baie d'Hudson (Grande rivière de la Baleine à la Pointe Louis-XIV; (2) le nord-est de la baie James (pointe Louis-XIV à la rivière Eastmain inclusivement); (3) le sud-est de la baie James (rivière Eastmain exclusivement à la frontière Québec-Ontario); le (4) sud-ouest de la baie James (frontière Québec-Ontario à la rivière Attawapiskat exclusivement); (5) le nord-ouest de la baie James; (6) le sud-ouest de la baie d'Hudson (de la jonction avec la baie James à la rivière Winisk inclusivement) auxquels s'ajoutent le secteur 0, représentant la baie James en elle-même, les îles non côtières et l'île Akamiski (voir Tableaux 1, 2). Aux trois secteurs de l'est s'intercalent deux zones de dérivations où les sections supérieures de certains bassins versants ont été déviées à diverses périodes dans le cadre du développement hydro-électrique de la région (voir Tableau 3). À noter que les bassins de rivières sont généralement bordés par des zones non jaugées s'écoulant directement dans les baies d'Hudson et James sans l'entremise d'une rivière. Ces zones seront traitées de la même manière que les bassins de rivières, incluant l'attribution des identifiants.

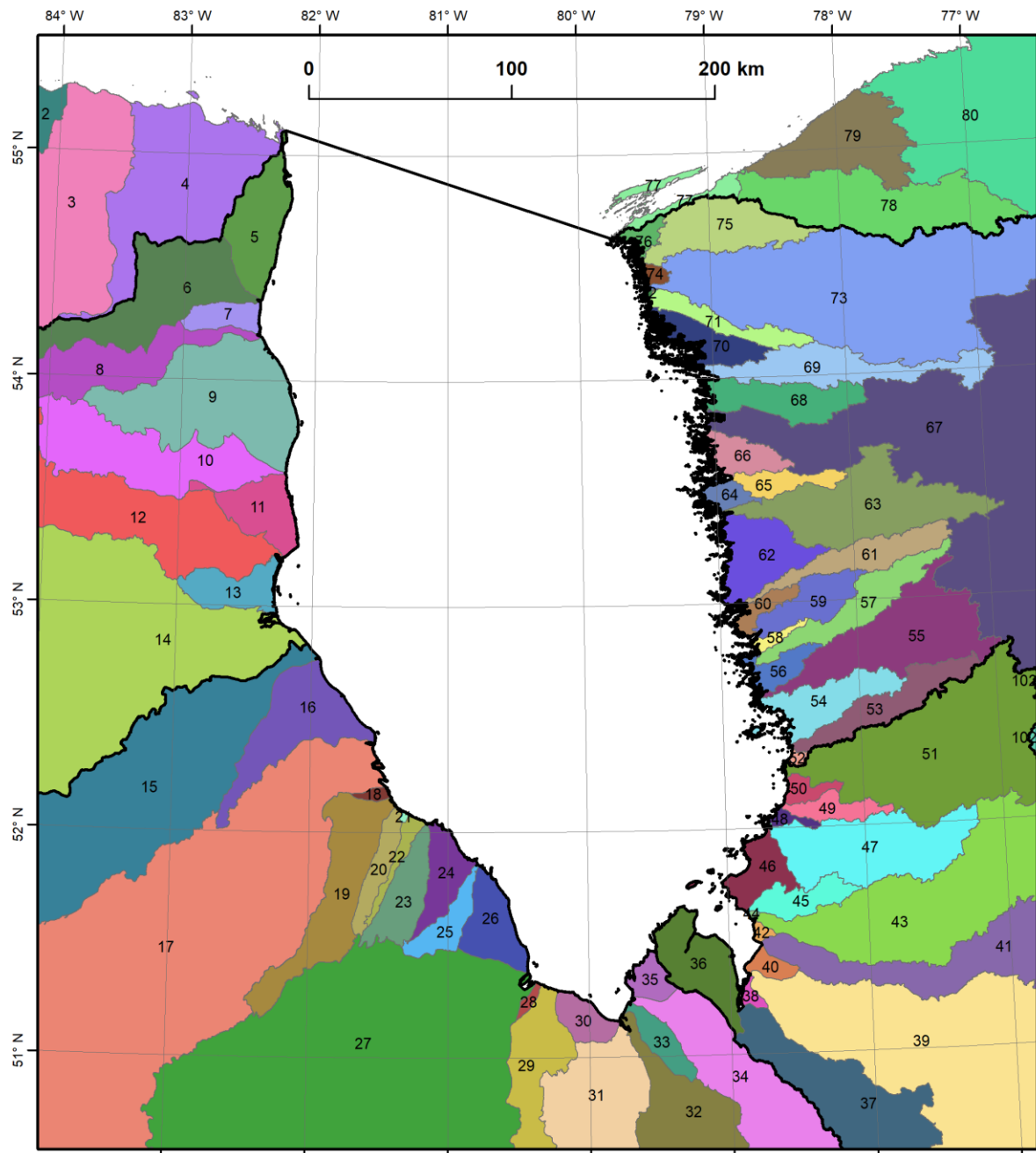


Figure 8. Agrandissement de la zone d'étude à proximité de la baie James (voir Tableaux 1-3 pour les ID des rivières).

Tableau 1. Liste des rivières étudiées et l'aire de leur bassin versant pour les secteurs 0 à 3. Les identifiants (ID) sont présentés dans la Figure 4.

Secteur	Rivière	ID	Aire du bassin versant (km ²)	Aire du secteur (km ²)
0 : baie James et îles du large (ID : 0, 81, 82)	Baie James (eau)	0	68 574	72 240
	Akamiski Island	81	3016	
	Îles du large	82	651	
1 : sud-est de la baie d'Hudson (ID : 77-80)	Vauquelin	78	3210	43 971 ^g
	Grande rivière de la Baleine	80	38 166 ^g	
	Zone non jaugée	a	2596	
2 : nord-est de la baie James (ID : 52-76)	Conn	53	1179	129 040 ^h
	du Vieux Comptoir	55	2785	
	du Peuplier	57	1209	
	Sabascunica	59	846	
	Maquatua	61	1041	
	Castor	63	2989	
	Caillet	65	471	
	La Grande	67	98 337 ^h	
	Piagochioui	69	1690	
	Kapsaouis	71	646	
	Roggan	73	9590	
	au Phoque	75	1590	
	Zone non jaugée	b	6667	
3 : sud-est de la baie James (ID : 36-51)	Nottaway	37	65 624	119 136 ^g
	Broadback	39	21 080	
	Rupert	41	11 765 ^g	
	Pontax	43	7994	
	à la Truite	45	638	
	Jolicoeur	47	2705	
	au Mouton	49	453	
	Eastmain	51	6022 ^g	
	Zone non jaugée	c	2856	

a : les aires non jaugées correspondent aux ID 77 et 79

b : les aires non jaugées correspondent aux ID 52, 54, 56, 58, 60, 62, 64, 66, 68, 70, 72, 74 et 76

c : les aires non jaugées correspondent aux ID 36, 38, 40, 42, 44, 46, 48 et 50

g : aire du bassin après la dérivation

h : aire du bassin avant la dérivation

Tableau 2. Liste des rivières étudiées et l'aire de leur bassin versant pour les secteurs 4 à 6. Les identifiants (ID) sont présentés dans la Figure 4.

Secteur	Rivière	ID	Aire des bassins de rivière (km ²)	Aire totale (km ²)
4 : sud-ouest de la baie James (ID : 15-35)	Attikameg	15	14 018	278 129
	Albany	17	104 697	
	Kinosheo	19	2300	
	Nettichi	20	540	
	Kabiskaubakan	22	272	
	Lawabiskau	23	972	
	Wapiskau	25	574	
	Moose	27	107 523	
	Partridge	29	1892	
	Kesagami	31	6406	
	Harricana	32	29 452	
	Piscapecassy	33	489	
	Mississicabi	34	4208	
Zone non jaugée	d	4785		
5 : nord-ouest de la baie James (ID : 5-14)	Lakitusaki	6	2765	91 916
	Opinnagau	8	2694	
	Swan	10	2988	
	Ekwan	12	18 839	
	Attawakiskat	14	56 888	
	Zone non jaugée	e	7741	
6 : ouest de la baie d'Hudson (ID : 1-4)	Winisk	1	68 580	85 125
	Aquatuk	3	8045	
	Zone non jaugée	f	8500	

d : les aires non jaugées correspondent aux ID 16, 18, 21, 24, 26, 28, 30 et 35

e : les aires non jaugées correspondent aux ID 5, 7, 9, 11,13

f : les aires non jaugées correspondent aux ID 2 et 4

Tableau 3. Liste des bassins versants de sections de rivière dérivée. Les identifiants (ID) sont présentés dans la Figure 4.

Dérivation	Rivière d'origine vers rivière d'arrivée	ID	Aire du bassin versant (km ²)	Aire totale (km ²)
1 : dérivation du nord-est (ID : 103-104)	Grande rivière à la Baleine (80, secteur 1) vers la Grande (67, secteur 2)	103	1722	40 506
	Baie d'Ungava vers la Grande (67, secteur 2)	104	38 784	
2 : dérivation du sud-est* (ID : 101-102)	Rupert (41, secteur 3) vers la Grande (67, secteur 2)	101	31 660	72 247
	Eastmain (51, secteur 3) vers la Grande (67, secteur 2)	102	40 587	

* À noter que les dérivations des bassins des rivières Rupert et Eastmain n'ont pas eu lieu au même moment. La dérivation de la rivière Rupert survient en 2009 alors que celle de la rivière Eastmain remonte à 1980.

1.2 DELIMITATION SPATIALE DES BASSINS VERSANTS DE LA ZONE D'ETUDE

La délimitation spatiale des bassins versants s'est basée sur les polygones publiés par le Réseau hydro national (RHN). Les Shapefiles des bassins versants ont été téléchargés sur le site du Réseau hydro national – RHN – Série Géobase (<https://ouvert.canada.ca/data/fr/dataset/a4b190fe-e090-4e6d-881e-b87956c07977>) dont la documentation sur l'utilisation des données avec ArcGIS est rendue disponible par le Natural Resources Canada (2008), dans la section « Fichiers Shape pré-emballés ». Une sélection des bassins versants de la zone d'étude a d'abord été effectuée. Ensuite, les polygones des bassins versants ont été vérifiées, corrigées et ajustées aux besoins de cette étude avec le logiciel ArcMap (version 10.7.1).

Il fallait de prime abord s'assurer que la délimitation des bassins versants suivait bien le tracé de la jonction des sommets sur les cartes topographiques. Une subdivision de certains bassins versants a ensuite été opérée afin de mieux refléter la quantité d'eau reçue à leur exutoire sur les rivières principales de la zone (voir les Tableaux 1, 2 et 3 pour la liste des

bassins de rivières et de dérivations et le Tableau 4 pour les détails concernant les dérivations et le remplissage des réservoirs). À noter que l'appellation « rivière » désigne les cours d'eau qui débouchent directement dans les baies James et Hudson. Il est donc considéré que les rivières en amont portant un nom différent et convergeant vers d'autres rivières font parties intégralement de ces dernières.

Les bassins du RHN jumelaient les bassins de rivières aux aires non jaugées à leurs côtés. Il a donc fallu, à partir de l'embouchure d'une rivière, tracer un trait continu suivant la ligne de partage des eaux, passant par les sommets et les crêtes, jusqu'à la jonction avec les limites des bassins existants dans le RHN. Joignant ces traits aux Shapefiles des bassins versants du RHN, un réseau de Shapefile regroupant l'aire spécifique de chaque bassin versant s'écoulant vers son embouchure dans l'une des Baies (Hudson ou James) a été construit. Pour ce faire, les données topographiques disponibles en ligne dans ArcMap, à savoir « World Topographic Map », ainsi que les cartes topographiques à l'échelle 1:50 000 de Ressources naturelles Canada « Série CanVec » accessible à partir de <https://ouvert.canada.ca/data/fr/dataset/8ba2aa2a-7bb9-4448-b4d7-f164409fe056> ont été utilisées. Deux thèmes figurant dans la liste disponible pour la série (c'est-à-dire : « Lacs et rivières au Canada – Canvec – Entités hydro » et « Élévation au Canada – Canvec – Entités élévation ») ont servi à cette fin. Pour la documentation succincte de la série, se référer à Ressources naturelles Canada (2016).

La Série CanVec fournit également un tracé précis délimitant la jonction terre-mer. La rive ouest de la baie James ne présentant pas un fort gradient altitudinal, l'influence des marées modifie grandement la position de la limite terre-mer. Ces cartes ont ainsi permis l'incorporation aux bassins versants d'une délimitation plus fidèle de la frontière marine en prenant les tracés existants de la ligne de marée haute dans la série CanVec. Les îles côtières ont été jumelées aux bassins versants les plus proches alors que les îles du large et l'île Akamiski forment respectivement deux "bassins versants" distincts du secteur 0.

Entre deux bassins de rivières subsiste généralement une aire qui n'est pas jaugée puisque le ruissellement de cette aire s'écoule directement dans la Baie sans se joindre à une

rivière importante. Ces aires non jaugées ont été délimitées comme des bassins versants composites non rattachés à une rivière, permettant ainsi d'obtenir le débit précis de l'eau à l'embouchure des rivières tout en tenant compte de l'apport en eau douce de ces aires non jaugées à la baie James.

Les zones des bassins versants ayant subies des dérivations de la section amont de leur cours d'eau entre 1951 et 2020 ont été séparées de leurs bassins versants d'origine. Il a ainsi fallu tenir compte de la position des barrages et des digues. Ces éléments sont également disponibles à partir de la série CanVec sous le thème : « Constructions et occupations du territoire au Canada – CanVec – Entités anthropiques ». Nous avons donc suivi le tracé de la jonction des sommets en passant par les digues et barrages pour séparer les zones déviées des bassins versants en aval. Les digues plus récentes de la déviation de la rivière Rupert ne figurant pas en totalité sur les données des séries CanVec, il a fallu se baser sur des photos satellitaires plus récentes. Un tracé grossier de la limite aval de la zone de dérivation de la rivière Rupert a été effectué en suivant les images disponibles dans l'application Google Earth Pro afin de délimiter le contour complet des zones dérivées qui ont ensuite été raffinées en utilisant les cartes topographiques. À noter que les images utilisées ont été prises par le satellite Landsat 8, courtoisie du U.S. Geological Survey.

1.3 LES DETOURNEMENTS POUR LE DEVELOPPEMENT HYDRO-ELECTRIQUE

1.3.1 Résumé des périodes de détournement et remplissage des réservoirs

Entre 1978 et 2009, Hydro-Québec a effectué plusieurs détournements de rivières et créations de réservoirs afin d'exploiter le potentiel hydro-électrique de la Grande Rivière (Société d'énergie de la Baie James, 1987, 1996; Hydro-Québec Production, 2004; Hydro-Québec, 2012). Ces détournements ont une incidence directe sur le ruissellement parvenant aux embouchures de rivières de la baie James et de ses environs. Ils modifient la forme des bassins versants, retirent une certaine quantité d'eau du système pour remplir les réservoirs hydro-électriques et modifient le cycle naturel de l'eau en augmentant de manière importante

le débit général de la Grande Rivière et a fortiori pendant l'hiver afin de répondre à la demande énergétique plus forte durant cette saison (Hayeur, 2001). Par ailleurs, certaines rivières ont vu leur débit fortement réduit par l'amputation d'une partie de leur bassin versant comme la rivière Eastmain. L'apport additionnel d'eau douce de la Grande Rivière modifie également le cycle de l'eau douce de la baie James. La Baie était originellement composée d'eau plus douce au sud et d'un gradient de salinité croissant vers le nord (Prinsenbergh, 1977; Stewart et Lockhart, 2005). Or, la Grande Rivière étant sur le secteur nord-est de la Baie, les eaux du nord reçoivent maintenant un apport d'eau douce important en hiver et un apport réduit au printemps et en automne (El-Sabh et Koutitonsky, 1977; Prinsenbergh, 1980; Déry et al., 2016, 2018).

Le projet de la baie James s'est effectué en trois phases, respectivement de 1978 à 1984, de 1983 à 1993 et de 2005 à 2009 (Société d'énergie de la Baie James, 1987, 1996; Hydro-Québec, 2011). Pour la présente étude, il importe plus particulièrement de connaître les périodes de remplissage initial de chaque réservoir, les volumes d'eau contenu dans ces réservoirs et les dates de dérivations des bassins versants. Comme les volumes d'eau des réservoirs varient au cours d'une année, il était nécessaire d'utiliser pour le remplissage initial une estimation du volume moyen contenu dans les réservoirs. Celui-ci a été estimé à partir des volumes d'eau maximums normaux que peuvent contenir les réservoirs auxquels on soustrait la moitié de la réserve utile, c'est-à-dire le volume d'eau avec lequel il est actuellement possible de produire de l'électricité. Nous considérons que le volume d'eau résultant de ce calcul a été retiré du cycle de l'eau douce de la Baie à long terme.

Tous les réservoirs n'ont pas causé de dérivation des bassins versants puisque certains réservoirs ont été créés au sein même de la Grande Rivière vers laquelle toutes les déviations des secteurs 1 et 3 sont dirigées afin d'augmenter le potentiel hydro-électrique de cette dernière. La période de dérivation correspond au début de celle de remplissage des réservoirs. On dénombre quatre rivières dont le débit a été diminué ; soit la rivière Eastmain en 1980, la Caniapiscau (affluent de la rivière Koksoak dont l'embouchure est située dans la baie d'Ungava) en 1981, la Grande rivière de la Baleine (affluent de la baie d'Hudson aux abords

est de la baie James) en 1981 et la rivière Rupert en 2009. Il faut porter une attention particulière à la dérivation de la rivière Caniapiscou puisqu'elle ajoute environ 21 km³ d'eau douce par an au débit de la Grande Rivière (Déry et al., 2018) et constitue un nouvel apport d'eau qui n'entrait autrefois pas dans le système de la baie James, représentant donc une source externe venue s'ajouter à notre zone d'étude. L'eau dérivée de l'amont du bassin de la rivière Rupert passe quant à elle par deux biefs construits par Hydro-Québec. Ces biefs font office de réservoir, mais leur volume est petit et l'eau n'y pénètre que de manière transitoire. La dérivation de la rivière Rupert présente une particularité, car elle a été négociée avec les Cris bien après les autres dérivations : un débit résiduel est conservé à l'année vers le bassin d'origine de la rivière Rupert, tel que convenu dans les ententes avec la nation crie.

Tableau 4. Récapitulatif des dérivations de rivière et des remplissages de réservoir à des fins de production hydroélectrique sur le bassin versant de la Grande Rivière au cours des trois phases de développement. Un « * » signifie que le jour exact n'est pas connu.

Phase	Réservoir	Période de remplissage	Rivière d'origine	Volume d'eau moyen du réservoir (km ³)	Référence
1	Robert-Bourassa (LG2)	27-11-1978 à *-12-1979	La Grande	52.02	Société d'énergie de la Baie James, 1987 Schetagne et Therrien, 2013
	La Grande 3	*-04-1981 à *-08-1984	La Grande	47.4	
	La Grande 4	20-03-1983 à *-11-1984	La Grande	15.92	
	Opinaca (EOL)	*-04-1980 à *-09-1980	Eastmain	6.7	
	Caniapiscau	25-10-1981 à 30-09-1984	Caniapiscau (baie d'Ungava)	34.27	
2	Laforge 1	*-08-1993 à *-10-1993	La Grande	4.57	Société d'énergie de la Baie James, 1996 Schetagne et Therrien, 2013
	Laforge 2	*-08-1983 à *-04-1984	Grande rivière de la Baleine	1.61	
	La Grande 1	*-10-1993 à *-11-1993	La Grande	1.25	
3	Eastmain 1	*-11-2005 à *-05-2006	Eastmain	4.7	Schetagne et Therrien, 2013
	Bief Rupert	07-11-2009 à 07-12-2009	Rupert	1.4	Hydro-Québec Production, 2004
	Total	27-11-1978 à 07-11-2009		169.84	

Le Tableau 4 présente le détail des volumes d'eau moyens contenus dans chaque réservoir et des périodes de remplissage. Si la rivière d'origine est autre que la Grande Rivière, le début de la période de remplissage correspond également au moment de la dérivation.

1.3.2 Représentation des modifications anthropiques dues aux développements hydro-électriques dans l'algorithme

Les déviations de rivières et de bassins versants ainsi que les remplissages de réservoirs qui ont suivis les développements hydroélectriques d'Hydro-Québec ont été considérés (Tableaux 3 et 4) grâce aux informations publiées par cette dernière (Société d'énergie de la Baie James, 1987, 1986; Hydro-Québec Production, 2004; Hydro-Québec, 2010, 2011, 2012; Schetagne et Therrien, 2013). Ces informations ont permis de connaître les périodes de remplissage des réservoirs utilisés pour la production hydroélectrique, les dates des détournements de rivières, le débit résiduel de la rivière Rupert et les zones précises de rupture de bassins versants. Les bassins versants des rivières Rupert, Eastmain, Caniapiscau et Grande Baleine ont été divisés en une partie aval et une partie amont pour traiter les dérivations. Les bassins versants amont ont par la suite été jumelés aux bassins versants auxquels ils contribuent respectivement avant et après la déviation pour la période donnée.

La dérivation de la rivière Rupert n'est pas complète. Un débit écologique résiduel poursuit son chemin vers le cours naturel de la rivière. La zone déviée a été traitée comme une dérivation ordinaire dont les débits réservés écologiques ont été soustraits. Ceux-ci ont été dirigés vers le bassin d'origine de la rivière Rupert. Ces débits résiduels sont supposés être les débits minimaux définis par les accords avec la nation crie, à savoir $127 \text{ m}^3/\text{s}$ entre le premier janvier et le 14 mai inclusivement, $416 \text{ m}^3/\text{s}$ entre le 15 mai et le 30 juin, $127 \text{ m}^3/\text{s}$ entre le 1 juillet et le 30 septembre, $267 \text{ m}^3/\text{s}$ entre le premier octobre et le 31 novembre et $127 \text{ m}^3/\text{s}$ entre le 1 novembre et le 31 décembre.

Pour l'implémentation du remplissage de chaque réservoir dans l'algorithme, le ratio entre le volume du réservoir et le volume total du ruissellement dans le bassin versant considéré pendant la durée du remplissage a été calculé. Ensuite le réservoir a été rempli chaque jour de la période de remplissage par le volume du ruissellement du bassin versant du jour multiplié par ce ratio.

1.4 LE MODELE ERA5

1.4.1 Présentation du modèle

Les données ayant servies à l'évaluation des précipitations et de l'évaporation sur une période de 70 ans proviennent du modèle ERA5, lui-même réalisé par l'European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). Une brève présentation de ce modèle et de l'institut l'ayant produit s'impose.

L'ECMWF est un institut de recherche intergouvernemental indépendant supporté par 34 États situés essentiellement en Europe. Créé en 1975, il emploie 390 personnes présentes dans 30 pays. L'institut a trois objectifs : (1) produire en continu des prévisions météorologiques pour l'ensemble de la Terre, (2) contribuer à l'avancement des connaissances climatiques et l'amélioration des modèles climatiques et (3) maintenir des archives climatiques. Il opère deux services du programme de l'Union Européenne pour l'observation et la surveillance de la Terre (Copernicus), le Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS) et le Copernicus Climate Change Service (C3S) en plus de contribuer au Copernicus Emergency Management Service (CEMS). Il utilise aussi l'un des plus puissants superordinateurs d'Europe.

L'ECMWF a produit successivement plusieurs modèles de réanalyse climatique mondiale, soit chronologiquement : ERA-15 qui a utilisé leur système d'assimilation et de modélisation de 1995 pour produire une base de donnée de 15 ans (1979-1993) (Shea, Dennis & National Center for Atmospheric Research Staff, 2016), ERA-40 (de septembre 1957 à août 2002) qui est une amélioration du modèle ERA-15 rendue opérationnelle entre 2001 et 2002 (Uppala et al., 2005), ERA-Interim (1979-2019), basé sur l'Integrated Forecasting System (Cy31r2) de 2006 (Berrisford et al., 2011) et enfin, ERA-5. C'est la base de données de ce dernier modèle global de réanalyse atmosphérique qui a été utilisée dans le présent travail.

La base de données ERA5 utilise le système de prédiction météorologique numérique global (IFS) Cy41r2 (2016) de l'ECMWF pour récolter plusieurs informations atmosphériques depuis 1950 à aujourd'hui. Elle regroupe verticalement 137 niveaux de pression hybrides à partir d'une pression de 0.01 hPa (altitude géopotentielle d'environ 79 300 m) jusqu'à la pression à l'altitude géopotentielle de 10 m du sol. Les 137 niveaux de pression sont ensuite interpolés en 37 niveaux de pression, 16 niveaux de température potentielle et 1 niveau de vorticité potentielle. Des variables sur un niveau ou le niveau de la surface sont aussi disponibles telles que les précipitations et l'évaporation (ECMWF, 2021). Le modèle utilise une grille de 0.28125° par 0.28125° , mais les données distribuées en format NetCDF sont interpolées sur une grille régulière de 0.25° par 0.25° , ce qui correspond à des distances longitudinales allant de 16 à 18 km (pour les latitudes correspondant aux environs de la baie James) et latitudinale de 28 km (ECMWF, 2022a).

Le modèle ERA5 prend en considération les différents processus physiques qui interagissent entre eux dans l'atmosphère et à la surface et les paramétrise pour l'échelle susmentionnée pour l'ensemble du globe. La compréhension du fonctionnement interne du modèle ERA5 dépasse le cadre du présent travail, mais on notera que le modèle de réanalyse paramétrise les interactions physiques présentées dans la Figure 9, une schématisation de ces processus donne une vue d'ensemble à grande échelle des interactions physiques entre la surface et l'atmosphère. Le système Cy41r2 schématise aussi les nuages selon une nouvelle méthode illustrée à la Figure 10. À noter qu'une paramétrisation est nécessaire pour l'évaluation des processus à plus petite échelle. Les modèles de prévisions des paramètres météorologiques intègrent une paramétrisation physique relative à l'échelle utilisée. Pour de plus amples renseignements, se référer à ECMWF (2021).

Il faut souligner que le modèle ERA5 lui-même ne modélise pas le débit des rivières. Ce mémoire utilise toutefois souvent l'expression « modélisé/estimé par ERA5 » au lieu de « calculé/estimé avec les sorties du modèle ERA5 » par simplicité pour avoir une expression facile à lire dans le texte et sur les graphiques.

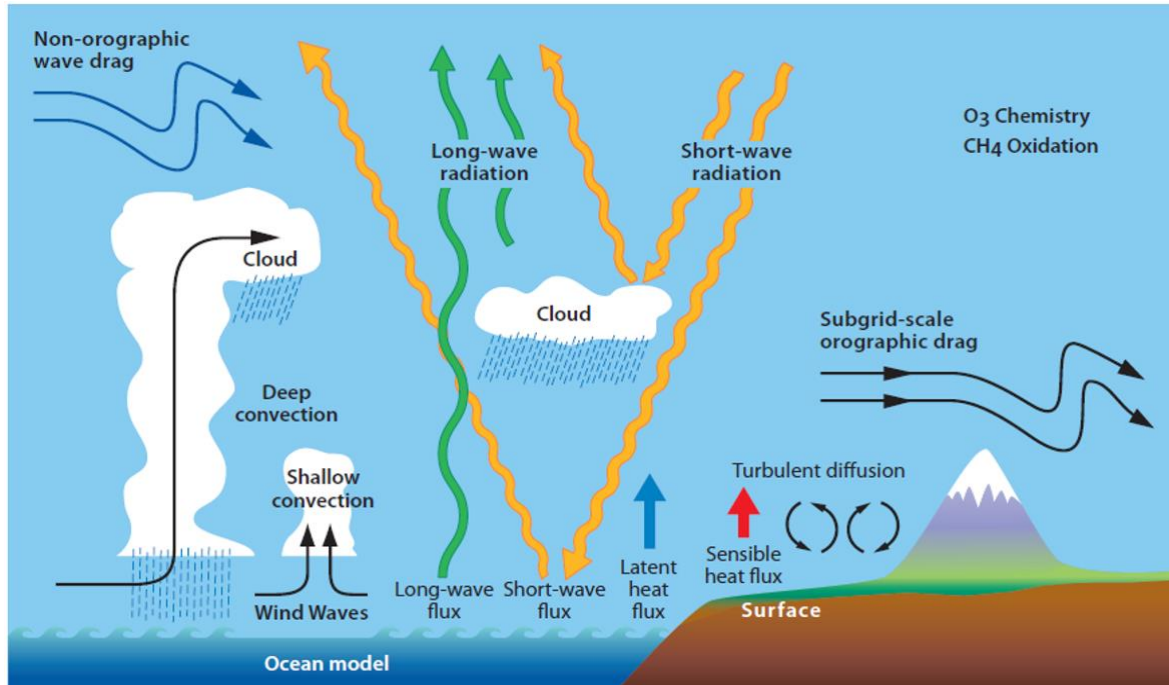


Figure 9. Diagramme schématique des différents processus physiques représentés dans le modèle Integrated Forecasting System (IFS) utilisé par ERA5. Tirée de ECMWF (2016).

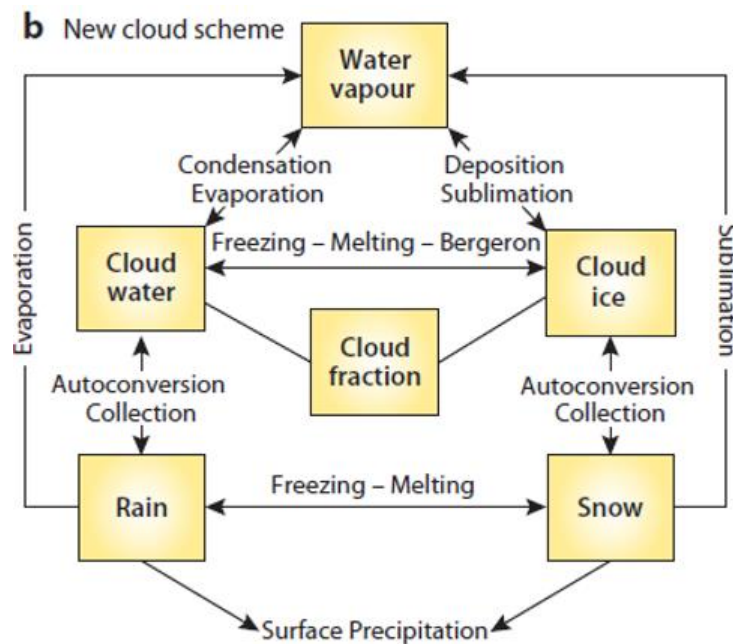


Figure 10. Représentation schématique du modèle de prévision pour les nuages. Tirée de ECMWF (2016).

1.4.2 Extraction et traitement des données de réanalyse de modélisation numérique ERA5

Les données de réanalyse des précipitation « total precipitation » et d'évaporation « evaporation » du modèle ERA5 sur une base horaire ont été extraites à partir du site de Copernicus en partenariat avec l'ECMWF (<https://cds.climate.copernicus.eu#!/home>).

Le paramètre « total precipitation » (ID du paramètre : 228) correspond à l'accumulation sous forme de neige/glace ou d'eau qui tombe à la surface de la Terre sur une période d'une heure pour une tuile donnée (ECMWF, 2022b). Mesuré en mètre, il s'agit de la somme des précipitations à grande échelle générée par le schéma des nuages susmentionné de l'Integrated Forecasting System Cy41r2. Ce schéma représente la formation et dissipation des nuages et les précipitations à grande échelle issues des changements dans les quantités atmosphériques telles que la pression, température et humidité prédites directement par l'IFS. Aux précipitations de grande échelle s'ajoutent les schémas de convection à des échelles plus petites que la grille. Le paramètre n'inclut pas le brouillard, la rosée ou les précipitations s'évaporant dans l'atmosphère avant de rejoindre le sol. Ce paramètre est donc la quantité totale d'eau accumulée pour une période d'une heure (ECMWF, 2022b).

Le paramètre « evaporation » (ID du paramètre : 182) consiste en la quantité d'eau accumulée à s'être évaporée de la surface de la Terre sur une période donnée (une heure dans le cas des données utilisées), mesurée en mètre (ECMWF, 2022b). Le paramètre inclut une représentation simplifiée de l'évapotranspiration. Par convention du ECMWF, les flux descendants sont positifs. Comme l'évaporation monte, il s'agit donc d'un flux négatif (ECMWF, 2022b). Pour cette raison, l'évaporation dans le présent travail sera présentée avec des valeurs négatives.

Grâce à l'outil Climate Data Store Application Program Interface (CDS API), les données de type « Reanalysis » des banques de données « ERA5 hourly data on single levels from 1950 to 1978 (preliminary version) » et « ERA5 hourly data on single levels from 1979 to present » ont été téléchargées du Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data

Store pour des périodes successives d'un mois de janvier 1950 à décembre 2020 en format NetCDF avec un script en Python.

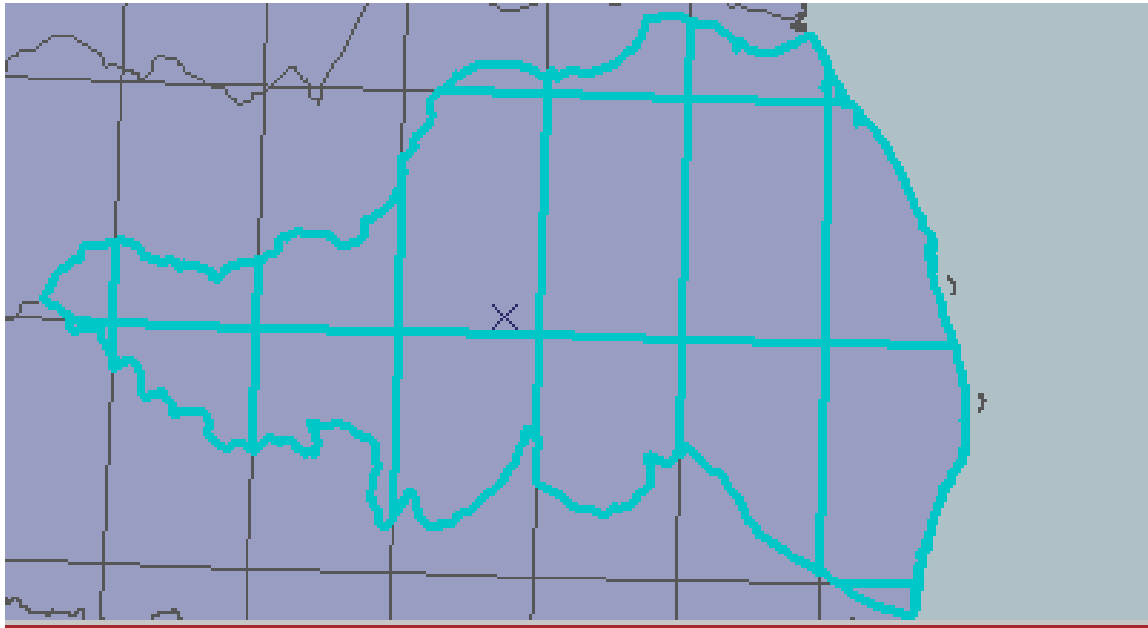


Figure 11. Découpage des tuiles d'un bassin versant

Chaque tuile a une valeur de précipitation et une valeur d'évaporation pour chaque heure et l'on suppose que ces valeurs sont constantes pour toute la surface de la tuile. On superpose d'abord le tracé des bassins versants et les positions des tuiles du modèle ERA5. Lorsqu'une tuile est à la jonction de plusieurs bassins versants, on doit la diviser pour que chaque bassin reçoive la portion qui lui revient de la tuile. En utilisant ArcMap, on sélectionne d'abord l'ensemble des tuiles dont au moins une partie se superpose à un certain bassin versant. Ensuite, on utilise l'outil Cut Polygon d'ArcMap pour séparer les tuiles selon le tracé des bassins versants. À titre d'exemple, le résultat pour l'aire non jaugée entre les bassins de rivière Opinnagau et Swan (ID 9) est présenté à la Figure 11. Enfin, l'aire en m^2 de chaque tuile ou fraction de tuile est calculée dans ArcMap. Cela donne une carte avec la superposition des tuiles préalablement divisées entre chaque bassin versant (voir la Figure 12).

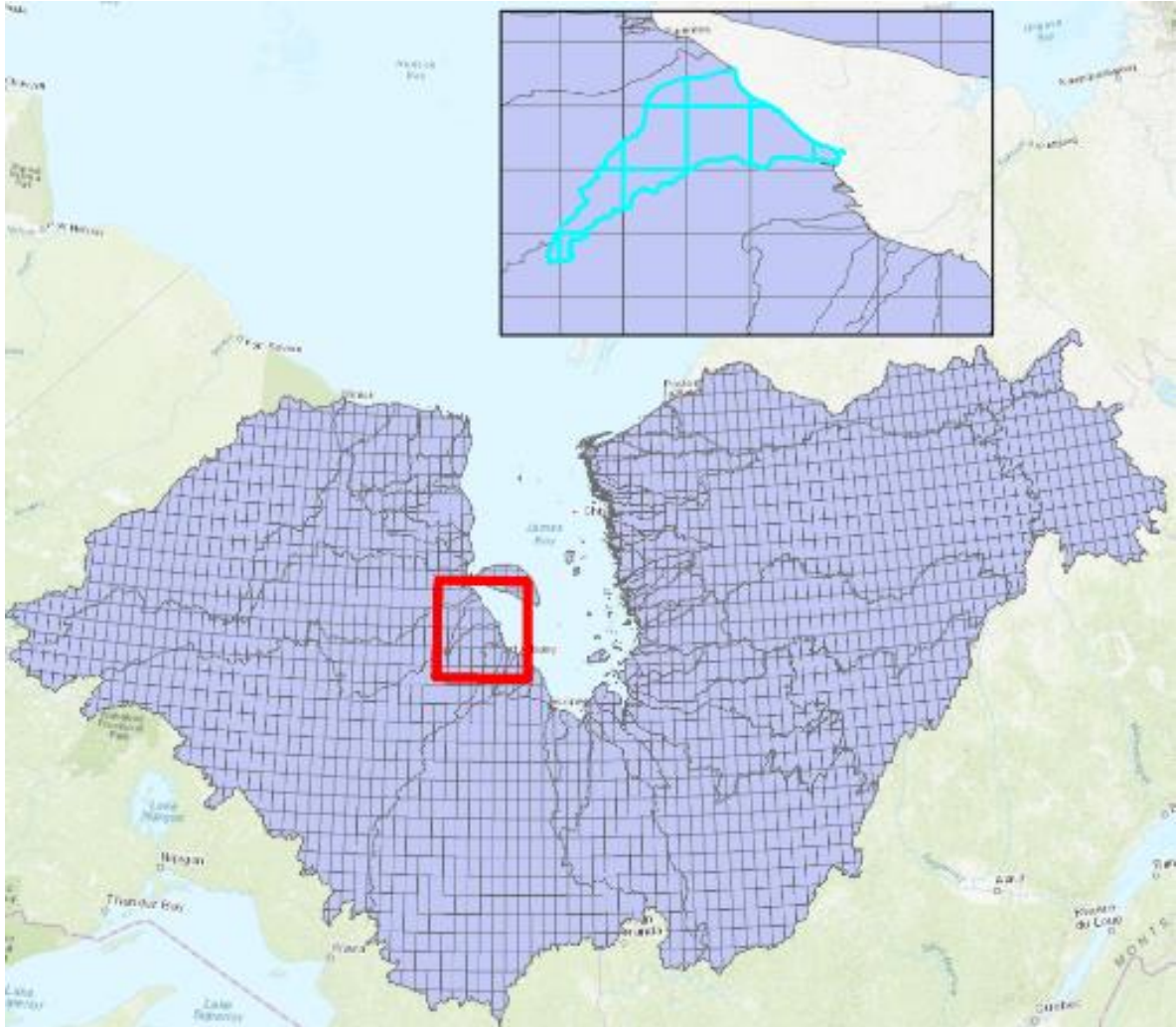


Figure 12. Superposition des tuiles issues des données modélisées ERA5 aux polygones délimitant les tracés des bassins versants de la zone d'étude. Un agrandissement permet de montrer que certaines tuiles ont été découpées pour s'adapter au contour d'un bassin versant spécifique.

Le logiciel Matlab a été utilisé pour lire les fichiers NetCDF d'ERA5 et pour répartir les précipitations et l'évaporation de chaque point de grille (correspondant à une tuile découpée au préalable, s'il y a lieu) entre les bassins versants. Pour chaque pas de temps (heure), les données brutes de précipitation et d'évaporation sont multipliées par l'aire de la

tuile ou fraction de tuile concernée. On fait ensuite la somme de toutes les tuiles d'un bassin versant en utilisant la formule suivante :

$$Q = \sum_{i=1}^n A_i (E_i + P_i)$$

où Q est le débit de ruissellement du bassin versant (m³/h), A_i est l'aire de la tuile ou fraction de tuiles (m²), E_i est l'évaporation en valeur négative (m/h) et P_i est le total des précipitations (m/h). On assume que Q est le débit qui s'écoule vers l'embouchure d'une rivière. Rappelons que les valeurs d'évaporation que fournit ERA5 sont négatives.

Les dates de détournement de rivière et de remplissage de réservoir ainsi que le débit écologique réservé des biefs Rupert ont également été considérés (voir section 1.3.2). En divisant par 10⁹, les résultats sont convertis de m³ à km³.

Les données sont ensuite regroupées en années hydrologiques. Nous utilisons la définition du Centre d'Expertise Hydrique du Québec qui stipule que l'année hydrologique débute le 1^{er} octobre de l'année précédente et se termine le 30 septembre de l'année en cours [<https://www.cehq.gouv.qc.ca/glossaire.htm>] afin d'éviter que le ruissellement de la fonte des glaces d'hiver soit séparé entre deux années). La première année hydrologique, 1951, couvre octobre 1950 à septembre 1951. La dernière de l'étude, 2020, couvre octobre 2019 à septembre 2020.

La validation avec les stations hydrométriques a montré que la modélisation sous-estime les débits, raison pour laquelle un facteur de calibration de 1.0598703 a été appliqué à l'ensemble des données modélisées (voir section 1.6.3).

1.5 STATIONS HYDROMETRIQUES

1.5.1 Débits d'eau mesurés aux stations hydrométriques

La méthode de calcul des débits de rivières à partir des données du modèle ERA5 a été validée avec des données concrètes de ruissellement observées sur le terrain. Au Canada, il y a plusieurs stations hydrométriques pour mesurer les débits de rivières de plusieurs rivières importantes. À partir du site <https://eau.ec.gc.ca/> (pour la documentation, se référer à Environnement Canada, 2015), les stations d'intérêt pour l'étude ont été sélectionnées dans la base de données « Niveau d'eau et débit », dans la sous-série « Données hydrométriques historiques »; soit celles à proximité des embouchures de rivières principales réparties entre les six secteurs d'étude (excluant le secteur 0, la baie James en elle-même).

Il a été nécessaire d'effectuer un tracé spécifique des sous-bassins versants situés en amont des stations hydrométriques puisque celles-ci ne sont pas situées directement à l'embouchure des rivières. Pour ce faire, on a suivi la méthode décrite dans la section 1.2.

Neuf stations ont été choisies en fonction de plusieurs critères : la taille de leur aire de drainage, la représentativité de leur répartition géographique dans la zone d'étude, la longueur de leur période d'opération, la présence ou l'absence de nombreuses données manquantes, l'importance de la rivière qu'ils occupent, leur présence sur le cours principal de la rivière ou, à tout le moins, un affluent majeur de celle-ci et leur proximité avec l'embouchure. La Figure 13 présente la carte des bassins de station hydrométrique qui ont été utilisées. Le Tableau 5 présente la liste des stations, leur localisation, leurs années d'opération et l'aire de drainage de leur sous-bassin versant. À noter que toutes ces stations ont été en fonction seulement durant une partie de la période étudiée.

À noter que ces stations n'ont pas servi à mesurer le débit de ruissellement annuel des rivières présenté dans ce travail, mais seulement à valider la méthode estimant le débit annuel de ruissellement des rivières à partir des données d'ERA5.

Tableau 5. Détail des stations hydrométriques utilisées : la rivière dont le débit est mesuré (principale ou secondaire si applicable), le numéro d'identification d'Environnement Canada, le secteur correspondant, la localisation, les années d'opération et l'aire du sous-bassin versant spécifique à la station. Le Tableau 6 présente le nombre d'années valides et le débit moyen pour chaque station.

Rivière principale	Rivière secondaire	Station	Secteur	Localisation	Années d'opération	Aire du sous-bassin versant (km ²)
Winisk	-	04DC001	6	54°29'58" N 87°13'39" W	1965-2019	50309
Ekwan	-	04EA001	5	53°48'22" N 84°55'05" W	1967-2019	10160
Attawapiskat	-	04FC001		53°05'28" N 85°04'20" W	1968-2019	36135
Albany	-	04HA001	4	51°19'50" N 83°50'00" W	1964-2019	86578
Moose	-	04LG004		50°45'05" N 81°27'05" W	1983-2019	60288
Nottaway	Bell	03AC004	3	49°45'11" N 77°36'52" W	1962-2013	22317
Broadback	-	03BD002		50°44'45" N 76°23'16" W	1972-2005	9962
Pontax	-	03BF001		51°32'01" N 78°05'48" W	1975-2013	5979
Grande rivière de la Baleine	-	03ED001	1	55°14'15" N 76°59'02" W	1961-2013	31124

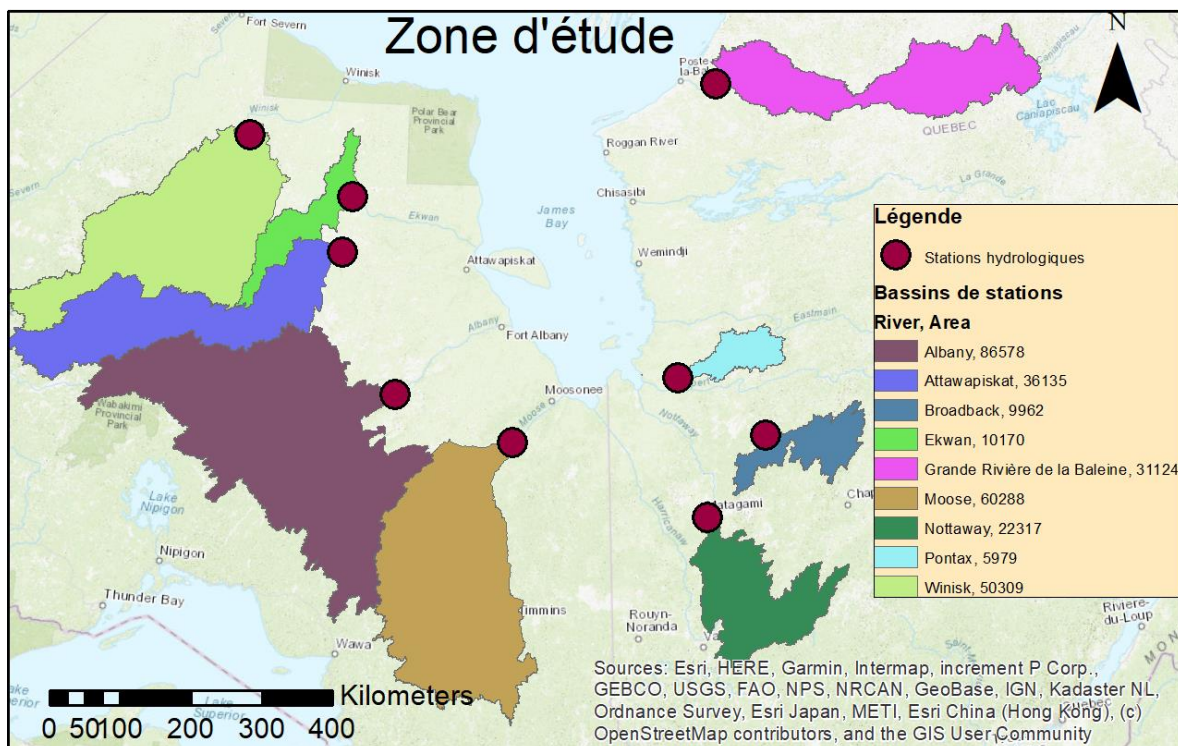


Figure 13. Carte des sous-bassins versants de stations hydrométriques utilisées pour valider la modélisation par ERA5 du débit annuel de ruissellement

1.5.2 Sources d'erreurs sur les données de débit de ruissellement observés aux stations hydrométriques.

Les données des stations hydrométriques présentent également quelques problèmes qu'il fallait corriger. Afin d'obtenir les résultats annuels en année hydrologique pour chacune des stations étudiées, on fait la somme de tous les débits journaliers observés tout en s'assurant qu'il n'y ait aucune donnée manquante dans l'année. Cela a réduit le nombre d'années disponibles pour effectuer la comparaison, mais considérant l'abondance des données de stations présentes, un nombre suffisant de valeurs de débits annuels a pu être obtenu pour effectuer une comparaison valide.

Il faut également considérer la présence parmi ces données de plusieurs valeurs flaggées comme présentant un risque d'erreur digne de mention par le producteur des

données, soit Environnement Canada. Les flags concernant les données de stations utilisés sont les suivants :

- « E » pour une estimation. Le symbole E indique qu'aucune donnée mesurée n'était disponible pour la journée ou la période manquante, et que le niveau d'eau ou la valeur de l'écoulement fluvial a fait l'objet d'une estimation d'après une méthode indirecte, par exemple par interpolation, par extrapolation, par comparaison avec d'autres cours d'eau ou par corrélation avec les données météorologiques.

- « A » pour une journée partielle. Le symbole A indique que la valeur quotidienne moyenne du niveau d'eau ou de l'écoulement fluvial a fait l'objet d'une estimation malgré des trous de plus de 120 minutes dans la série de données, ou que les données manquantes n'étaient pas suffisamment importantes pour justifier l'utilisation du symbole E.

- « B » pour mentionner la présence de glaces dans le cours d'eau. Le symbole B indique que la valeur de l'écoulement fluvial a été estimée en tenant compte de la présence de glaces dans le cours d'eau. L'état des glaces modifie la relation entre le niveau d'eau et l'écoulement fluvial (Environnement et ressources naturelles Canada, 2022).

La présence de ces valeurs flaggées par le producteur des données présentait ainsi un risque sur la précision des données obtenues. Toutefois, utiliser uniquement les données ne présentant aucun flag durant l'année réduit considérablement le nombre d'années complètes disponibles, passant ainsi pour les neuf stations de 331 années au total à 31 années. Comme les données flaggées ont passées le contrôle de qualité d'Environnement Canada, elles sont probablement utilisables, surtout pour une étude qui n'examine pas les variations journalières du débit, mais qui utilise seulement les débits annuels.

1.6 ANALYSE STATISTIQUE ET CALIBRATION AVEC LES STATIONS HYDROMETRIQUES

La plupart des tests statistiques ont été fait avec le logiciel XLSTAT. Lorsque des tests ou coefficients particuliers n'étaient pas disponibles dans ce logiciel, les calculs ont été effectués avec Matlab ou directement sur Excel.

Afin de mieux représenter la variabilité avec des barres d'erreurs sur certains graphiques, l'erreur type a été calculée à partir de l'écart types selon la formule :

$$\text{Erreur type} = \frac{\text{Écart type}}{\sqrt{\text{Nombre de données}}}$$

1.6.1 Comparaisons des débits annuels obtenus à partir des données ERA5 avec les débits mesurés aux stations hydrométriques

Les débits mesurés aux stations hydrométriques ont été utilisés afin de valider la modélisation des débits annuels de ruissellement avec les données d'ERA5. Une régression linéaire de Pearson a été calculée entre les valeurs modélisées par ERA5 (variable dépendante) et celles observées aux stations hydrométriques (variable indépendante). Le coefficient de détermination (R^2 , soit le carré du coefficient de corrélation linéaire r) est un indicateur permettant de juger la qualité d'une régression linéaire simple. Il mesure l'adéquation entre le modèle et les données observées ou encore à quel point l'équation de régression est adaptée pour décrire la distribution des points. Un test de Student (test T) permet de déterminer si une régression linéaire avec un coefficient de détermination donné est statistiquement significative en fonction du nombre de paires de valeurs utilisées pour la régression (Zar, 2010).

1.6.2 Tests statistiques utilisés pour vérifier la correspondance entre les données observées et modélisées aux stations hydrométriques

La normalité de distribution des données provenant des stations hydrométriques et modélisées par ERA5 a été testée au moyen des tests de Shapiro-Wilk, d'Anderson-Darling, de Lillifors et de Jarque-Bera.

L'hypothèse nulle de normalité des données a été rejetée par tous les tests (p-value inférieur à 0.0001) autant pour l'ensemble exclusif des données non flaggées que pour l'ensemble de toutes les données (flaggées et non flaggées).

Un test non paramétrique bilatéral de rang signé de Wilcoxon a montré une différence significative entre les valeurs modélisées et observées avec un p-value <0.0001 pour l'ensemble des données (n=331) et de 0.039 pour les valeurs non flaggées (n=33). Dans l'ensemble, les débits obtenus avec les données du modèle ERA5 sont légèrement sous-estimées par rapport aux observations. Ces tests statistiques ont été réalisés à l'aide du logiciel XLSTAT.

1.6.3 Calibration suivie d'un nouveau test de Wilcoxon sur les données calibrées

Afin de corriger les valeurs modélisées, un coefficient de calibration a été calculé en utilisant l'équation suivante :

$$\text{Coefficient de calibration} = \frac{\text{Moyenne des débits annuels des stations hydrométriques}}{\text{Moyenne des débits annuels de modélisation}}$$

Le coefficient de calibration obtenu est de 1.0598703. Le débit annuel des données modélisées a été multipliée par cette valeur. Par la suite, le test bilatéral de rang signé de Wilcoxon a été refait et n'a pas montré de différence significative entre les données d'ERA5 calibrées et les données des stations hydrométriques avec un p-value de 0.769 pour l'ensemble des données et un p-value de 0.542 pour les données non flaggées. Pour les détails des p-value pour chaque station hydrométrique, voir la section 2.1.2. **À noter que toutes les données de modélisation présentées dans ce travail sont calibrées.**

1.6.4 Test préliminaire de Khi-2 de conformité

Pour avoir une vue d'ensemble de la distribution des effectifs et afin de confirmer de manière différente la concordance entre les valeurs modélisées par ERA5 et calibrées et les valeurs observées aux stations hydrométriques, un test de khi-2 de conformité a été effectué.

1.6.5 Fiabilité du modèle

Deux outils permettent d'attester de la fiabilité d'un modèle hydrologique : le Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) et le Kling-Gupta Efficiency (KGE). On utilise le coefficient de Nash-Sutcliffe typiquement pour évaluer l'efficacité d'un modèle hydrologique (Nash et Sutcliffe, 1970; McCuen, 2006) dont la formule est la suivante :

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i \text{ obs} - Y_i \text{ mod})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i \text{ mod} - \bar{Y} \text{ obs})^2}$$

où n est le nombre de données appariées, $Y_i \text{ obs}$ est la valeur observée à l'instant i, $Y_i \text{ mod}$ est la valeur équivalente obtenue par modélisation et $\bar{Y} \text{ obs}$ est la moyenne des valeurs observées.

Or, Ritter et Munoz-Carpena (2013) atteste que le coefficient NSE est grandement affecté par les données extrêmes, répétitives, la magnitude et le nombre de données. Ils recommandent l'utilisation de plusieurs outils pour mesurer l'efficacité d'un modèle. Pour cette raison, le KGE est également utilisé.

Le KGE, un indice plus récent, s'applique également aux modèles hydrologiques. Gupta et al. (2009) proposent un indice pour la modélisation hydrologique qui est couramment utilisé de nos jours, permettant d'évaluer la fiabilité du modèle utilisé dans ce travail selon les deux outils et donnant un point de comparaison facile avec d'autres modèles hydrologiques dans des recherches ultérieures. La formule est la suivante :

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + \left(\frac{\sigma_{\text{mod}}}{\sigma_{\text{obs}}} - 1\right)^2 + \left(\frac{\mu_{\text{mod}}}{\mu_{\text{obs}}} - 1\right)^2}$$

Où r est le coefficient de corrélation, σ_{mod} est l'écart type des valeurs modélisées et σ_{obs} , celui des valeurs observées, μ_{mod} est la moyenne des valeurs modélisées et μ_{obs} , celle des valeurs observées (Knoben et al., 2019). L'indice KGE, tout comme le NSE possède des valeurs possibles allant de $-\infty$ à 1. La limite entre ce qui constitue une bonne relation entre valeur modélisée et observée est assez confuse pour le KGE, toutefois certains auteurs tendent à dire qu'une valeur positive témoigne d'une bonne relation (Andersson et al., 2017; Schönfelder et al., 2017; Knoben et al., 2018; Siqueira et al., 2018; Sutanudjaja et al., 2018; Towner et al., 2019) tandis que les valeurs négatives témoignent d'une mauvaise relation (Moriassi et al., 2007; Knoben et al., 2019). Une relation idéale serait obtenue quand $KGE = 1$ (Knoben et al., 2019). La section résultat présente la liste détaillée des valeurs de NSE et de KGE obtenues par station hydrométrique.

1.6.6 Test de tendance de Mann-Kendall sur les résultats de modélisation

Afin de vérifier la significativité des tendances temporelles des séries de débits annuels de ruissellement, d'évaporation et de précipitation, le test de tendance non-paramétrique de Mann-Kendall a été utilisé. Il a été effectué sur Matlab grâce au programme réalisé par Faticchi (2022). Ce test permet de déterminer s'il y a une tendance monotone croissante ou décroissante dans le temps. Ce test a l'avantage de ne pas nécessiter une distribution normale. Il faut tout de même noter que ce test requière l'absence d'autocorrélations (Blain, 2013). C'est l'une des raisons pour laquelle l'utilisation des débits annuels en année hydrologique a été privilégiée puisque l'hiver n'est pas séparé entre deux années différentes, réduisant autant que possible le risque d'erreurs d'autocorrélations puisqu'une certaine partie du ruissellement pourrait être perçu seulement l'année suivante en utilisant des années normales (1^{er} janvier au 31 décembre). Une tendance est jugée significative si le p-value de la distribution des rangs est inférieur à la valeur seuil de 0.05. Dans cette étude, la pente de régression linéaire est utilisée pour estimer les variations temporelles du débit et le coefficient

de corrélation permet de valider la significativité de la droite de régression linéaire avec un test de Student (Zar, 2010). Pour un effectif de 70, la pente d'une régression linéaire est significative à $p = 0.10$ lorsque $|r| > 0.198$ ($R^2 > 0.039$). Elle devient significative à $p = 0.05$ lorsque $|r| > 0.235$ ($R^2 > 0.055$). Elle est significative à $p = 0.01$ lorsque $r > 0.306$ ($R^2 > 0.093$) (Zar, 2010). La présente étude considère une relation statistiquement significative si $p \leq 0.05$. Le seuil de 0.10 témoigne d'une relation proche du seuil de significativité. Au-dessus de $p = 0.10$, il n'y a aucune significativité. L'étude présente tout de même le seuil de significativité à $p < 0.10$ à titre indicatif. Au contraire, un $p < 0.01$ démontre une forte significativité. À noter que c'est toujours la valeur maximale de significativité qui est indiquée. Les valeurs tiennent également compte de l'effectif.

CHAPITRE 2

RÉSULTATS

2.1 VALIDATION DES DÉBITS ANNUELS OBTENUS PAR MODÉLISATION AVEC LES DONNÉES DE TERRAIN

2.1.1 Mise en contexte

Afin de confirmer que les débits annuels obtenus par modélisation ERA5 concordent avec la réalité, ils ont été comparés avec les débits mesurés par les stations hydrométriques du Canada. Tel que mentionné dans la méthodologie, nous avons délimité les bassins versants spécifiques des stations hydrométriques. Le Tableau 5 présente le détail des stations hydrométriques utilisés et la Figure 13, leur localisation. Pour rappel, toutes les données de modélisation présentées dans ce travail ont été préalablement calibrées (voir la section 1.6.3).

2.1.2 Comparaison statistique des observations des stations hydrométriques et des valeurs de modélisation

2.1.2.1 Comparaison des données modélisées et des valeurs observées aux stations

La Figure 14 présente les données modélisées en fonction des données mesurées pour l'ensemble des stations hydrométriques utilisées. C'est-à-dire, pour une station et une année hydrologique donnée, une comparaison a été faite entre le résultat obtenu par ERA5 en fonction de celui mesuré par la station. Le graphique du haut présente seulement les 31 données pour lesquelles aucune journée avec un « flag » de qualité n'a été répertoriée durant l'année et celui du bas montre l'ensemble des données de stations récoltées, soit 331 données. On remarque que la distribution des données non flaggées est nettement plus restreinte en termes de grandeur de débit, ne dépassant pas les 20 km³/an alors que l'ensemble des données

a une plus grande étendue. Cela dit, la vaste majorité des débits observés sur l'ensemble des stations se situe également entre 0 et 20 km³/an. Dans les deux cas, les pentes de la régression linéaire entre valeurs observées et modélisées sont similaires : 0.97 pour les données non flaggées ($R^2 = 0.90$) et 0.92 pour l'ensemble des données ($R^2 = 0.91$). Les résultats de modélisation semblent donc très légèrement en dessous des valeurs de stations. Comme en témoigne également la Figure 15, on note que 80 % (265 années-stations sur un total de 331 années-stations) des débits sont inférieurs à 20 km³/an.

Ne constatant pas de différence flagrante entre les valeurs non flaggées et l'ensemble des 331 années-stations, il fut décidé d'utiliser l'ensemble des données en excluant seulement les années avec des périodes sans mesures du débit de rivière.

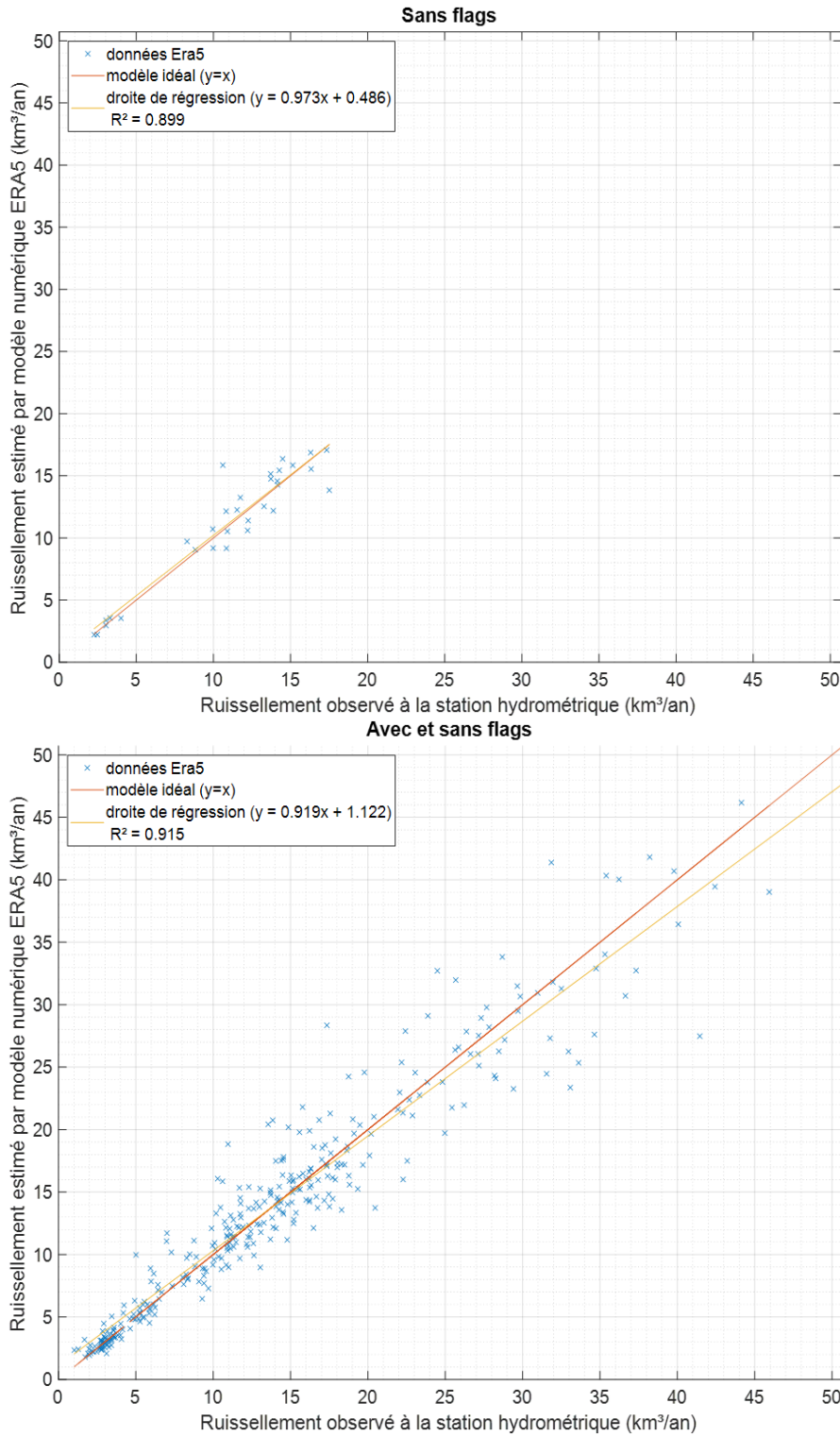


Figure 14. Comparaison entre les débits annuels modélisés par ERA5 sur les sous-bassins des stations hydrométriques et ceux mesurés par ces stations hydrométriques. Le graphique du haut présente seulement les données avec toutes les journées de l'année sans flag de qualité (n=31) alors que le graphique du bas présente toutes les données (n=331).

2.1.2.2 Test de khi-2 de conformité sur la comparaison de l'ensemble des valeurs

Afin de comparer la distribution des valeurs par effectifs et vérifier de prime abord la concordance entre les deux séries, un test de khi-2 de conformité a d'abord été effectué. Le résultat du test est présenté dans la Figure 15. Les données de stations sont légèrement supérieures aux valeurs de modélisation, mais cette différence ne permet pas de dissocier les deux séries de données selon le résultat du test de khi-2 de conformité. L'hypothèse nulle voulant que les deux séries fassent partie de la même population n'est pas rejetée (khi-2 de 2.95 ; p-value de 0.7) puisque le p-value est loin du seuil de significativité fixé à 0.05.

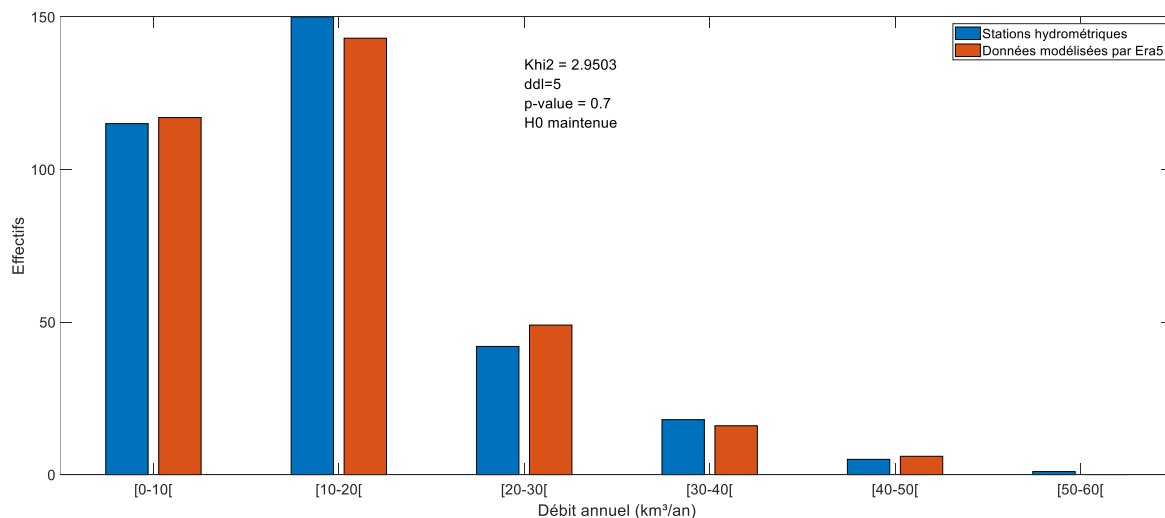


Figure 15. Comparaison des histogrammes des débits mesurés aux stations hydrométriques et des débits modélisés avec ERA5. L'hypothèse nulle du test de khi-2 de conformité selon laquelle la distribution des données modélisées est conforme à celle des données des stations hydrométriques n'est pas rejetée (p-value = 0.7).

2.1.2.3 Test de Wilcoxon, NSE et KGE par station

Le test statistique bilatéral de rang signé de Wilcoxon donne un p-value de 0.769 pour l'ensemble des données (n=331) et un p-value de 0.542 pour les données non flaggées

uniquement (n=31). Il n'y a donc pas de différence significative entre les données de station hydrométrique et les données d'ERA5 et ce, qu'ils comportent des données flaggées ou non.

Le Tableau 6 présente les moyennes, médianes et écarts types des débits annuels de ruissellement observés aux stations hydrométriques et modélisés par ERA5, puis calibrés. Il résume aussi les valeurs de coefficients de corrélation, des indices de Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) et de Kling-Gupta Efficiency (KGE) ainsi que la p-value du test de rangs signés de Wilcoxon. Ce test statistique bilatéral indique que les valeurs observées et modélisées ne sont pas significativement différentes ($p > 0.05$) pour l'ensemble des stations et pour les stations sur les rivières Broadback, Ekwan, Nottaway et Winisk. Il montre par contre une différence significative pour les rivières Albany, Attawapiskat, Ekwan, Grande rivière de la Baleine et Pontax. Les différences les plus importantes concernent les rivières Ekwan et Pontax qui sont également les rivières avec les débits les plus faibles, ce qui semble démontrer que l'erreur des valeurs estimée par ERA5 est d'autant plus forte avec de plus faibles débits. Les limitations du modèle ERA5 qui pourraient expliquer en partie ces différences entre valeurs réelles et modélisés sont présentées à la section 3.1. À partir des coefficients de corrélation, on peut trouver les coefficients de détermination en multipliant les coefficients de corrélation par eux-mêmes. Ces coefficients de détermination représentent la proportion de la variance des données observées, qui est expliquée par la régression linéaire. On obtient des coefficients de détermination de 0.914 (ensemble des stations), 0.554 (Albany), 0.630 (Attawapiskat), 0.290 (Broadback), 0.621 (Ekwan), 0.554 (Grande rivière de la Baleine), 0.741 (Moose), 0.475 (Nottaway), 0.515 (Pontax) et 0.542 (Winisk). Pour rappel, les indices NSE et KGE de 1 indiquent un modèle parfait et des indices situés entre 0 et 1 sont généralement considérées comme des indicateurs d'un modèle hydrologique avec des performances jugées bonnes ou acceptables (voir section 1.6.5). Toutes nos modélisations sont donc jugées bonnes selon les deux indices, avec la concordance la plus faible pour la station de la rivière Broadback (NSE = 0.213, KGE = 0.094). Les stations prises dans leur ensemble rapportent des évaluations de performance nettement meilleures à tous les points de vue, mais cela n'est pas étonnant car il est plus simple pour un modèle de

prédire l'ordre de grandeur du débit pour des bassins versants de taille très différentes que de prédire correctement les débits d'un bassin versant pour chaque année.

À noter que les moyennes des débits mesurés aux stations et modélisés sont identiques pour l'ensemble. Ce n'est pas un hasard puisque c'est ainsi que la calibration a été déterminée. Les médianes sont toutefois inférieures aux moyennes aussi bien pour les valeurs modélisées que celles observées, ce qui indique la présence de quelques années avec de fortes précipitations et donc, d'un fort ruissellement faisant ainsi monter la moyenne par rapport à la médiane. Quant aux écarts types, ils sont élevés dans les deux cas, ce qui témoigne également de la forte variabilité interannuelle des débits annuels.

Tableau 6. Résumé des débits pour l'ensemble des stations hydrométriques (Ense) ainsi que pour les stations des rivières Albany, Attawapiskat, Broadback, Ekwan, Grande rivière de la Baleine (GRDLB), Moose, Nottaway, Pontax et Winisk avec le nombre d'années de comparaison disponibles (N), les moyennes, médianes et écarts types (SD) des valeurs de station (Observé) et de modélisation par ERA5 (Modélisé), le coefficient de corrélation (r), les coefficients Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) et Kling-Gupta Efficiency (KGE) et le p-value du test de rangs signés de Wilcoxon. Pour ce dernier, une étoile indique que les distributions sont différentes ($p < 0.05$).

Station	N	Observé (km ³ /an)			Modélisé (km ³ /an)			r	NSE	KGE	Wil. p-value
		Moy.	Méd.	SD	Moy.	Méd.	SD				
Ense.	331	14.09	12.78	9.52	14.09	13.13	9.12	0.956	0.907	0.939	0.769
Alba.	41	31.97	31.78	7.27	30.25	30.66	7.36	0.744	0.439	0.738	0.047*
Atta.	46	11.50	10.98	3.39	12.55	12.19	4.01	0.794	0.556	0.711	0.013*
Broa.	27	5.59	5.53	0.60	5.88	5.82	1.07	0.538	0.213	0.094	0.162
Ekwa.	31	2.82	2.85	0.88	3.28	3.13	1.04	0.788	0.418	0.675	<0.001*
GRDLB	42	16.16	16.27	2.04	15.53	15.70	2.09	0.744	0.408	0.740	0.015*
Moos.	31	22.79	22.68	5.03	22.69	22.98	4.78	0.861	0.703	0.852	0.915
Nott.	44	12.13	12.24	1.89	12.11	12.08	2.38	0.689	0.464	0.596	0.986
Pont.	28	3.12	3.07	0.43	2.95	2.98	0.47	0.718	0.318	0.703	0.010*
Wini.	41	14.17	13.85	4.48	15.03	14.46	5.20	0.736	0.499	0.686	0.309

2.1.3 Séries temporelles et débits annuels par station

Pour chaque station, les relations entre les données modélisées par ERA5 et les observations aux stations hydrométriques ont été produites. Ces données sont accompagnées d'une série temporelle par station permettant d'observer les variations et la concordance selon l'échelle temporelle. Comme il serait fastidieux de présenter ces graphiques pour les neuf stations, ils sont seulement présentés ici pour deux stations hydrométriques représentatives situées sur les rivières Attawapiskat (Figure 16) et Nottaway (Figure 17). Les graphiques pour les sept autres stations hydrométriques sont présentés à l'Annexe I. À noter que plusieurs années sont manquantes pour les débits mesurés du fait que ces stations hydrométriques n'étaient pas en fonction à tous les jours des années concernées.

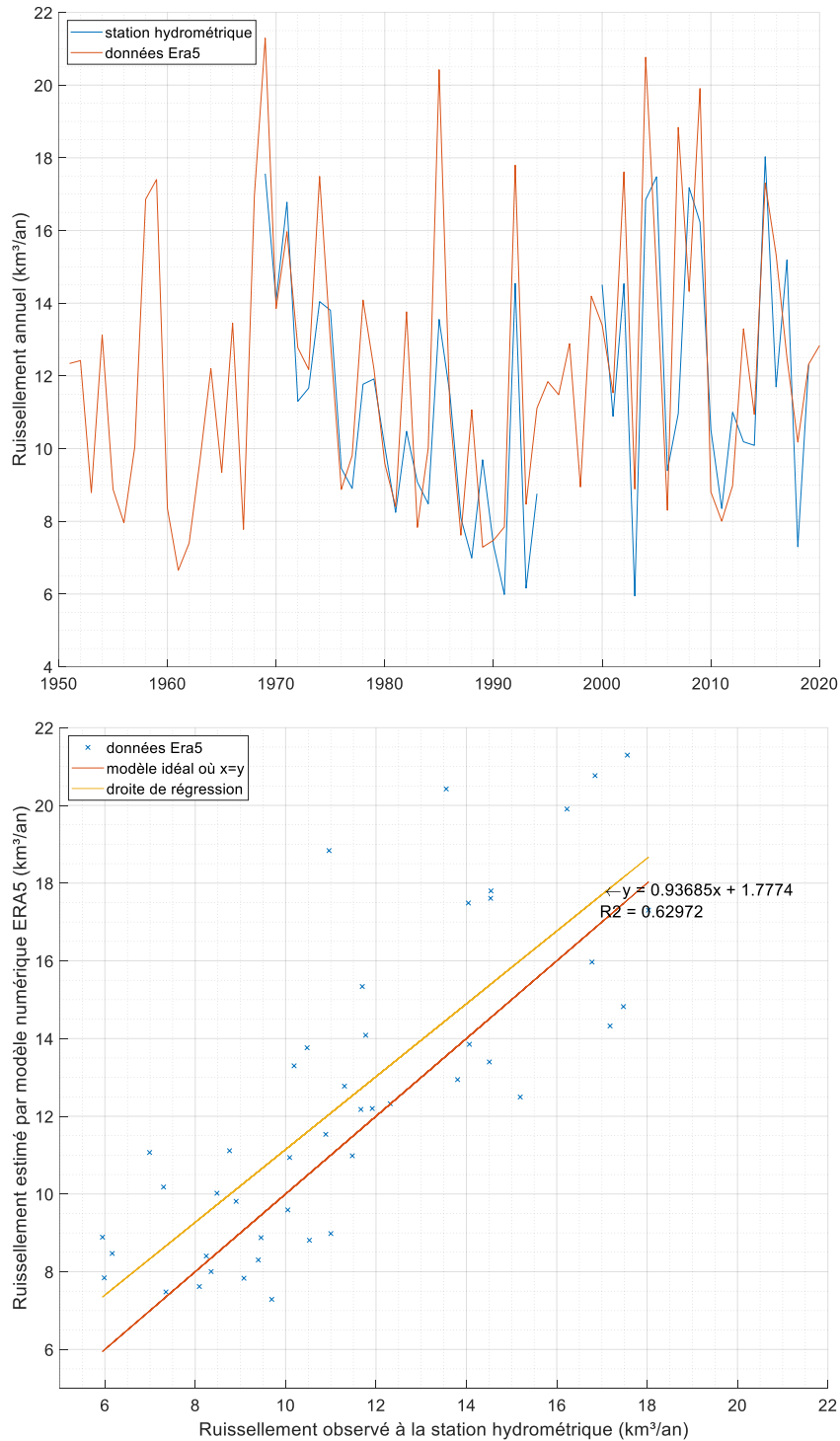


Figure 16. Rivière Attawapiskat. Haut : série temporelle des débits mesurés à la station hydrométrique et des débits modélisés par ERA5. Bas : débits annuels modélisés par ERA5 en fonction des débits observés à la station hydrométrique.

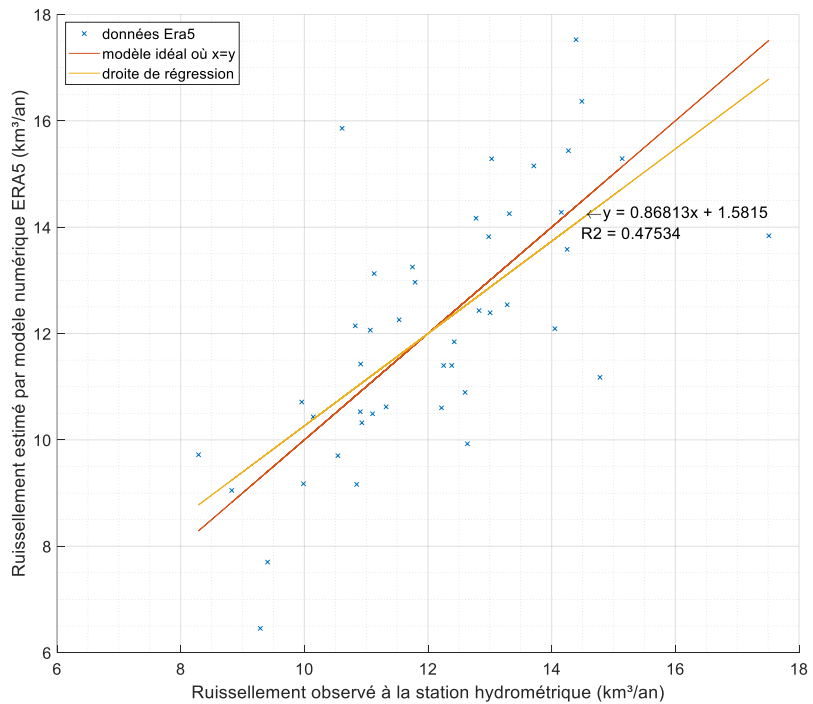
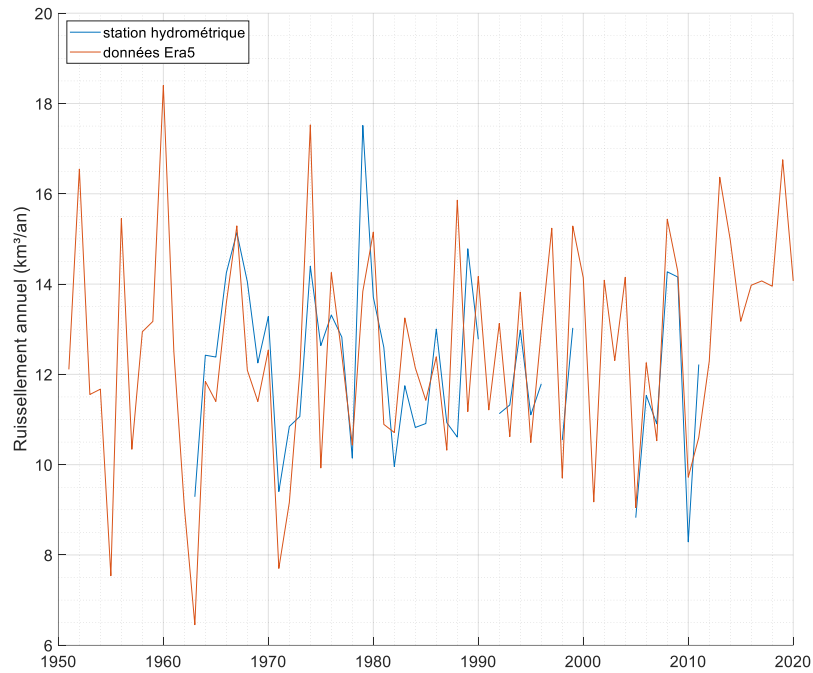


Figure 17. Rivière Nottaway. Haut : série temporelle des débits mesurés à la station hydrométrique et des débits modélisés par ERA5. Bas : débits annuels modélisés par ERA5 en fonction des débits observés à la station hydrométrique.

Dans le cas de la rivière Attawapiskat, on remarque que les débits sont souvent plus élevés par modélisation. Cela se voit également dans le fait que la droite de régression linéaire est supérieure à la régression idéale (valeur de station = valeur de modélisation). La relation est cependant très bonne avec une pente de régression linéaire de 0.937 et un R^2 de 0.63 ($n = 46$). La série temporelle des données modélisées reproduit généralement relativement bien les variations interannuelles des observations.

La rivière Nottaway présente quant à elle des séries temporelles similaires pour la modélisation et les observations, hormis certains décalages entre débit mesuré à la station et modélisé comme en 1980 et 1989. La régression linéaire croise le modèle idéal, mais la pente est légèrement inférieure à celle de la rivière Attawapiskat avec une valeur de 0.868 et un R^2 de 0.48.

2.1.4 Les erreurs relatives

Pour visualiser les écarts entre les débits annuels observés aux stations hydrométriques et les débits modélisés par ERA5, il est utile de normaliser les écarts en calculant l'erreur relative avec la formule :

$$\text{Erreur relative} = \frac{\text{Débit annuel modélisé} - \text{Débit annuel observé}}{\text{Débit annuel observé}}$$

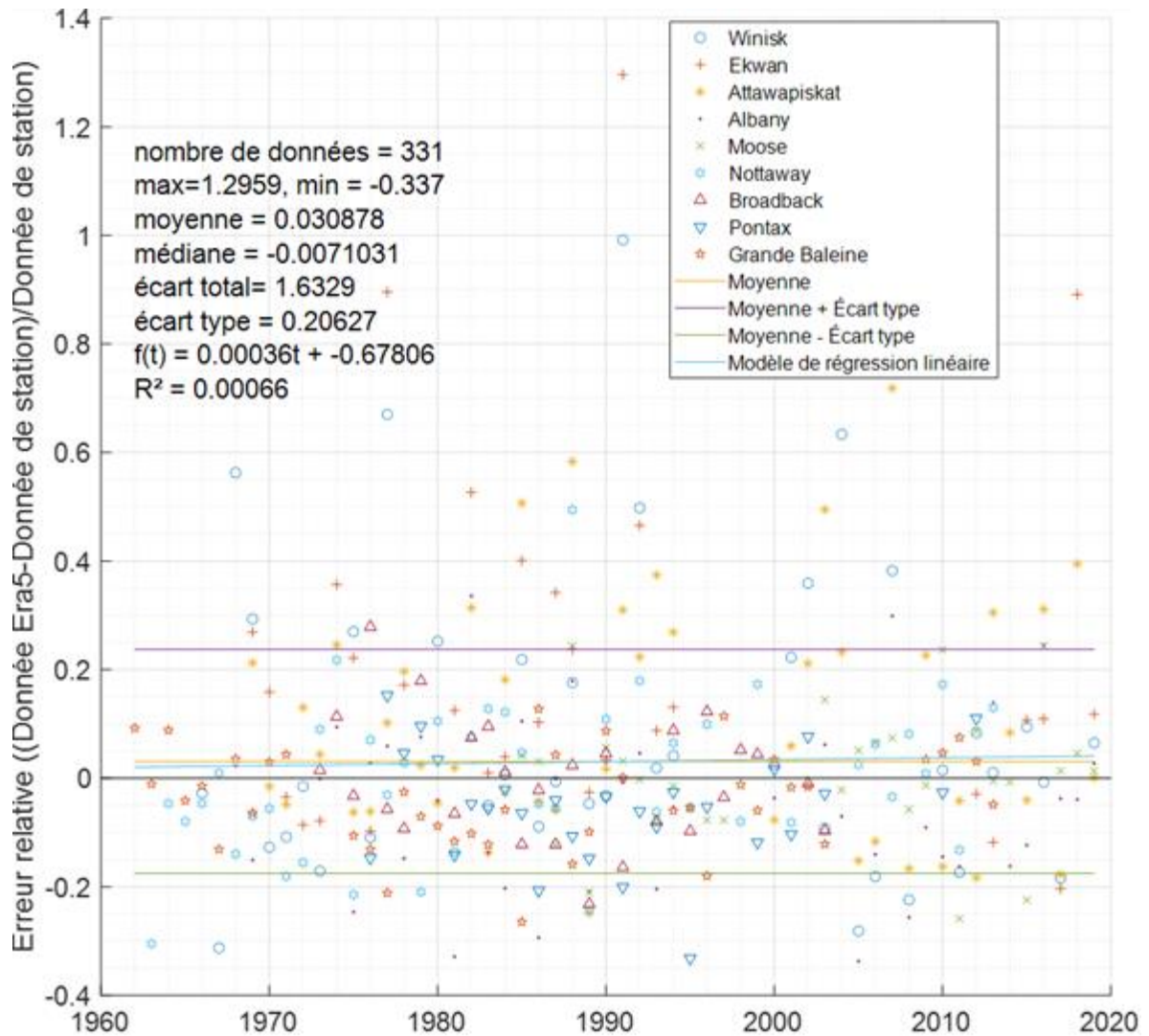


Figure 18. Erreurs relatives des données modélisées avec ERA5 par rapport aux stations hydrométriques sur l'ensemble des stations hydrométriques.

La Figure 18 présente les erreurs relatives sur l'ensemble des stations hydrométriques dans une série temporelle. Des droites représentant la moyenne ainsi que la moyenne plus et moins un écart type sont également présentées à des fins de visualisation. La moyenne des erreurs relatives est de 0.03. La distribution des erreurs relatives ne respecte pas la loi normale; les tests de Shapiro-Wilk, Anderson-Darling, Lilliefors et Jarque-Bera présentent à chaque fois des p-value inférieurs à 0.0001. Il serait donc erroné de dire que la distribution

possède une forme de cloche et que 68 % des valeurs sont incluses dans un intervalle de 2 écarts types autour de la moyenne. Toutefois, on constate que 260 de nos 331 erreurs relatives sont incluses dans l'intervalle moyen plus et moins un écart type, soit 79 % de nos données. L'erreur relative était inférieure à la moyenne moins l'écart type dans 32 cas (soit 10 % des cas) et supérieure à la moyenne plus l'écart type dans 39 cas (soit 12 % des cas).

En effectuant un test statistique bilatéral de rangs signés de Wilcoxon sur l'ensemble des erreurs relatives, on obtient un résultat Z de 0.655, attestant d'une p -value de 0.513. Ce test s'intéressant aux rangs de la distribution ne permet donc pas de rejeter l'hypothèse nulle que la médiane de l'erreur relative (-0.007) ne soit pas différente de 0. Dans 171 cas, les erreurs relatives sont négatives (valeur de station > valeur de modélisation) et positives dans 160 cas (valeur de station < valeur de modélisation). Les erreurs relatives tendent donc à être très légèrement plus souvent négatives. Pourtant, la moyenne de 0.031 semble témoigner du contraire. Cela est dû au fait que certaines valeurs exceptionnellement hautes semblent faire monter la valeur de la moyenne. Par exemple, la valeur donnée à la station hydrométrique de la rivière Ekwan pour l'année 1991 présente un écart de plus du double entre la valeur du modèle ERA5 et le débit mesuré à la station. Par ailleurs, trois bassins de station ont obtenu des résultats supérieurs à la moyenne plus l'écart type pour cette année. Ces erreurs relatives très élevées se produisent quand le débit mesuré est très faible et que le débit modélisé est plus grand. Dans ce cas, l'erreur n'a pas besoin d'être très grande pour que la division par un très petit dénominateur produise une erreur relative importante.

En résumé, on observe 52 % des cas où la valeur modélisée est inférieure à la mesure de la station, avec des cas extrêmes rares, tant en nombre qu'en intensité, et 48 % de cas où les valeurs modélisées sont plus élevées que les mesures des stations, mais avec des surestimations extrêmes plus fréquentes (4 % > moyenne plus 2 écarts types).

Enfin, le fait que la droite de régression linéaire soit pratiquement indissociable de la valeur moyenne (pente de 0.00036) et surtout le coefficient de détermination inférieur à 0.001 témoignent de l'absence de changement temporel dans les erreurs relatives.

La Figure 19 présente la série temporelle des débits annuels et des erreurs relatives pour la station hydrométrique sur la rivière Ekwan. Trois années présentent des erreurs relatives très importantes, par ordre d'importance décroissant, les années 1991, 1977 et 2018. La série temporelle met en exergue que ces trois années correspondent aux trois creux les plus importants dans les valeurs de ruissellement observées à la station. Les valeurs extraites à partir du modèle ERA5 présenteraient donc dans ce cas-ci des débits annuels qui surestiment nettement les années les plus sèches.

Sur l'ensemble des stations hydrométriques étudiées, c'est la rivière Ekwan qui présente les erreurs relatives positives les plus élevées. En effet, la moyenne des erreurs relatives (0.2072) est de loin supérieure à celle des huit autres stations. Seulement huit années présentent des erreurs relatives négatives contre 23 années avec des erreurs positives, dont les trois années susmentionnées avec des erreurs au-dessus de la moyenne plus un écart type de 0.33. À noter que la pente de régression des erreurs relatives est pratiquement nulle (-0.0005) pour un R^2 très faible (0.0006) ($p > 0.10$).

A contrario de la rivière Ekwan, la rivière Pontax (Figure 20) est la rivière avec la moyenne d'erreurs relatives la plus basse des neuf stations (-0.0543). 21 années présentent des erreurs relatives négatives contre seulement sept avec des erreurs positives. La pente de 0.0001 et le R^2 de 0.0002 démontrent l'absence de tendance temporelle ($p > 0.10$). À noter qu'ici, c'est l'année avec la valeur modélisée la plus faible (pour laquelle une valeur observée à la station hydrométrique est disponible) qui figure parmi les valeurs les plus négatives d'erreur relative (-0.3320) pour l'année 1995.

Les séries temporelles des débits modélisés et observés aux autres stations hydrologiques ainsi que les erreurs relatives sont présentées à l'Annexe I.

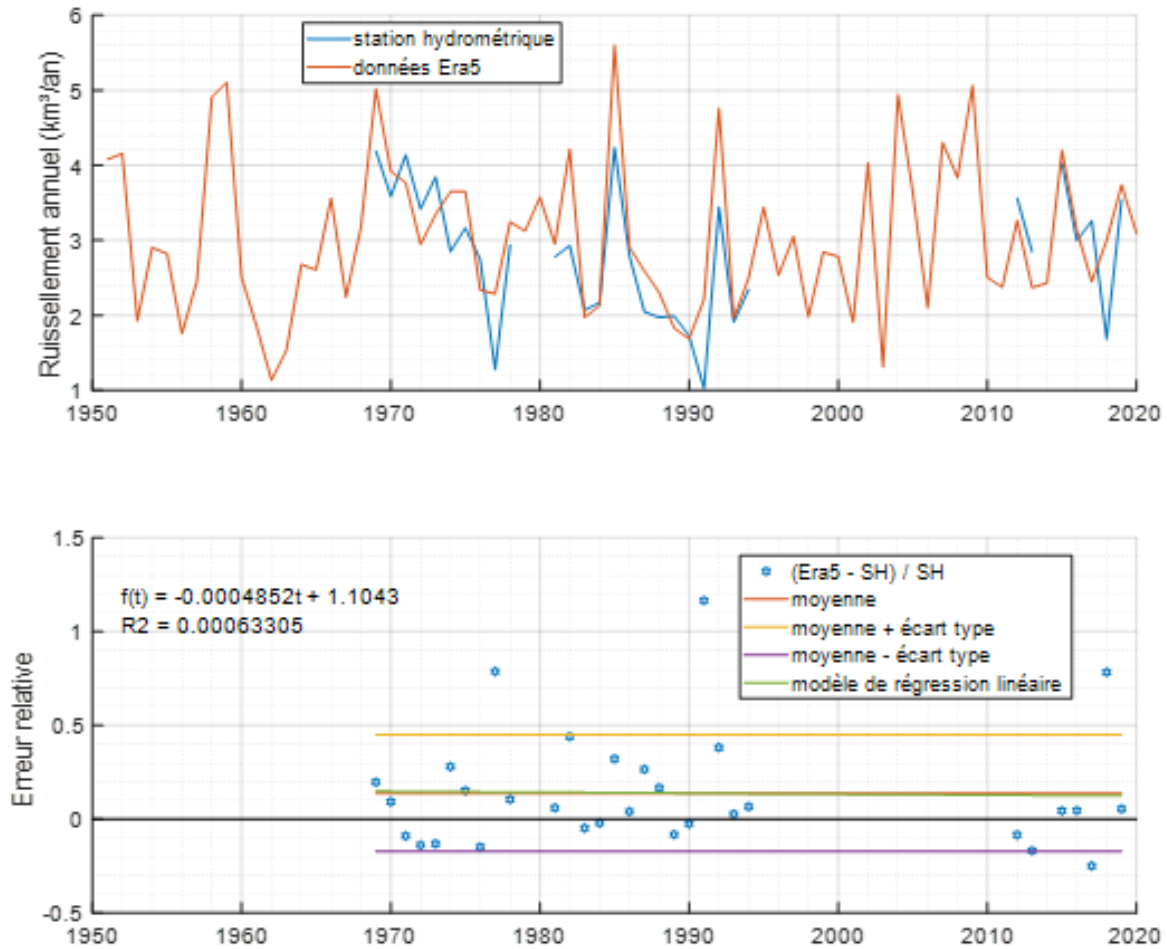


Figure 19. Rivière Ekwan. Haut : série temporelle des débits annuels de ruissellement observés à la station hydrométrique en comparaison avec ceux de modélisation. Bas : erreurs relatives des données modélisées par rapport aux observations de la station.

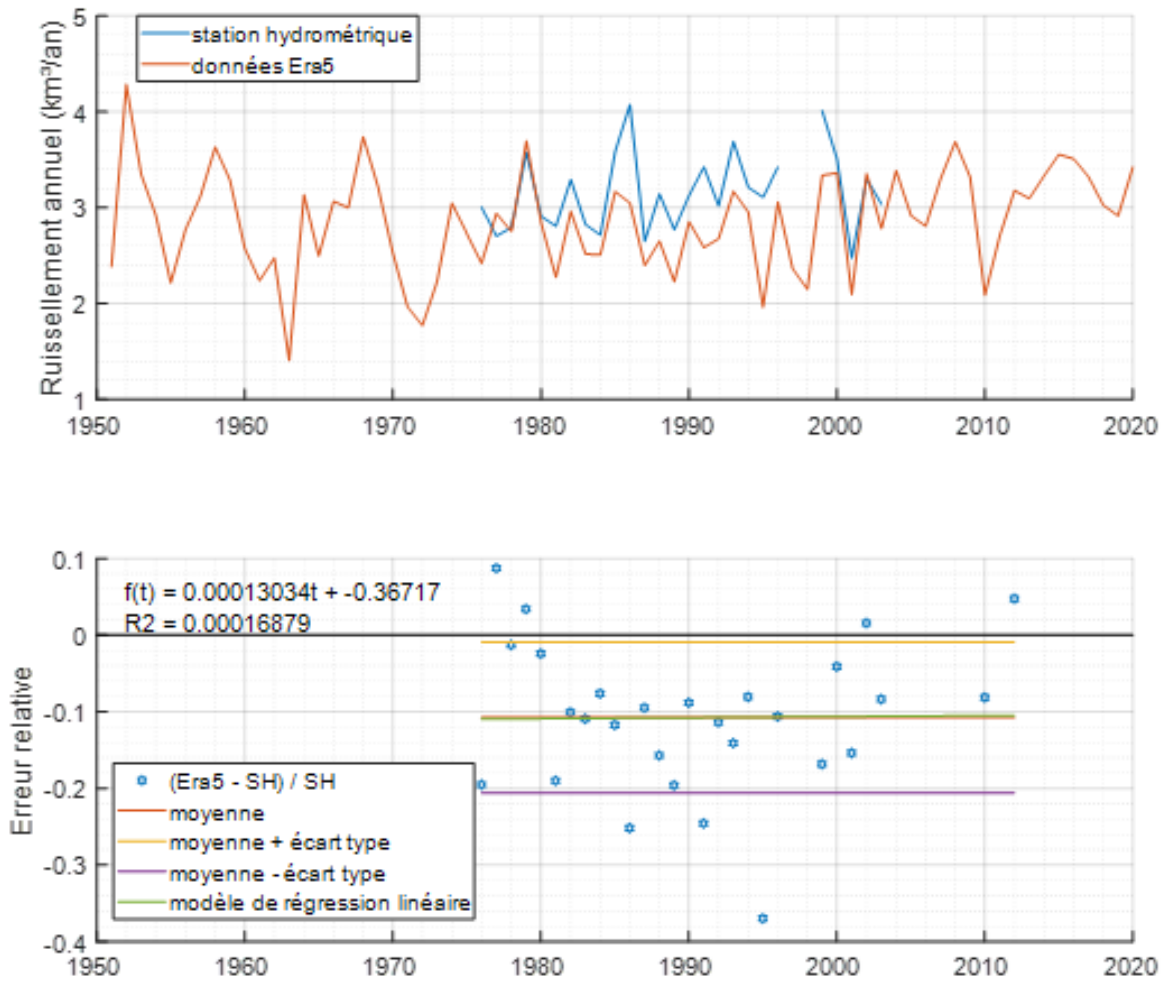


Figure 20. Rivière Pontax. Haut : série temporelle des débits annuels de ruissellement observés à la station hydrométrique en comparaison avec ceux de modélisation. Bas : erreurs relatives des données modélisées par rapport aux observations de la station.

2.2 RÉSULTATS DE LA MODÉLISATION

2.2.1 Rivières dont le cours a été altéré par le développement hydro-électrique

Une première considération lorsque l'on étudie les débits de ruissellement reçus à la baie James est de tenir compte des dérivations de cours d'eau servant à alimenter plusieurs

centrales hydroélectriques. Ces dérivations affectent les cours de cinq rivières : Caniapiscau, Grande rivière de la Baleine, la Grande, Eastmain et Rupert.

2.2.1.1 Rivières au débit diminué

a) *RIVIERE CANIAPISCAU*

La dérivation de la rivière Caniapiscau, qui coule naturellement vers la baie d'Ungava via la rivière Koksoak, apporte de l'eau douce dans le système de la baie James qui n'était pas présente avant 1982. La Figure 21 présente les débits annuels sur la période de 1951 à 2020 pour la partie amont de cette rivière qui est dérivée vers la rivière La Grande en passant par la partie amont du bassin de la Grande rivière de la Baleine. C'est la différence entre les valeurs sans dérivation et avec dérivation qui présente un intérêt pour le présent travail puisque cette valeur correspond à la quantité d'eau ajoutée dans le système de la baie James. Le moment de dérivation survient en 1982.

Le Tableau 7 indique les quantités d'eau douce provenant de la rivière Caniapiscau qui se sont ajoutées par ruissellement de 1982 à 2020 dans le cycle de l'eau douce de la baie James. Ces apports supplémentaires varient de 17.49 à 33.95 km³/an avec une moyenne de 25.74 km³/an (7.31 % de la quantité moyenne totale d'eau douce perçue initialement par la baie James) et un écart type de 3.91 km³/an. À noter que cette quantité d'eau douce a été soustraite à la baie d'Ungava et que la dérivation correspond à environ 30% du débit naturel de la rivière Koksoak.

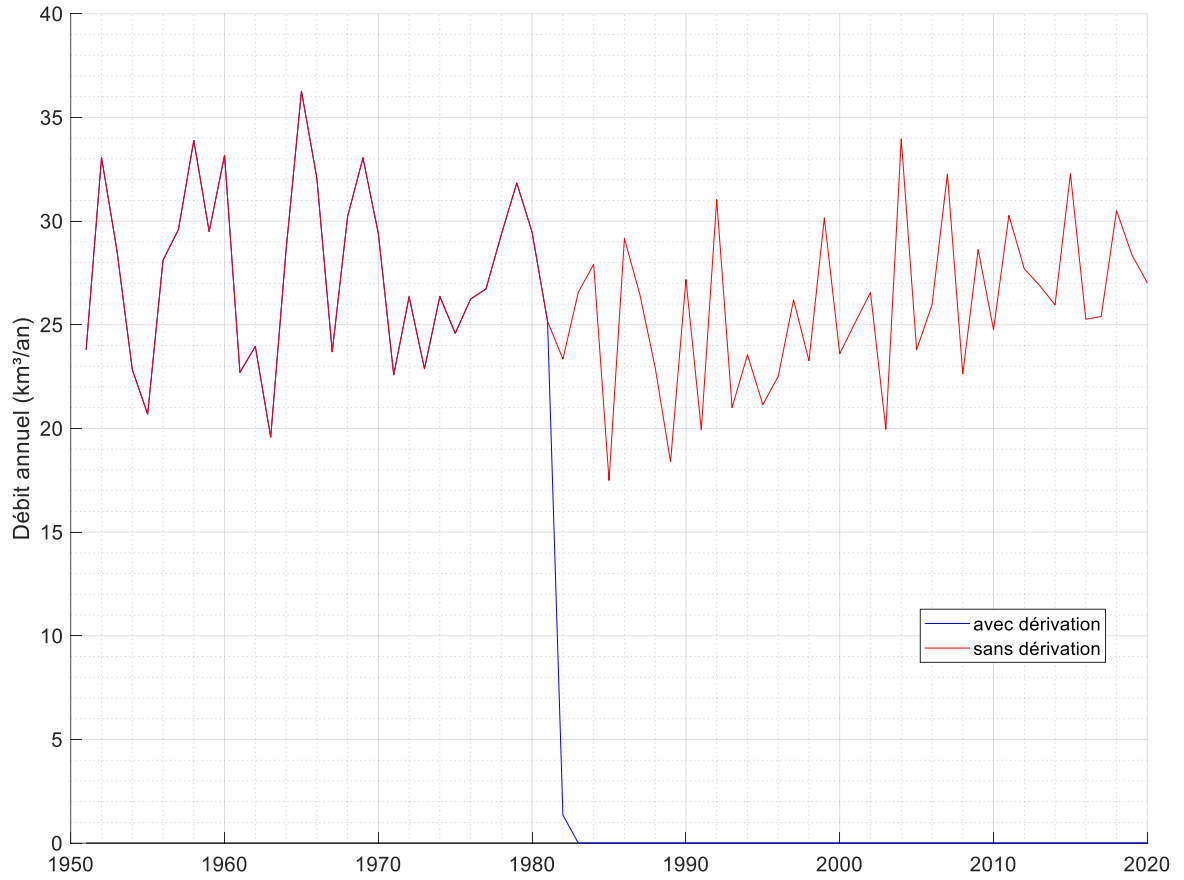


Figure 21. Débit annuel de la section amont de la rivière Caniapiscou pour la période de 1951 à 2021, soit avant et après la dérivation qui a eu lieu en octobre 1981.

Tableau 7. Apports d'eau douce en provenance de la rivière Caniapiscou ajoutés au système de la baie James en valeur absolue et relative à la quantité d'eau globale reçue à la baie James

Année	Apport d'eau douce		Année	Apport d'eau douce		Année	Apport d'eau douce	
	(km ³ /an)	% de l'apport naturel de la baie James		(km ³ /an)	% de l'apport naturel de la baie James		(km ³ /an)	% de l'apport naturel de la baie James
1982	21.99	6.15	1995	21.15	7.14	2008	22.63	5.77
1983	26.56	7.58	1996	22.51	6.24	2009	28.62	7.28
1984	27.92	8.09	1997	26.20	7.93	2010	24.77	9.08
1985	17.49	4.59	1998	23.26	8.93	2011	30.28	10.39
1986	29.16	7.97	1999	30.15	7.63	2012	27.70	8.36
1987	26.47	9.00	2000	23.60	6.23	2013	26.89	6.73
1988	22.94	6.67	2001	25.10	8.10	2014	25.96	6.78
1989	18.39	6.91	2002	26.55	6.40	2015	32.28	7.60
1990	27.18	7.53	2003	19.95	6.12	2016	25.27	6.46
1991	19.93	6.74	2004	33.97	7.92	2017	25.40	6.88
1992	31.03	7.77	2005	23.80	7.13	2018	30.50	8.41
1993	21.00	6.00	2006	25.95	7.65	2019	28.37	7.19
1994	23.55	6.83	2007	32.27	7.74	2020	27.02	7.25

b) GRANDE RIVIERE DE LA BALEINE

La Grande Rivière de la Baleine a seulement subi une légère diminution de son bassin versant au profit de la Grande Rivière en 1982. La partie déviée de la rivière Caniapiscou transite d'abord dans cette portion également déviée de la Grande rivière de la Baleine avant de terminer sa course dans la Grande Rivière. Comme le montre la Figure 22 présentant les débits en incluant et en excluant la présence de dérivation, la portion dérivée de la Grande rivière de la Baleine n'engendre pas une grande réduction du débit de la rivière (diminution de 1.08 km³/an en moyenne entre 1982-2020, soit 5.4% du débit naturel de la Grande rivière de la Baleine). La différence entre les valeurs sans dérivation et avec dérivation représente un nouvel intrant dans le secteur nord-est de la baie James et un extrant du secteur est de la baie d'Hudson. La pente de régression linéaire sans dérivation est de -0.0143 km³/an² pour

un R^2 de 0.008, témoignant d'une légère diminution annuelle du débit, qui n'est toutefois statistiquement pas significative ($p > 0.10$). La moyenne du débit de la Grande rivière de la Baleine est passée de 21.09 km^3/an (1951-1981) à 19.02 km^3/an (1982-2020). L'écart type est demeuré semblable avec une valeur de 3.11 km^3/an (1951-1981) et 3.10 km^3/an (1982-2020).

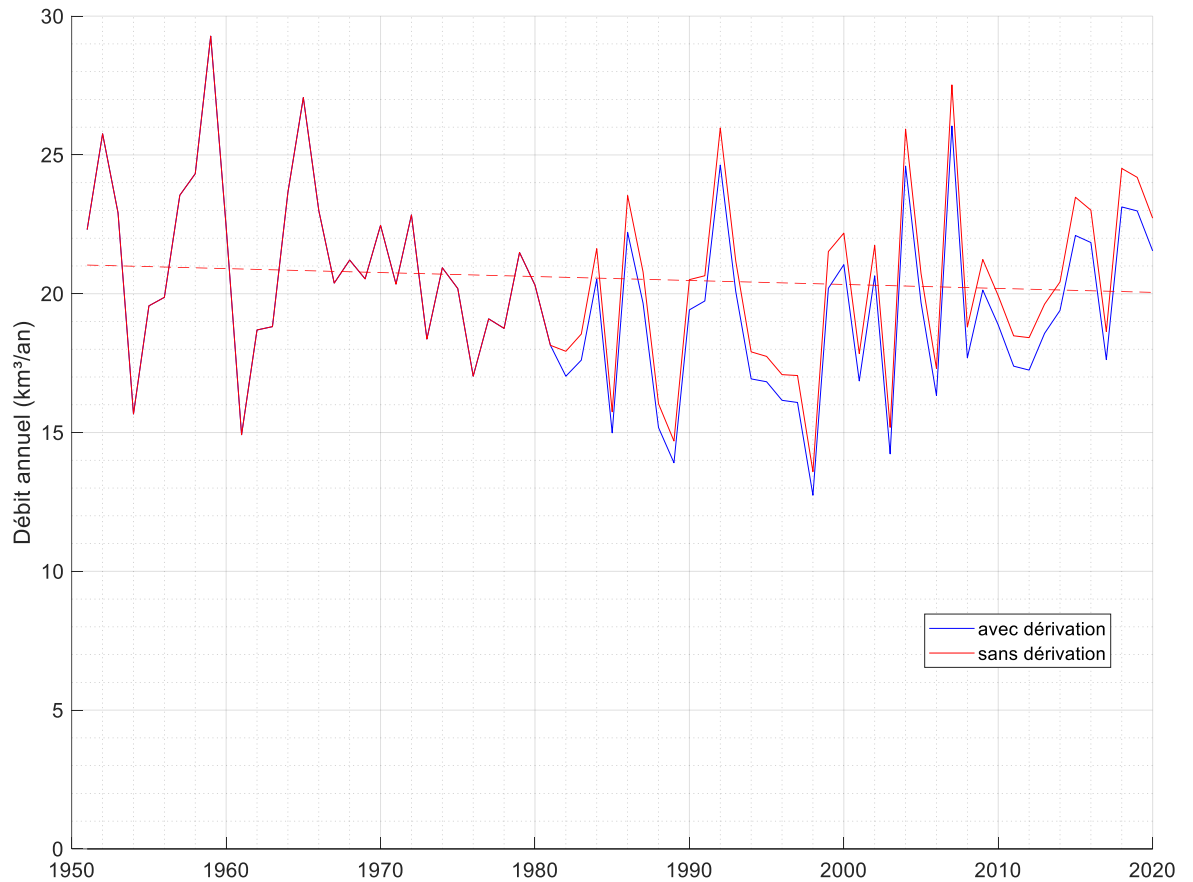


Figure 22. Comparatif entre le débit naturel de la Grande rivière de la Baleine et en considérant la dérivation à partir d'août 1983 aux fins de développement hydro-électrique. Excluant la dérivation, la régression linéaire sur la période de 1951 à 2020 donne un coefficient de régression de $-0.0143 \text{ km}^3/\text{an}^2$ avec un R^2 de 0.0082 ($p > 0.10$).

c) RIVIERE EASTMAIN

La rivière Eastmain est de loin la rivière dont le débit a été le plus diminué par les dérivations aux fins de développement hydro-électrique (Figure 23). Si la rivière n'avait jamais subi de dérivation, la pente de la régression linéaire sur la période de 1951 à 2020 aurait été de $0.0253 \text{ km}^3/\text{an}^2$ ($R^2 = 0.016$, $p > 0.10$). La dérivation a débuté vers la fin de l'année hydrologique de 1980. L'année 1981 est la première avec un débit complètement différent. De 1981 à 2020, c'est une moyenne de $25.32 \text{ km}^3/\text{an}$, soit 89.99 % de la valeur naturelle du débit du cours d'eau, qui est ainsi dérivé vers la Grande Rivière à partir de la rivière Eastmain. Cette rivière dont le cours moyen entre 1951 et 1979 était de $27.98 \text{ km}^3/\text{an}$ a ainsi vu son débit réduit à une valeur moyenne pour la période de 1981 à 2020 (on exclut l'année 1980 puisqu'elle est une transition pendant laquelle la dérivation n'est pas complète) de $2.82 \text{ km}^3/\text{an}$. À noter que la variabilité interannuelle est forte entre 1951 et 1979 avec un écart type de $4.81 \text{ km}^3/\text{an}$ et que la version altérée du cours d'eau ne présente qu'un écart type de $0.48 \text{ km}^3/\text{an}$. Cette dérivation affecte tout le secteur sud-est de la baie James qui voit une partie de l'eau douce qui lui était destinée être envoyée vers le secteur nord-est de la baie James.

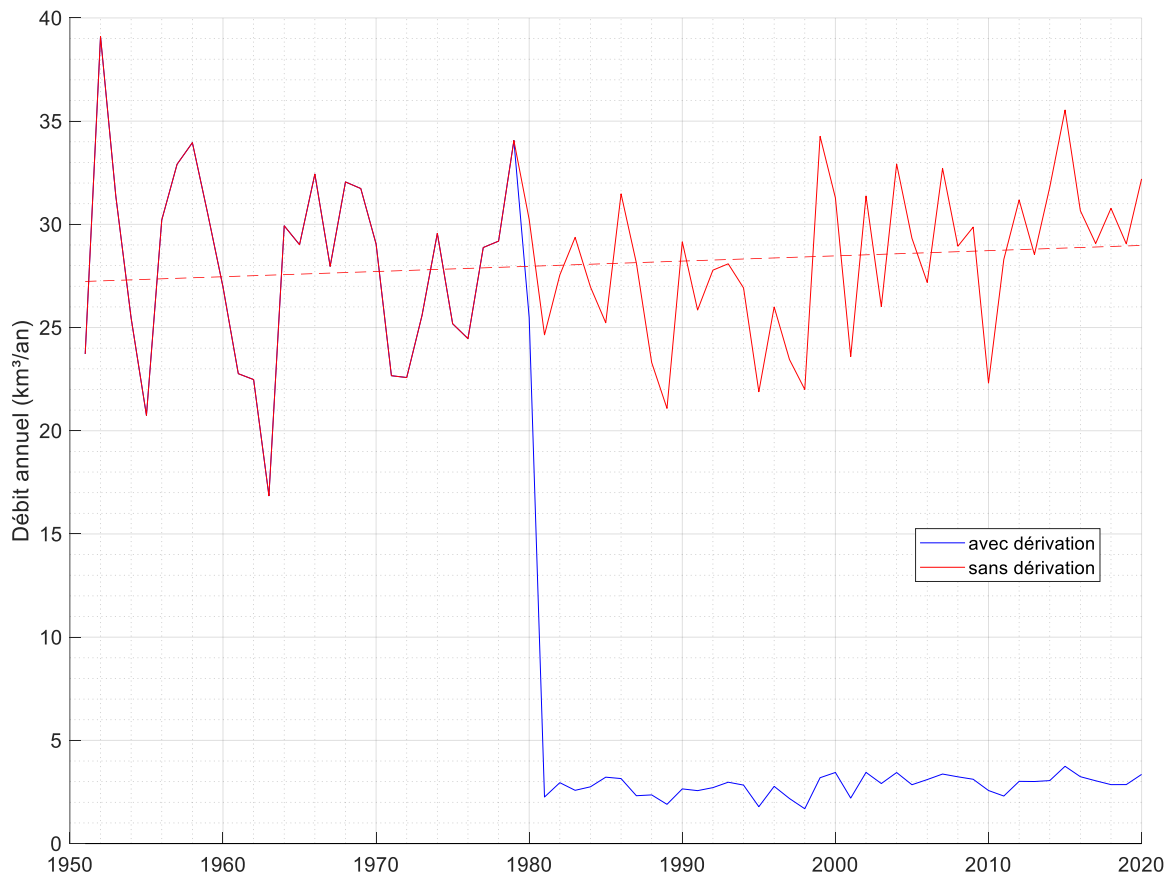


Figure 23. Comparatif entre le débit naturel de la rivière Eastmain et en considérant la dérivation à partir d'avril 1980 aux fins de développement hydro-électrique. La régression linéaire excluant la dérivation présente une pente de $0.0253 \text{ km}^3/\text{an}^2$ avec un R^2 de 0.016 ($p > 0.10$).

d) RIVIÈRE RUPERT

La dernière rivière dont le cours a été diminué, la rivière Rupert, a subi une dérivation seulement en 2010. La Figure 24 présente le détail des débits en considérant la dérivation et en l'excluant. La différence entre les deux débits représente un nouvel intrant dans le secteur nord-est de la baie James et un nouvel extrant du secteur sud-est de la baie James venant s'ajouter à celui de la rivière Eastmain. À noter que les débits réservés conformément aux ententes avec la nation crie ont été considérés dans la modélisation. Si la rivière n'avait pas été altérée, la pente de régression linéaire aurait été de $0.0529 \text{ km}^3/\text{an}^2$ ($R^2 = 0.064$, $p < 0.05$).

De 1951 à 2009, la moyenne d'eau perçue à l'embouchure de la rivière était de 27.35 km³/an. Cette moyenne a chuté à 12.79 km³/an des suites de la dérivation, dont environ 6.3 km³/an correspondent au débit résiduel qui passe le barrage de dérivation. C'est une diminution moyenne de 53% que subi le ruissellement de ce cours d'eau. Pour les mêmes périodes, l'écart type est passé de 4.13 km³/an à 0.73 km³/an. Cela démontre une forte uniformisation du débit suite à la dérivation qui s'explique principalement par le débit résiduel qui est peu variable d'une année à l'autre. De plus, les précipitations sur la partie basse du bassin versant pourraient être plus régulières que sur la partie haute du bassin versant qui culmine à plus de 500 m.

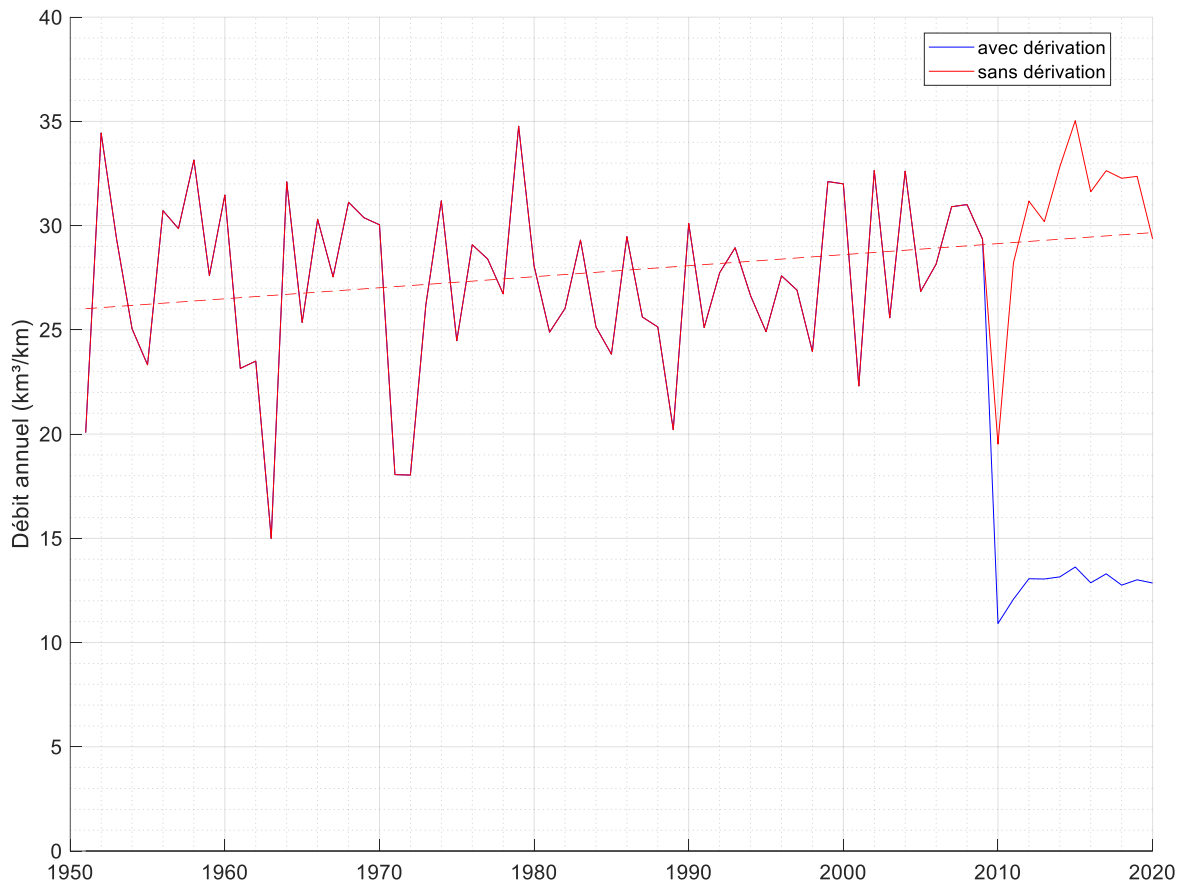


Figure 24. Comparatif entre le débit annuel naturel de la rivière Rupert et en considérant la dérivation à partir de novembre 2009 aux fins de développement hydro-électrique. La régression linéaire annuelle présente un coefficient de régression linéaire de $0.0529 \text{ km}^3/\text{an}^2$ avec un R^2 de 0.0641 ($p < 0.05$).

2.2.1.2 Rivière au débit augmenté

a) LA GRANDE RIVIÈRE

La rivière dont le débit a été augmenté par le détournement de toutes ces rivières est la Grande Rivière. Le Tableau 8 présente un rapport exhaustif des modifications subies sur le débit annuel de ruissellement à son embouchure. La Figure 25 montre la série temporelle des débits annuels de ruissellement en incluant les dérivations et remplissage des réservoirs et en les excluant. La pente de la régression linéaire du débit naturel de la période 1951-2020 est

positive, mais inférieure à $0.001 \text{ km}^3/\text{an}^2$ ($R^2 < 0.001$, $p > 0.10$). On constate toutefois que le débit de la rivière a grandement augmenté du fait des dérivations. À noter que le débit à l'embouchure a toutefois été réduit certaines années par le remplissage des réservoirs dont le détail est fourni dans le Tableau 8. En 1979 et 1980, le débit à l'embouchure de la Grande Rivière était inférieur au débit naturel lors du remplissage du réservoir Robert Bourassa (LG-2) et avant l'apport additionnel de la dérivation de la rivière Eastmain. La somme des apports de dérivation est la somme des volumes d'eau déviés annuellement des rivières Caniapiscou (à partir du 25 octobre 1981), Grande rivière de la Baleine (à partir d'août 1983), Eastmain (à partir d'avril 1980) et Rupert (à partir du 7 novembre 2009). Entre 1986 et 2009, soit après la fin des remplissages principaux des réservoirs et avant l'ajout de la rivière Rupert aux dérivations à des fins de développement hydro-électrique, c'est une augmentation moyenne de $50.68 \text{ km}^3/\text{an}$, soit 94 % du débit naturel de la rivière qui est observée par modélisation. De 2010 à 2020, soit après la dérivation de la partie amont de la rivière Rupert, c'est désormais une hausse moyenne de $75.39 \text{ km}^3/\text{an}$, soit une hausse de 128 % du débit naturel de la rivière qui est observée. Pour la période antérieure à toutes dérivations et remplissage de 1951 à 1978, le débit moyen de la rivière était de $56.69 \text{ km}^3/\text{an}$ avec un écart type de $9.56 \text{ km}^3/\text{an}$. Suite aux principaux remplissages de réservoir et dérivations, sur la période de 1986 à 2009, le débit moyen à l'embouchure de la rivière a été de $105.07 \text{ km}^3/\text{an}$ avec un écart type de $15.69 \text{ km}^3/\text{an}$. Durant la période suivant l'ajout de la dérivation Rupert de 2010 (2010-2020), le débit moyen est passé à $131.86 \text{ km}^3/\text{an}$ pour un écart type de $13.09 \text{ km}^3/\text{an}$.

Tableau 8. Rapport exhaustif des altérations du débit de la Grande Rivière.

Année	Débit naturel	Débit altéré	Différence	Somme des apports de dérivations	Remplissage des réservoirs	Pourcentage de hausse
	km ³ /an			%		
1979	62.91	25.16	-37.75	0.00	37.75	-60.00
1980	62.62	46.64	-15.98	4.76	20.74	-25.52
1981	47.60	62.05	14.45	22.39	7.94	30.36
1982	50.03	70.62	20.59	47.48	26.89	41.15
1983	53.88	72.19	18.31	54.29	35.99	33.98
1984	55.92	72.56	16.64	53.23	36.59	29.75
1985	43.40	82.19	38.79	40.26	1.47	89.38
1986	67.67	126.48	58.81	58.81	-	86.91
1987	58.34	111.75	53.41	53.41	-	91.54
1988	41.79	86.53	44.74	44.74	-	107.08
1989	39.73	78.08	38.36	38.36	-	96.56
1990	55.87	110.65	54.78	54.78	-	98.04
1991	50.66	94.78	44.13	44.13	-	87.11
1992	58.98	116.42	57.44	57.44	-	97.38
1993	54.13	97.52	43.39	47.22	3.83	80.16
1994	52.82	99.10	46.27	48.62	2.34	87.60
1995	48.48	90.65	42.17	42.17	-	86.97
1996	48.49	95.15	46.66	46.66	-	96.22
1997	45.35	93.79	48.44	48.44	-	106.82
1998	40.78	85.20	44.43	44.43	-	108.95
1999	69.81	132.35	62.55	62.55	-	89.61
2000	56.80	109.37	52.58	52.58	-	92.57
2001	53.43	100.91	47.48	47.48	-	88.86
2002	59.07	114.64	55.56	55.56	-	94.06
2003	44.94	88.96	44.02	44.02	-	97.95
2004	65.88	130.66	64.78	64.78	-	98.33
2005	58.14	109.46	51.32	51.32	-	88.28
2006	51.91	97.93	46.03	51.01	4.98	88.68
2007	73.64	136.73	63.09	63.09	-	85.68
2008	53.57	103.02	49.44	49.44	-	92.29
2009	54.94	111.41	56.47	56.47	-	102.79
2010	51.10	103.78	52.68	54.16	1.48	103.08
2011	55.59	129.10	73.51	73.51	-	132.24
2012	57.32	132.46	75.15	75.15	-	131.11
2013	53.83	124.45	70.62	70.62	-	131.20
2014	57.62	133.02	75.40	75.40	-	130.86
2015	70.06	156.93	86.87	86.87	-	124.00
2016	58.05	130.67	72.62	72.62	-	125.08
2017	53.01	124.78	71.78	71.78	-	135.41
2018	64.04	143.36	79.32	79.32	-	123.87
2019	58.14	133.26	75.12	75.12	-	129.21
2020	65.07	138.64	73.56	73.56	-	113.05

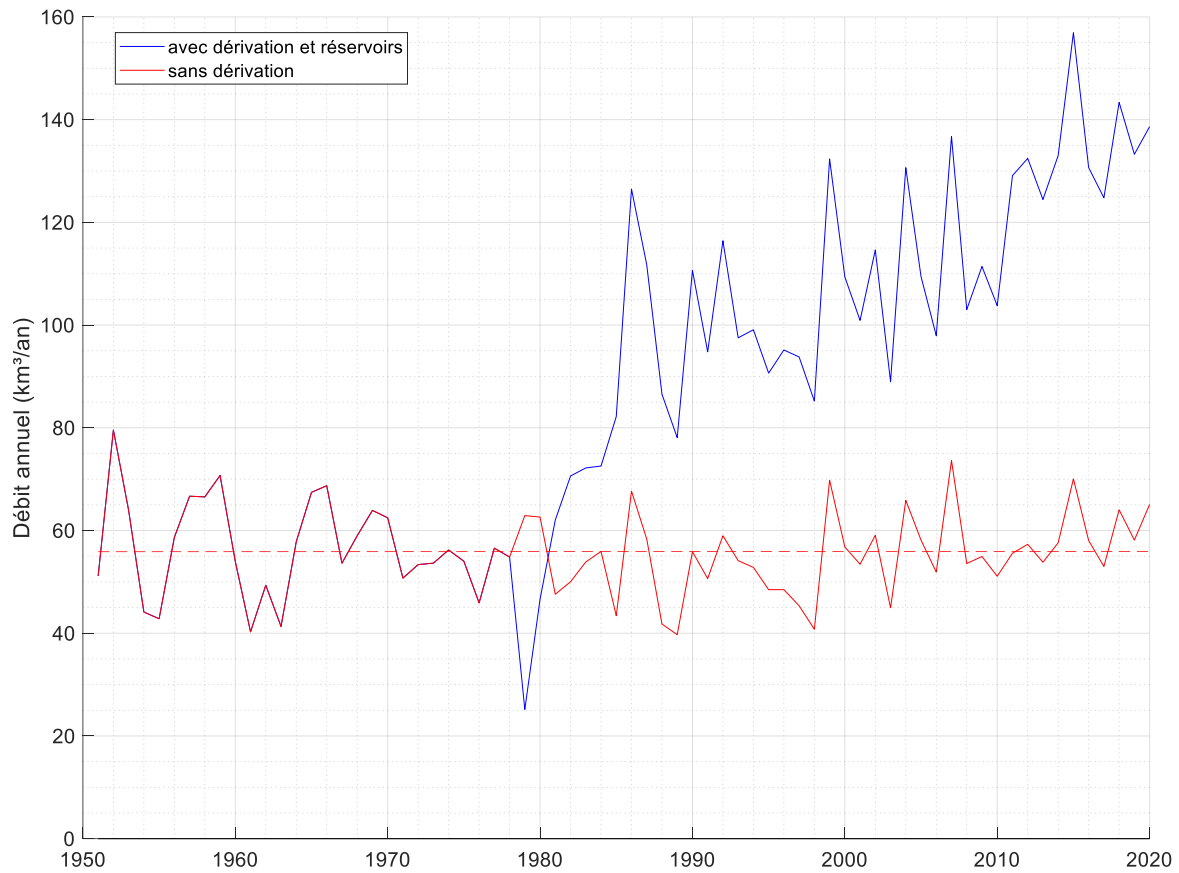


Figure 25. Comparatif entre le débit naturel de la Grande Rivière et en considérant les dérivations et remplissage de réservoir aux fins de développement hydro-électrique. La régression linéaire signale une augmentation moyenne du débit naturel de $0.0007 \text{ km}^3/\text{an}^2$ avec un $R^2 < 0.001$ ($p > 0.10$). La différence entre les deux débits représente un nouvel intrant dans le secteur nord-est de la baie James en provenance des secteurs baie d'Hudson est, baie James sud-est et de la baie d'Ungava.

2.2.2 Les débits annuels de ruissellement par secteurs

La zone d'étude du présent travail a été séparée en sept secteurs (voir Figure 4, Tableaux 1 et 2). **Le bassin versant de la baie James est donc constitué des secteurs 0 et 2 à 5 et l'ensemble de la zone d'étude, des secteurs 0 à 6.** Dans cette section, nous présentons les résultats obtenus pour chaque secteur pour la période 1951-2020. Le récapitulatif des moyennes, pentes, coefficients de détermination et écarts types par secteur est présenté au Tableau 9.

Tableau 9. Résumé des moyennes, pentes, R² et écart type des sept secteurs. Les scénarios réel et naturel sont présentés en parallèle. *Le R² est significatif à p = 0.10. **Le R² est significatif à p = 0.05. *** Le R² est significatif à p = 0.01.

Zone	Sans dérivations (naturel)				Avec dérivations (réel)			
	Moyenne (km ³ /an)	Pente (km ³ /an ²)	R ² -	Écart type (km ³ /an)	Moyenne (km ³ /an)	Pente (km ³ /an ²)	R ² -	Écart type (km ³ /an)
Secteur 0	38.12	-0.0817	0.111***	4.98	38.12	-0.0817	0.111***	4.98
Secteur 1	22.94	-0.0166	0.009	3.54	22.34	-0.0406	0.053*	3.58
Secteur 2	68.47	-0.0003	0.0000	10.34	98.16	1.362	0.707***	32.97
Secteur 3	111.50	0.1833	0.049*	16.94	94.19	-0.572	0.324***	20.44
Secteur 4	104.88	0.143	0.022	19.78	104.88	0.143	0.022	19.78
Secteur 5	28.97	0.026	0.004	8.46	28.97	0.026	0.004	8.46
Secteur 6	25.13	0.0041	0.0001	7.50	25.13	0.0041	0.0001	7.50

2.2.2.1 Secteur 0

Le secteur 0 représente la baie James en elle-même ainsi que les îles non côtières dont la principale est l'île Akamiski. Ce n'est donc pas à proprement parler du ruissellement, mais plutôt les précipitations nettes tombant directement dans la baie James qui sont présentées ici. La série temporelle de ce secteur témoigne d'une diminution marquée des précipitations nettes de 0.0817 km³/an², ce qui, si on le compare à la moyenne des précipitations nettes de 38.12 km³/an pour un écart type de 4.98 km³/an, représente tout de même une diminution de 0.2 %/an pour la période 1951-2020 (Figure 26). Il y a, pour ce secteur, une hausse de la

valeur absolue de l'évaporation qui n'est pas contrebalancée par une hausse des précipitations. À noter que l'on parle ici de précipitation nette et non de débit de ruissellement puisqu'il s'agit ici d'eau tombant directement sur la baie James.

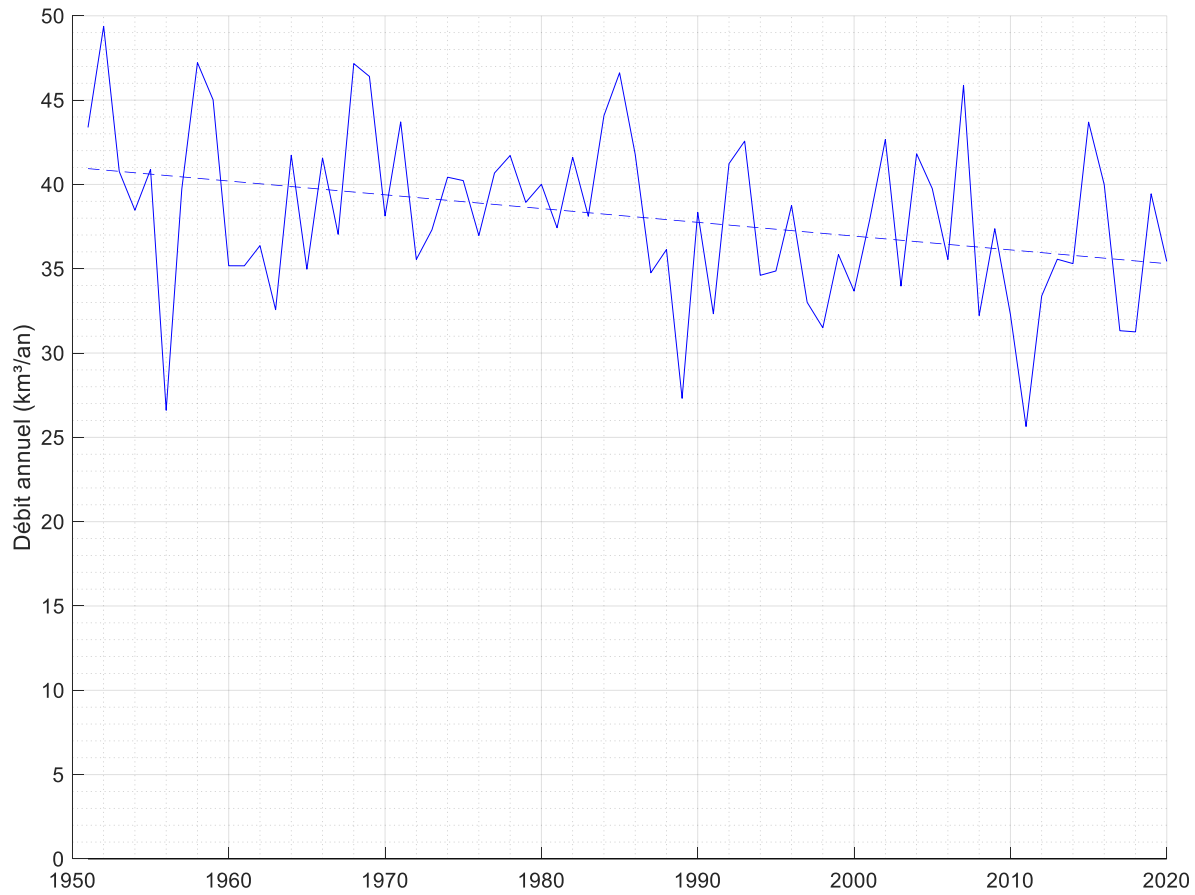


Figure 26. Secteur 0 : baie James (eau et îles non côtières). Série temporelle des précipitations nettes (équivalent au débit de ruissellement) sur la période de 1951 à 2020. La régression linéaire témoigne d'une diminution moyenne de $0.0817 \text{ km}^3/\text{an}^2$ avec un R^2 de 0.111 ($p < 0.01$).

2.2.2.2 Secteur 1

En ce qui a trait au secteur 1, soit la zone à l'est de la baie James dans la baie d'Hudson, la Figure 27 en présente la série temporelle du ruissellement réel et sans la dérivation, c'est-à-dire ce qui serait survenu si la partie supérieure du bassin versant de la Grande rivière de la Baleine n'avait jamais été déviée. Les pentes des régressions linéaires sont respectivement de $-0.0406 \text{ km}^3/\text{an}^2$ ($R^2 = 0.053$, $p < 0.10$) et $-0.0166 \text{ km}^3/\text{an}^2$ ($R^2 = 0.009$, $p > 0.10$). À noter que la seule chose expliquant la différence entre les pentes des régressions est le détournement d'une partie du bassin versant de la Grande rivière de la Baleine, présent dans ce secteur. On constate que malgré qu'une faible partie seulement du secteur ait été déviée, cela engendre un impact important sur la pente de la régression. Cette pente ne fait pas état d'une diminution progressive du débit, mais n'est affectée que par le détournement survenu en 1982. Cela dit, d'un point de vue holistique, il importe de montrer la pente qui reflète la réalité du bassin versant sujet aux modifications anthropiques. La faiblesse des R^2 démontre toutefois que ces régressions ne représentent que très peu la variation que subi le secteur. Les pentes auraient été inversées si la période avait été de 1982 à 2020, témoignant d'une hausse du débit sur cette période. Pour la période de 1951 à 2020, la moyenne du débit sans dérivation du secteur est de $22.94 \text{ km}^3/\text{an}$ et cette moyenne passe à $22.34 \text{ km}^3/\text{an}$ en incluant les dérivations. Les écarts types respectifs sont de $3.54 \text{ km}^3/\text{an}$ et de $3.58 \text{ km}^3/\text{an}$.

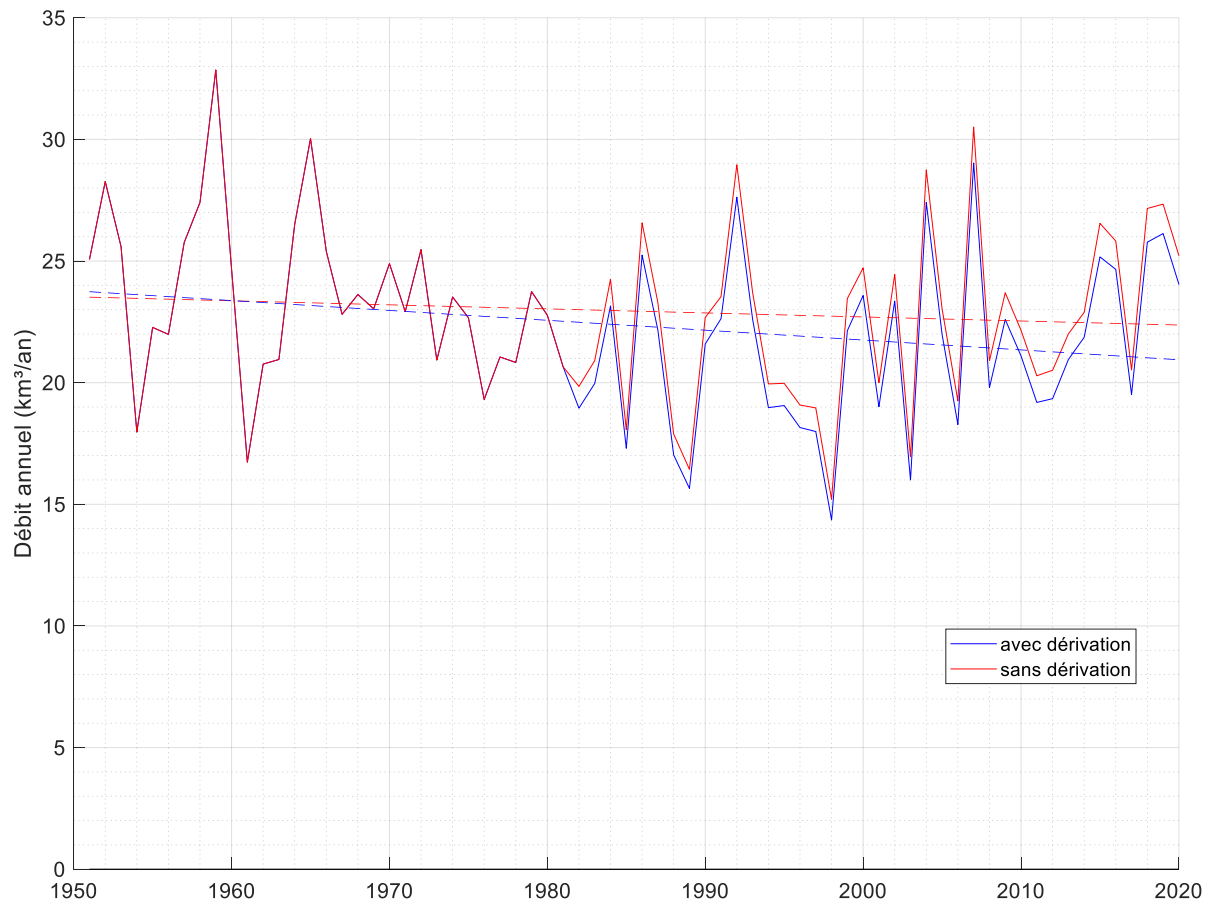


Figure 27. Secteur 1 : baie d'Hudson à l'est de la baie James. Série temporelle du débit de ruissellement sur la période de 1951 à 2020 en incluant et excluant les dérivations de bassins versants. La régression linéaire du débit naturel témoigne d'une diminution moyenne du débit de $0.0166 \text{ km}^3/\text{an}^2$ avec un R^2 de 0.0091 ($p > 0.10$). La régression linéaire du débit incluant l'impact de la dérivation montre une diminution moyenne du débit de $0.0406 \text{ km}^3/\text{an}^2$ avec un R^2 de 0.0531 ($p < 0.10$).

2.2.2.3 Secteur 2

Le secteur 2, le nord-est de la baie James, qui inclut la Grande Rivière, présente les altérations anthropiques les plus importantes de tous les secteurs. Le contrecoup du remplissage des réservoirs se fait sentir de 1979 à 1985 et avec un effet moins marqué pour 1993, 1994, 2006 et 2010 diminuant ainsi l'eau parvenant à l'embouchure de la rivière pour ces périodes. Cela dit, les dérivations compensent largement pour ces pertes sauf en 1979-1980 et elles changent complètement le profil de ruissellement annuel du secteur comme en témoigne la Figure 28. La pente de la régression linéaire du débit naturel est pratiquement nulle avec une valeur de $-0.0031 \text{ km}^3/\text{an}^2$ pour un R^2 inférieur à 0.0001 ($p > 0.10$). Cette pente prend une valeur de $1.362 \text{ km}^3/\text{an}^2$ avec un R^2 de 0.707 ($p < 0.01$) lorsque l'on considère les dérivations. Trois paliers sont visibles, soit avant les dérivations, après les dérivations de la phase 1 de construction de barrages d'Hydro-Québec (1980 à 2009) et après la dérivation de la rivière Rupert (phase 3) (2010 à 2020). La contribution de la Grande Rivière est indéniable même sans la dérivation alors qu'elle contribue à hauteur de 82 % en moyenne sur la période de 1951 à 2020 à l'apport d'eau douce du secteur. Cette proportion passe à 86 % en incluant les dérivations. Sur la période après la dérivation Rupert (2010 à 2020), cette proportion passe à 91 % en incluant les dérivations. Sans dérivation ni remplissage, c'est une moyenne de $68.47 \text{ km}^3/\text{an}$ d'eau qui ruisselle annuellement dans la baie James à partir de ce secteur sur la période de 1951 à 2020. Sur la même période, ce débit passe à $98.16 \text{ km}^3/\text{an}$ en incluant les dérivations. L'écart type passe quant à lui de $10.34 \text{ km}^3/\text{an}$ à $32.97 \text{ km}^3/\text{an}$ sur la même période entre scénario sans dérivation et incluant les dérivations. En excluant la période principale de remplissage des bassins, de 1979 à 1984, sur le débit incluant les dérivations, les périodes de 1951 à 1978, 1985 à 2009 et 2010 à 2020 présentent des débits moyens respectifs de 69.38, 116.28 et $145.12 \text{ km}^3/\text{an}$ et des écarts type de 11.36, 17.76 et $14.49 \text{ km}^3/\text{an}$. À noter que les nouveaux intrants dans le secteur 2 proviennent des secteurs 1 et 3 et de la rivière Caniapiscau.

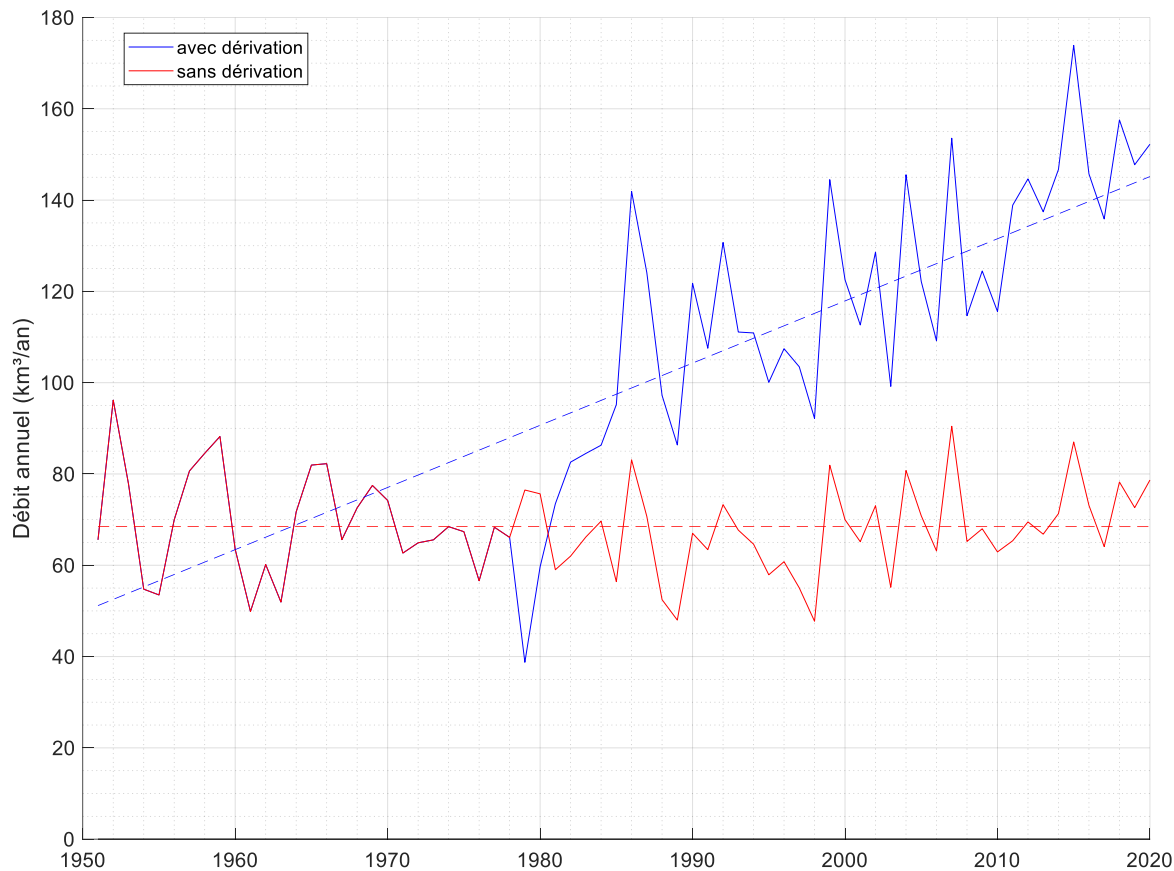


Figure 28. Secteur 2 : nord-est de la baie James. Série temporelle du débit de ruissellement sur la période de 1951 à 2020 en incluant et excluant les dérivations de bassins versants. La régression linéaire du débit naturel témoigne d’une diminution moyenne du débit de $0.0003 \text{ km}^3/\text{an}^2$ avec un R^2 de <0.0001 ($p > 0.10$). La régression linéaire du débit après dérivation et tenant compte du remplissage des réservoirs montre une augmentation moyenne de $1.3620 \text{ km}^3/\text{an}^2$ avec un R^2 de 0.707 ($p < 0.01$).

2.2.2.4 Secteur 3

Le secteur 3, le sud-est de la baie James, a quant à lui perdu une importante partie de son débit annuel de ruissellement au profit du secteur 2. C’est à partir de 1980 que le cours de la rivière Eastmain est dérivé vers la Grande Rivière. S’y ajoute en 2010 la dérivation de la rivière Rupert. La série temporelle des débits annuels incluant et excluant les dérivations est présentée à la Figure 29. On constate que le débit qui aurait naturellement augmenté à un

taux de $0.1833 \text{ km}^3/\text{an}^2$ ($R^2 = 0.049$, ($p < 0.10$)) diminue plutôt de $0.5720 \text{ km}^3/\text{an}^2$ ($R^2 = 0.3244$, $p < 0.01$) des suites des dérivation pour la période de 1951 à 2020. La moyenne du débit naturel sur la même période est de $111.50 \text{ km}^3/\text{an}$ avec un écart type de $16.94 \text{ km}^3/\text{an}$. Celle du débit altéré est plutôt de $94.19 \text{ km}^3/\text{an}$ avec un écart type légèrement plus prononcé de $20.44 \text{ km}^3/\text{an}$. En subdivisant la série temporelle en trois paliers, soit avant les dérivation (1951-1979), entre la dérivation de la rivière Eastmain et celle de la Rupert (1980-2009) et suivant la dérivation Rupert (2010-2020), on obtient respectivement des moyennes de débits de 109.49 , 86.00 et $76.16 \text{ km}^3/\text{an}$ pour des écarts types respectifs de 20.24 , 11.80 et $9.63 \text{ km}^3/\text{an}$. Cette diminution des débits est amoindrie par la hausse naturelle du ruissellement. En effet, pour les mêmes périodes respectives, les débits naturels auraient été de 109.49 , 110.03 et $120.80 \text{ km}^3/\text{an}$. La contribution de la rivière Eastmain change considérablement le cycle de l'eau douce de ce secteur. Sans dérivation, une moyenne de 25.3% de l'eau douce du secteur 3 provient de la rivière Eastmain sur la période de 1951 à 2020. Pour les périodes d'avant et après la dérivation, la contribution réelle de la rivière passe de 25.6% (1951-1979) à 3.4% (1980-2020). Pour la rivière Rupert, c'est une contribution sans dérivation de 25.0% (1951-2020) qui passe dans la réalité de 28.6% (1951-2009) à 17.0% (2010-2020). Entre les trois paliers, la variabilité interannuelle diminue également de manière importante comme en témoigne la diminution des écarts types de ces trois périodes.

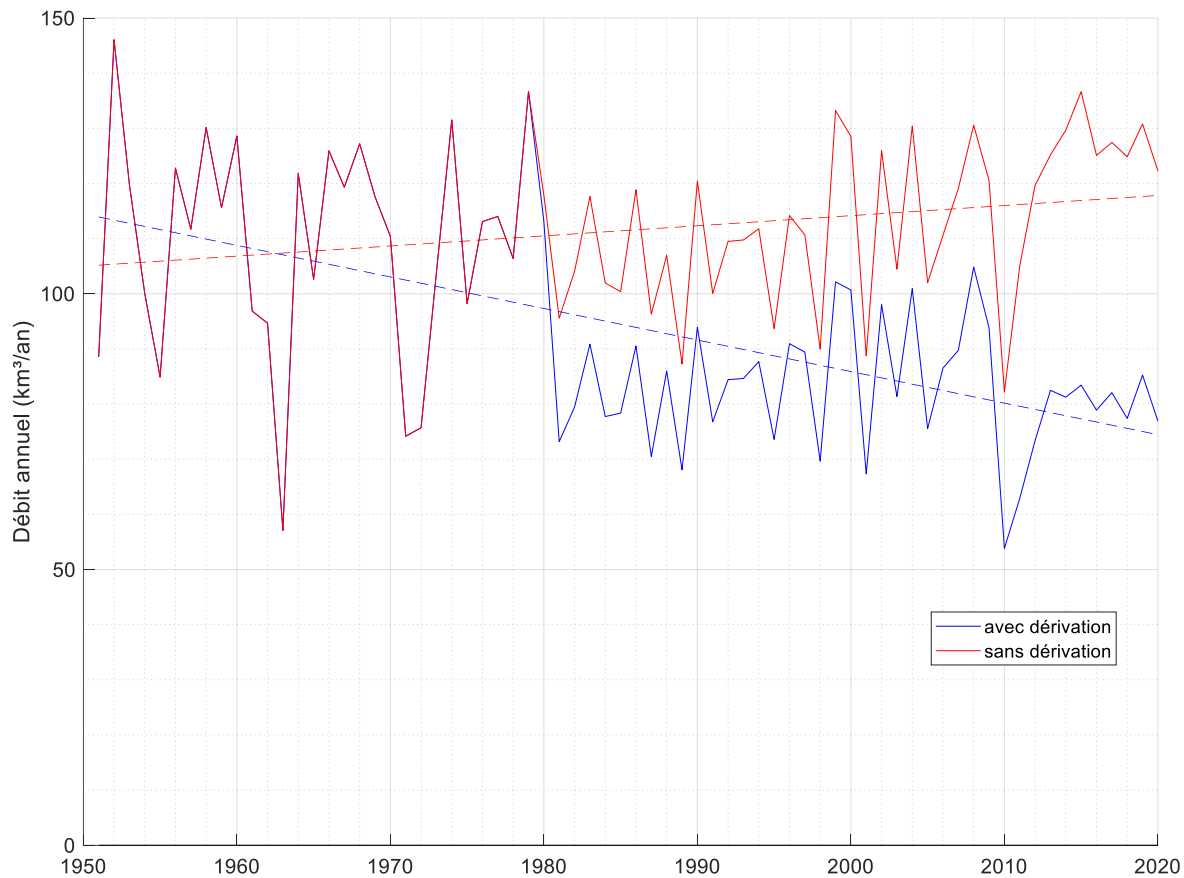


Figure 29. Secteur 3 : sud-est de la baie James. Série temporelle du débit de ruissellement sur la période de 1951 à 2020 en incluant et excluant les dérivations de bassins versants. La régression linéaire du débit naturel témoigne d'une augmentation moyenne du débit de $0.1833 \text{ km}^3/\text{an}^2$ avec un R^2 de 0.049 ($p < 0.10$). La régression linéaire du débit après dérivation montre plutôt une diminution moyenne du débit de $0.5720 \text{ km}^3/\text{an}^2$ avec un R^2 de 0.324 ($p < 0.01$).

2.2.2.5 Secteur 4

Les secteurs 4, 5 et 6 n'ont pas subi d'altération de leurs bassins versant pendant la période d'étude de 1951 à 2020. Le secteur 4, le sud-ouest de la baie James, présente une augmentation régulière de son ruissellement dans la série temporelle des débits de la Figure 30 de $0.1430 \text{ km}^3/\text{an}^2$ pour un R^2 de 0.022 ($p > 0.10$). Alors que le secteur 3 présentait les plus forts débits annuels en excluant les dérivations, c'est désormais le secteur 4 qui présente la

moyenne la plus élevée de ruissellement avec un débit de $104.88 \text{ km}^3/\text{an}$ pour un écart type de $19.78 \text{ km}^3/\text{an}$. Comme en témoigne l'écart type, la variation interannuelle est importante. Il y a une forte oscillation d'une année à l'autre des débits annuels autour de la pente de régression linéaire, témoignant d'une alternance bisannuelle importante entre débit annuel fort et débit annuel faible.

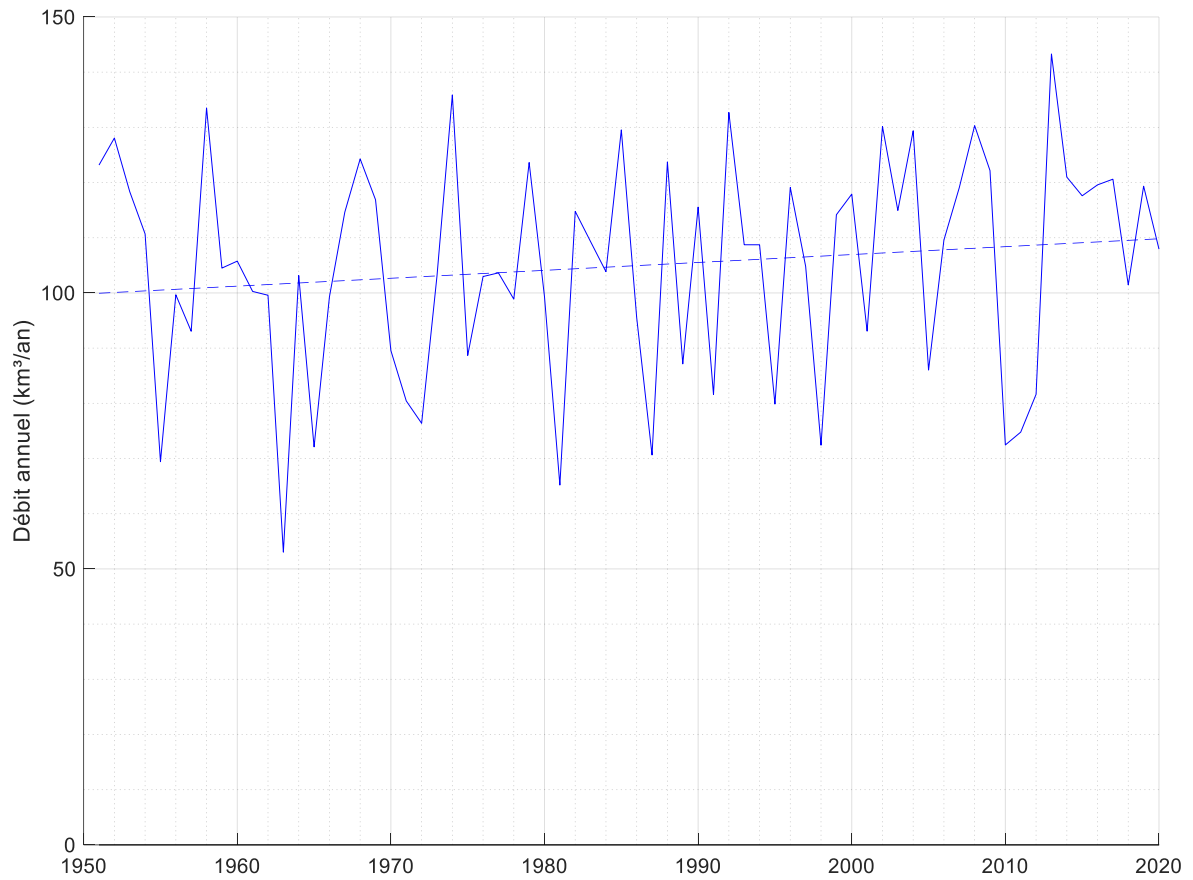


Figure 30. Secteur 4 : sud-ouest de la baie James. Série temporelle du ruissellement pour la période de 1951 à 2020. La pente de régression linéaire du débit est de $0.1430 \text{ km}^3/\text{an}^2$ avec un R^2 de 0.022 ($p > 0.10$).

2.2.2.6 Secteur 5

Le secteur 5, la section nord-ouest de la baie James, présenté dans la série temporelle des débits de ruissellement de la Figure 31, montre également une tendance à la hausse des débits de ruissellement. Cette hausse est toutefois moins marquée que dans la section directement au sud avec une pente de régression linéaire de $0.0260 \text{ km}^3/\text{an}^2$ pour un R^2 de 0.004 ($p > 0.10$). Sur la même période de 1951 à 2020, la moyenne des débits est de $28.97 \text{ km}^3/\text{an}$ pour un écart type de $8.46 \text{ km}^3/\text{an}$.

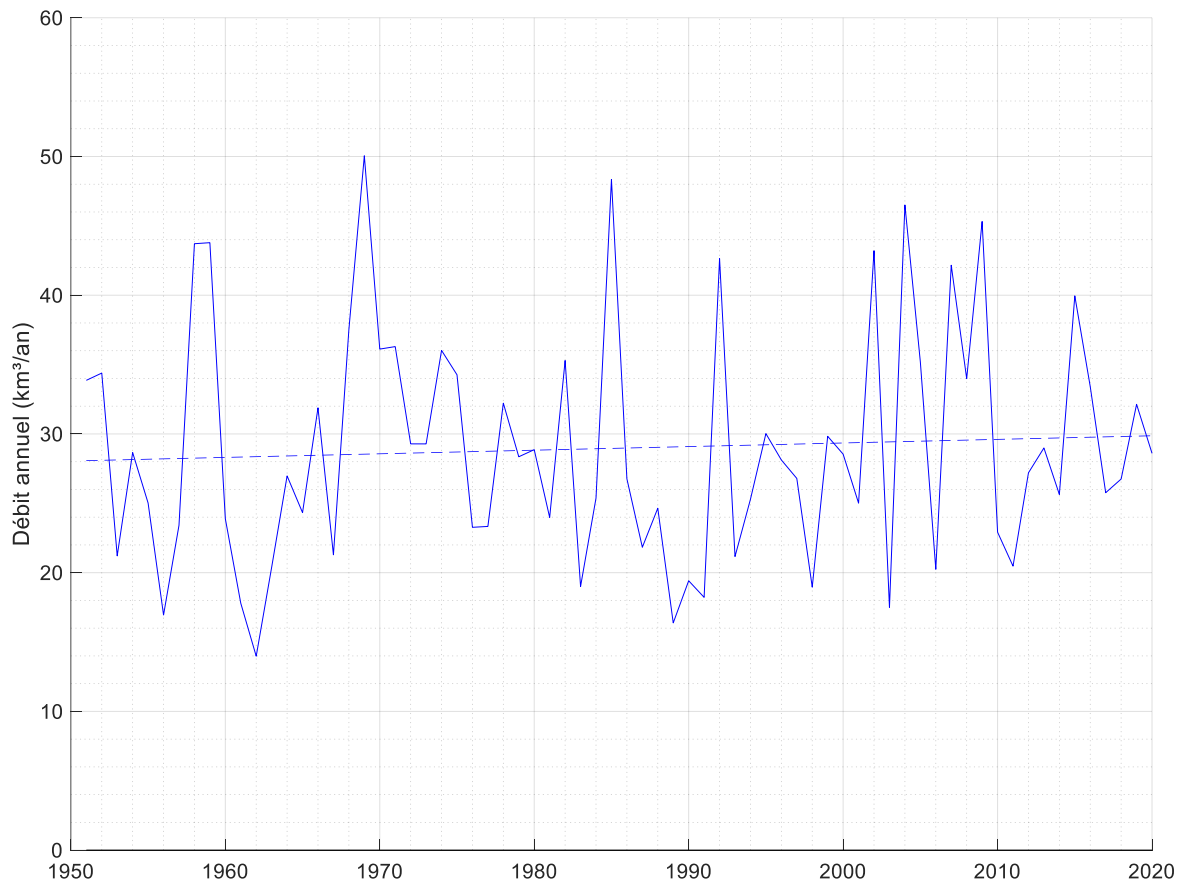


Figure 31. Secteur 5 : nord-ouest de la baie James. Série temporelle du ruissellement pour la période de 1951 à 2020. La pente de régression linéaire du débit est de $0.0260 \text{ km}^3/\text{an}^2$ avec un R^2 de 0.004 ($p > 0.10$).

2.2.2.7 Secteur 6

Enfin, le secteur 6, dont la série temporelle des débits de ruissellement annuels de 1951 à 2020 présenté à la Figure 32 montre une très légère augmentation non significative avec une pente de régression linéaire de $0.0041 \text{ km}^3/\text{an}^2$ et un R^2 de 0.0001 ($p > 0.10$). La moyenne des débits de ruissellement pour ce secteur est de $25.13 \text{ km}^3/\text{an}$ avec un écart type de $7.50 \text{ km}^3/\text{an}$. L'écart type est somme toute assez élevé considérant la faible ampleur des débits de ruissellement pour ce secteur.

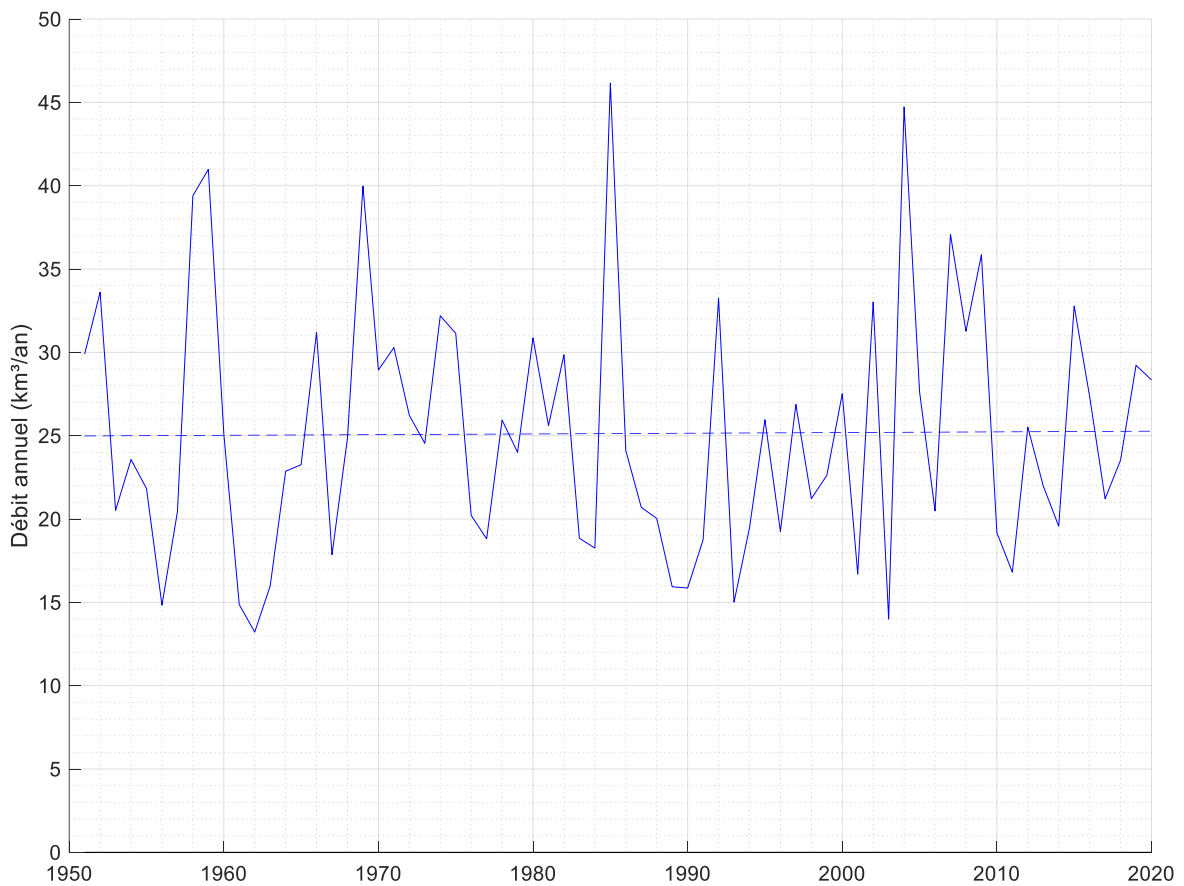


Figure 32. Secteur 6 : ouest de la baie James dans la baie d'Hudson. Série temporelle du ruissellement pour la période de 1951 à 2020. La pente de régression linéaire du débit est de $0.0041 \text{ km}^3/\text{an}^2$ avec un R^2 de 0.0001 ($p > 0.10$).

2.2.3 Précipitation nette moyenne en hauteur d'eau par secteur

Les séries temporelles des débits annuels de ruissellement ne tiennent pas compte des différentes aires de bassin versant de chaque secteur. Pour pallier à ce problème, le débit annuel de ruissellement est converti en hauteur d'eau (mm/an). De cette manière, on limite l'effet des dérivations puisque la variation du volume d'eau est balancée par la variation de l'aire du bassin versant.

Afin d'obtenir la valeur de précipitation nette qui tient aussi compte de l'évaporation, on divise le débit annuel de ruissellement par l'aire du bassin versant en tenant compte s'il y a lieu des dérivations. De cette manière, on limite l'effet des dérivations puisque la variation du volume d'eau est balancée par la variation de l'aire du bassin versant. À noter que les remplissages des réservoirs sont également considérés dans les précipitations nettes. Les précipitations nettes annuelles moyennes par période de 10 ans sont présentées à la Figure 33.

On constate d'abord la différence frappante entre les précipitations nettes à l'ouest (secteurs 4 à 6) et à l'est (secteurs 1 à 3) de la zone d'étude. Les précipitations nettes à l'ouest sont systématiquement inférieures à celles de l'est. La précipitation nette minimale et maximale est observée dans le secteur 6 et le secteur 3, respectivement. À noter que les précipitations nettes perçues dans le secteur 2 entre les périodes de 1971-1980 et 1981-1990 sont influencées par la rétention d'eau due au remplissage des réservoirs. Le Tableau 10 présente les valeurs moyennes et les écarts types pour chaque secteur.

On remarque aussi pour les secteurs 1 à 3 une diminution des précipitations nettes moyennes durant les premières décennies, avec une augmentation par la suite.

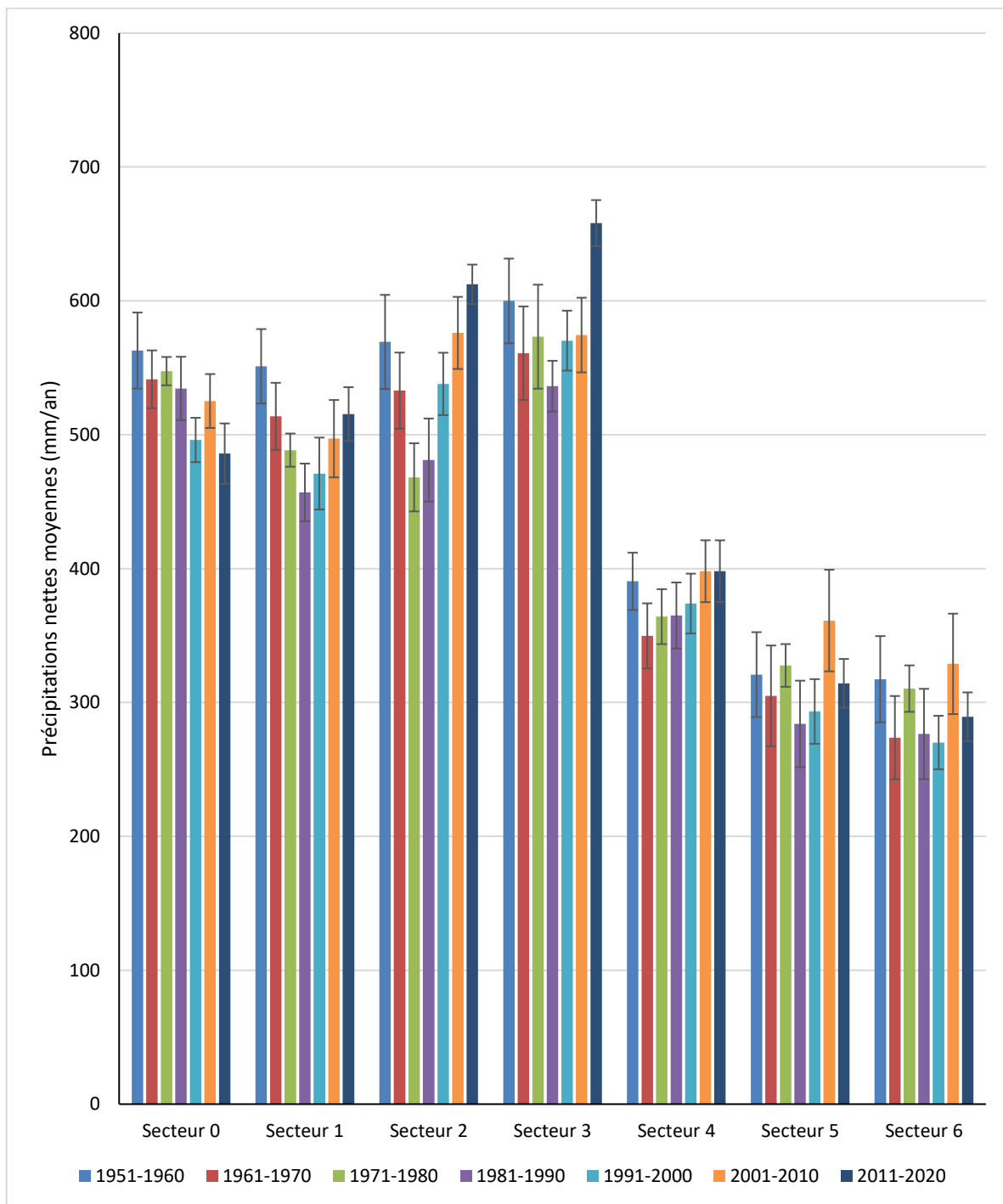


Figure 33. Précipitation nette annuelle moyenne par période de 10 ans par secteur. Les débits sont divisés par l'aire du bassin versant. Les modifications de l'aire des bassins versant pour le développement hydro-électrique ont été prises en considération. Les barres d'erreur représentent ± 1 erreur type.

Tableau 10. Précipitations nettes annuelle moyennes par période de 10 ans entre 1951 et 2020, ainsi que pour toute la période 1951-2020. Les écarts types sont présentés pour visualiser la variabilité interannuelle de chaque période. La moyenne et l'écart type pour 1951-2020 sont en caractère gras.

Période	Précipitation nette moyenne par période (mm/an)						
	Secteur 0	Secteur 1	Secteur 2	Secteur 3	Secteur 4	Secteur 5	Secteur 6
1951-1960	562.90	551.17	569.35	599.96	390.53	320.83	317.39
1961-1970	541.42	513.77	532.99	560.91	349.76	304.99	273.75
1971-1980	547.51	488.52	468.20	573.26	364.15	327.68	310.37
1981-1990	534.58	456.94	481.10	536.26	365.02	283.99	276.46
1991-2000	496.09	471.02	537.97	570.30	373.92	293.30	270.08
2001-2010	525.22	497.06	576.05	574.46	398.07	361.24	328.85
2011-2020	485.94	515.41	612.38	658.05	398.09	314.33	289.36
1951-2020	527.67	499.13	539.72	581.89	377.08	315.19	295.18
Période	Écart type (mm/an)						
1951-1960	89.80	87.79	111.06	100.08	67.72	100.28	101.84
1961-1970	68.30	79.18	89.81	110.49	76.91	118.97	98.36
1971-1980	33.50	39.21	80.45	122.83	64.88	50.46	54.87
1981-1990	74.87	68.09	98.16	60.06	77.98	102.20	106.72
1991-2000	52.44	84.90	73.66	70.80	70.65	76.42	63.22
2001-2010	63.62	91.34	85.15	88.23	73.04	120.04	118.62
2011-2020	71.25	63.62	46.54	54.50	72.86	57.58	57.58
1951-2020	66.90	75.35	85.65	89.99	72.14	93.17	89.31

2.2.4 Volume d'eau modélisé sur l'ensemble des secteurs

2.2.4.1 Débit annuel de ruissellement, de précipitations et d'évaporation pour le bassin versant de la baie James

Pour bien comprendre le cycle de l'eau douce de la baie James, il est intéressant d'examiner séparément les deux variables d'ERA5 utilisées pour calculer le ruissellement, à savoir les précipitations totales et l'évaporation. Toutefois, la validation avec les stations hydrométriques a été faite seulement pour le ruissellement (c.-à-d. la somme des précipitations et de l'évaporation), et non pas pour les précipitations et l'évaporation en elles-mêmes. Ces données sont donc à interpréter avec prudence. La présente section s'intéresse de prime abord au bassin versant de la baie James et la section suivante porte sur l'ensemble de la zone d'étude, soit la baie James et les pourtours immédiats dans la baie d'Hudson (secteurs 0 à 6).

La Figure 34 présente les séries temporelles des débits annuels de ruissellement, de précipitations et d'évaporation sur l'ensemble de la baie James. De plus, la figure inclut les précipitations nettes réelles (en noir), c'est-à-dire incluant les dérivations de bassins versants divisées par la taille du bassin versant en considérant les diverses modifications à des fins de développement hydro-électrique afin de voir dans quelle proportion les variations des débits modélisés sont le fruit des variations de l'aire des bassins versants. Les moyennes et les régressions linéaires des débits annuels de ruissellement, de précipitations et d'évaporation, avec et sans dérivation, ainsi qu'en précipitation nette en mm/an sont présentés au Tableau 11.

Pour la période de 1951 à 2020, le ruissellement, les précipitations et l'évaporation (en valeurs négatives) sont tous trois en hausse, mais la pente de la hausse du ruissellement est amoindrie par celle de l'évaporation. L'effet des dérivations est important et influence grandement la hausse des ruissellement, précipitations et évaporation sur l'ensemble de la zone d'étude puisqu'une partie du bassin de la baie d'Ungava (rivière Caniapiscau) et une petite portion du secteur 1 ont été déviées vers le bassin de la baie James. La hausse est tout

de même présente dans ces trois variables si on les divise par l'aire des bassins versants ou si l'on ne considère pas les dériviations en imaginant ce que le bassin de la baie James aurait été sans modification anthropique. Mais dans ce dernier cas, la hausse des précipitations n'est que faiblement significative ($R^2 = 0.054$, $p = 0.053$) et la hausse du ruissellement n'est pas significative ($R^2 = 0.017$, $p = 0.35$). À noter qu'il aurait été peu utile de présenter les précipitations nettes sans dériviations en mm/an puisqu'elles sont sensiblement identiques aux précipitations nettes annuelles avec dériviations comme les nouveaux apports d'eau douce des portions déviées augmentent du même coup la taille des bassins versants et donc le dénominateur par lequel on divise le volume du débit annuel.

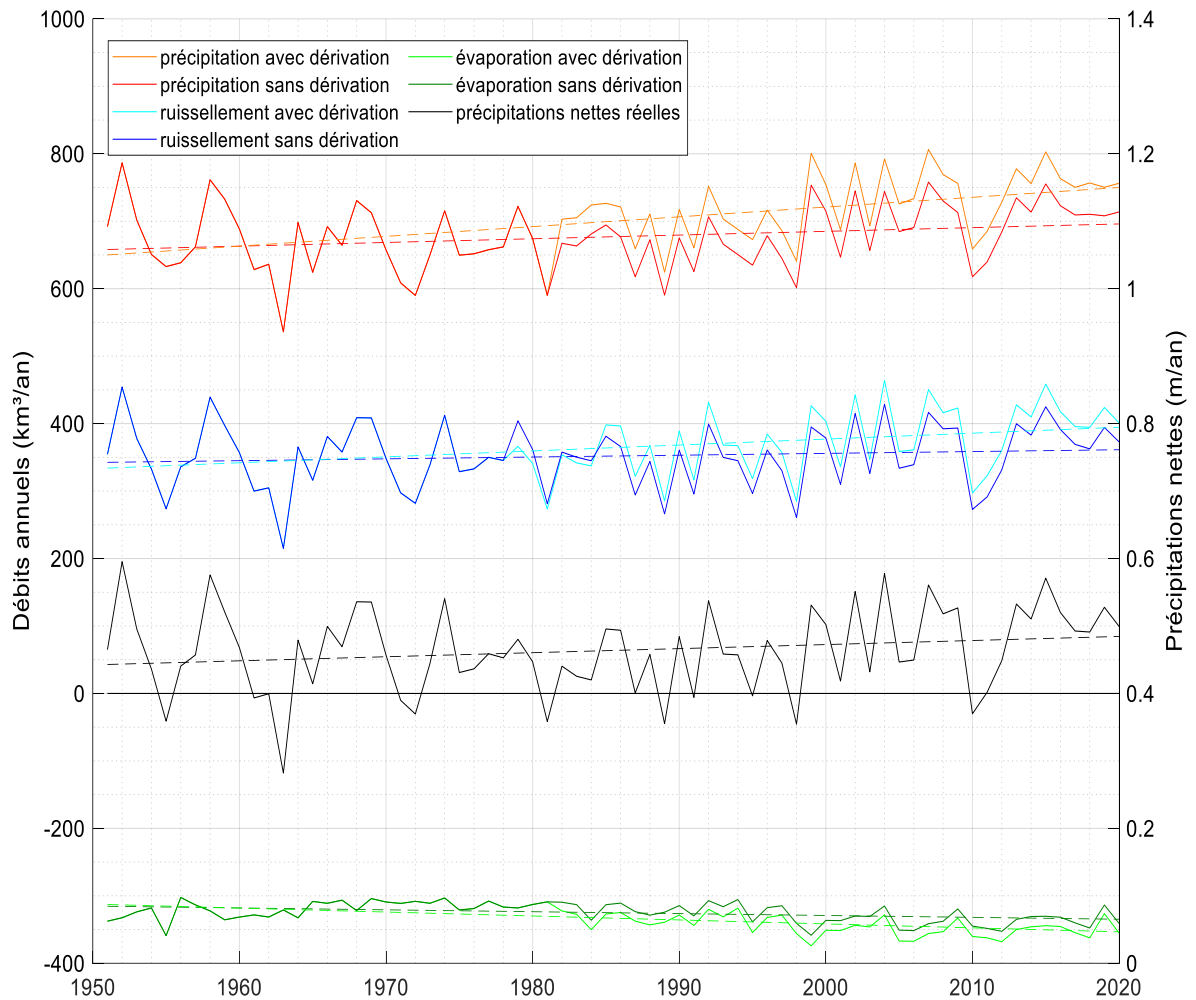


Figure 34. Baie James (secteurs 0 et 2 à 5) : série temporelle de 1951 à 2020 des débits annuels de ruissellement, précipitations et évaporation en incluant et en excluant les dérivations de bassins versants (axe Y de gauche) et les précipitations nettes (en noir) en m/an (axe Y de droite). Des régressions linéaires ont été calculées pour les différentes séries temporelles. Le détail des pentes, moyennes et écarts types est résumé au Tableau 11. À noter que l'effet des remplissages de réservoir a été ajouté à la valeur de débit de ruissellement réel.

Tableau 11. Statistiques concernant le ruissellement, les précipitations et l'évaporation sur le bassin versant de la baie James (secteurs 0, 2 à 5) de 1951 à 2020. * R² est significatif à p = 0.10. ** R² est significatif à p = 0.05. *** R² est significatif à p = 0.01.

Bassin versant de la baie James (secteurs 0, 2 à 5)			
Réal (avec dérivation) en débits			
	Ruissellement	Précipitation	Évaporation
Moyenne ± écart type (km ³ /an)	364.31 ± 86.64	677.03 ± 48.32	-325.09 ± 14.58
Pente (km ³ /an ²)	0.8770	1.448	-0.587
R ²	0.120***	0.270***	0.402***
Ratio de variation (%/an)	0.2407	0.2139	0.1806
Réal (avec dérivation) en hauteur d'eau			
Moyenne ± écart type (mm/an)	463.71 ± 63.09	891.05 ± 63.92	-424.07 ± 18.40
Pente (mm/an ²)	0.6022	0.8615	-0.280
R ²	0.038	0.075**	0.096***
Ratio de variation (%/an)	0.1299	0.0967	0.0660
Naturel (sans dérivation) en débits			
Moyenne ± écart type (km ³ /an)	351.93 ± 60.51	677.03 ± 48.32	-325.09 ± 14.58
Pente (km ³ /an ²)	0.2703	0.5490	-0.2790
R ²	0.013	0.054*	0.152***
Ratio de variation (%/an)	0.0768	0.0811	0.0858

2.2.4.2 Débit annuel de ruissellement, précipitations et évaporation pour toute la zone d'étude (secteurs 0 à 6)

Les résultats pour toute la zone d'étude sont présentés en débits annuels en volume d'eau et en rapportant ces volumes par leur aire de répartition (précipitations nettes) en tenant compte des modifications de tailles de bassin versant. On tient également compte des volumes d'eau qui aurait été déversés dans la zone d'étude sans l'intervention humaine modifiant l'écoulement naturel des bassins versants.

Les Figures 35 et 36 portent toutes deux sur les débits annuels de ruissellement, évaporation et précipitation pour la période de 1951 à 2020 sur l'ensemble de la baie James et ses environs entre les bassins versants de rivières Winisk et Grande rivière de la Baleine (secteurs 0 à 6). La Figure 35 considère les volumes d'eau douce avec et sans dérivation. La Figure 36 présente les débits annuels en hauteur d'eau en mm/an. Les moyennes et les régressions linéaires, avec et sans dérivations, ainsi que calculées en hauteur d'eau (mm/an) sont présentées dans le Tableau 12.

Bien que les valeurs moyennes des débits annuels soient relativement semblables avec et sans dérivation, la pente de la régression linéaire est multipliée par un facteur de 3.26 si l'on inclut la dérivation de la rivière Caniapiscou, par rapport aux débits naturels sans dérivations et sans réservoirs. Cette variabilité démontre la nécessité de présenter les débits naturels et altérés pour comprendre l'évolution du cycle de l'eau douce dans la région. On constate tout de même que les débits annuels tendent tous à augmenter entre 1951 et 2020, mais la régression linéaire n'est pas statistiquement significative pour les débits naturels sans dérivations et sans réservoirs.

Si l'on s'intéresse à la hauteur d'eau reçue par l'ensemble des bassins versants des secteurs 0 à 6, c'est-à-dire le rapport entre volume d'eau et aire des bassins versant, tout en tenant compte des dérivations, il n'est plus utile de faire la distinction entre débits réels et débits naturels comme la taille du bassin versant global augmente de manière similaire au volume d'eau reçu par la région. Cela permet par ailleurs de bien voir la variabilité

interannuelle des débits annuels réels par rapport à la taille du bassin versant. Ainsi, comme le démontre la Figure 36, les débits annuels sont tous en augmentation, mais l'augmentation des précipitations nettes n'est pas significative.

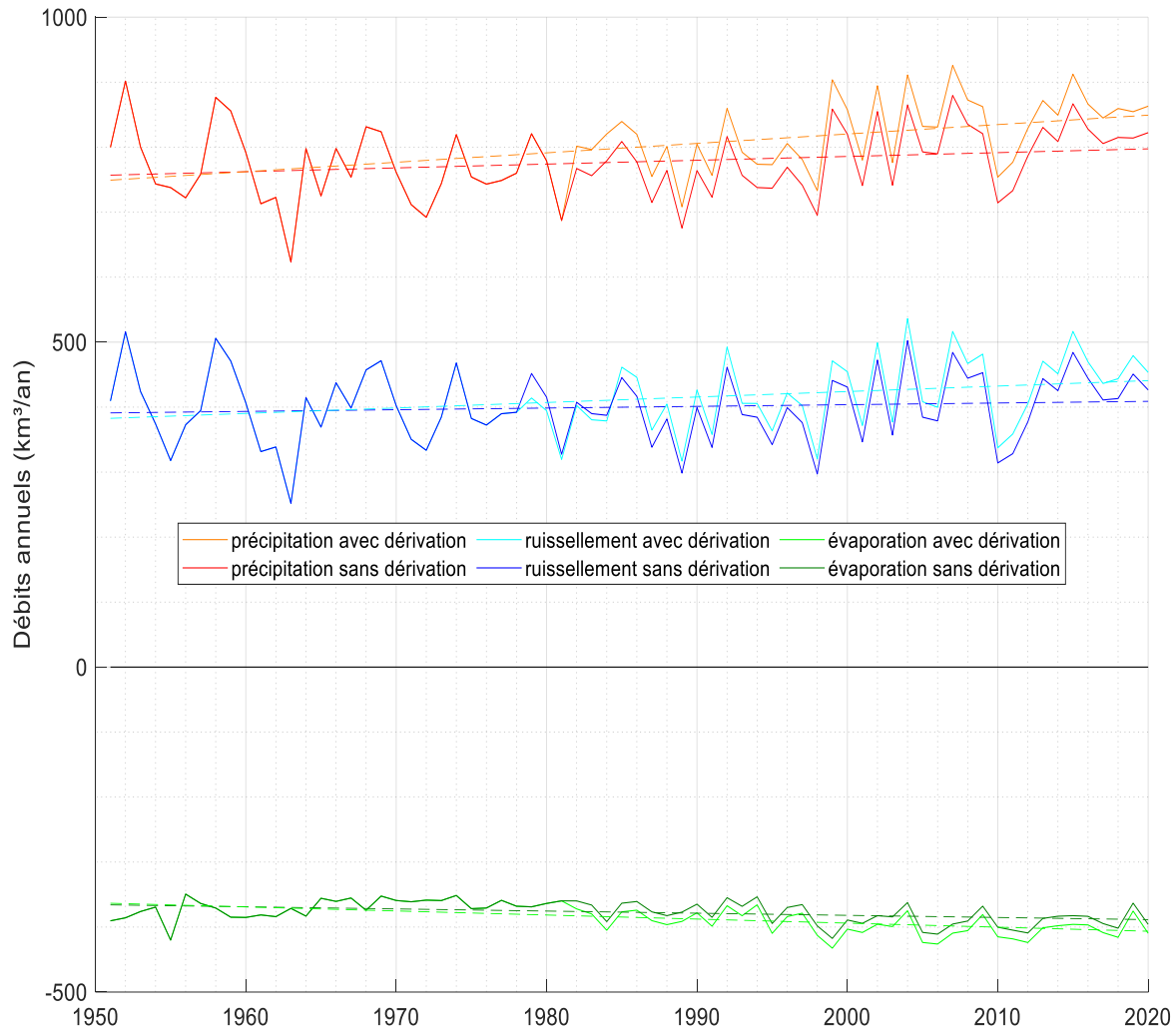


Figure 35. Débits annuels du ruissellement, des précipitations totales et de l'évaporation excluant et incluant les dérivations de bassin versant pour la période de 1951 à 2020 sur l'ensemble des secteurs 0 à 6. La valeur des pentes de régression linéaire et leur R^2 sont présentées dans le Tableau 12.

De manière générale, la variabilité du ruissellement est surtout influencée par la variabilité des précipitations puisque la variabilité interannuelle de l'évaporation est très faible. Le ratio de la pente sur la moyenne (pente/moyenne) fournit un indicateur de la vitesse

avec laquelle le cycle de l'eau douce change. Le Tableau 12 présente un récapitulatif des valeurs de pentes, moyennes et écarts types du ruissellement, des précipitations et de l'évaporation en y ajoutant le pourcentage de changement, c'est-à-dire le rapport de la pente sur la moyenne en pourcentage, permettant de comprendre de combien varie la régression linéaire chaque année. Il est intéressant de constater que la pente de la hauteur d'eau annuelle se rapproche plus de celle du volume d'eau naturel des trois débits annuels.

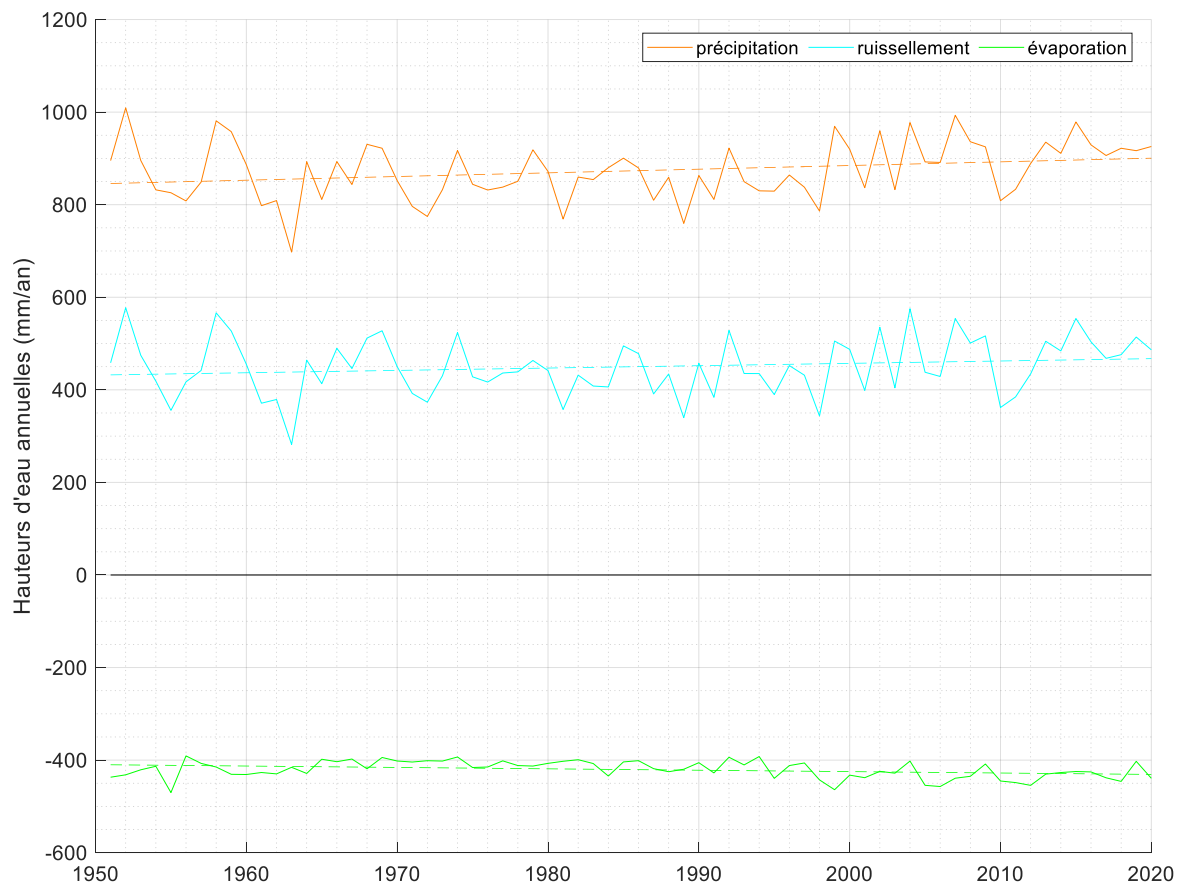


Figure 36. Hauteurs d'eau du ruissellement réel, des précipitations totales et de l'évaporation pour la période de 1951 à 2020 sur l'ensemble des secteurs 0 à 6. Les pentes de ruissellement, précipitation et évaporation en hauteur d'eau (mm/an²) sont présentées au Tableau 12 avec leur R² respectif.

Tableau 12. Statistiques concernant le ruissellement, les précipitations et l'évaporation sur l'ensemble des secteurs 0 à 6 de 1951 à 2020. * R² est significatif à p = 0.10. ** R² est significatif à p = 0.05. *** R² est significatif à p = 0.01.

Bassin versant de la baie James et environs (secteurs 0 à 6)			
Réel (avec dérivation) en débits			
	Ruissellement	Précipitation	Évaporation
Moyenne ± écart type (km ³ /an)	411.78 ± 57.82	799.26 ± 61.94	-384.91 ± 21.26
Pente (km ³ /an ²)	0.8410	1.4492	-0.6238
R ²	0.088**	0.227***	0.357***
Ratio de variation (%/an)	0.2042	0.1813	0.1621
Réel (avec dérivation) en hauteur d'eau			
Moyenne ± écart type (mm/an)	449.83 ± 61.59	873.12 ± 61.63	-420.49 ± 18.79
Pente (mm/an ²)	0.5082	0.7924	-0.3016
R ²	0.028	0.069**	0.107***
Ratio de variation (%/an)	0.1130	0.0908	0.0717
Naturel (sans dérivation) en débits			
Moyenne ± écart type (km ³ /an)	400.01 ± 54.45	777.22 ± 54.59	-377.21 ± 17.31
Pente (km ³ /an ²)	0.2578	0.5867	-0.3288
R ²	0.009	0.048*	0.150***
Ratio de variation (%/an)	0.0644	0.0755	0.0872

2.2.4.3 Débit annuel moyen par décennie

Faire une simple régression linéaire sur les débits de ruissellement annuels ne permet pas de se faire une idée complète de l'évolution du ruissellement dans la baie James. Par ailleurs, la forte variabilité interannuelle rend confuse l'interprétation que l'on peut faire des séries temporelles annuelles. Il est donc utile de calculer des moyennes décennales et d'examiner l'évolution d'une décennie à l'autre. Le ruissellement annuel moyen a d'abord diminué entre les périodes de 1951 à 1980 pour la baie James et il a ensuite connu une hausse continue jusqu'en 2020 (Figure 37). Pour la région dans son ensemble (baie James et ses environs), c'est plutôt une diminution rapide entre 1951 et 1970 suivis d'un certain plateau jusqu'en 1990 auquel s'ensuit une hausse rapide jusqu'en 2020 (Figure 37). La taille

importante des barres d'erreur (erreurs types) témoigne de la forte variabilité intra-période dans chaque bloc de 10 ans. Le débit annuel moyen et l'écart type par décennie sont résumés dans le Tableau 13.

Tableau 13. Pour l'ensemble de la zone d'étude (secteur 0 à 6) et le bassin versant de la baie James (secteur 0, 2 à 5) : débit annuel moyen, écart type et erreur type par période (années hydrologiques).

Période	Secteur 0 à 6	Secteur 0, 2 à 5
Débit moyen (km ³ /an)		
1951-1960	419.26	367.06
1961-1970	387.33	340.55
1971-1980	388.20	339.46
1981-1990	390.15	346.45
1991-2000	409.54	365.84
2001-2010	439.47	389.62
2011-2020	448.48	401.18
Écart type (km ³ /an)		
1951-1960	62.26	52.97
1961-1970	66.42	58.84
1971-1980	36.21	35.64
1981-1990	48.44	43.84
1991-2000	53.45	48.43
2001-2010	69.02	56.69
2011-2020	43.03	37.68

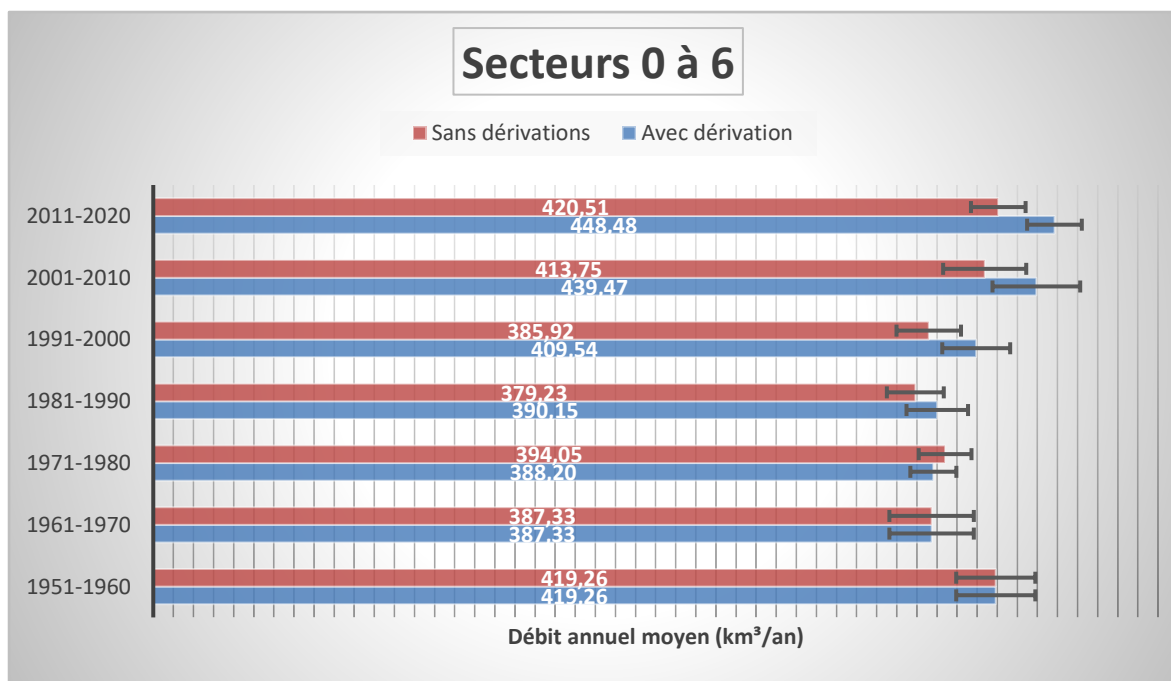
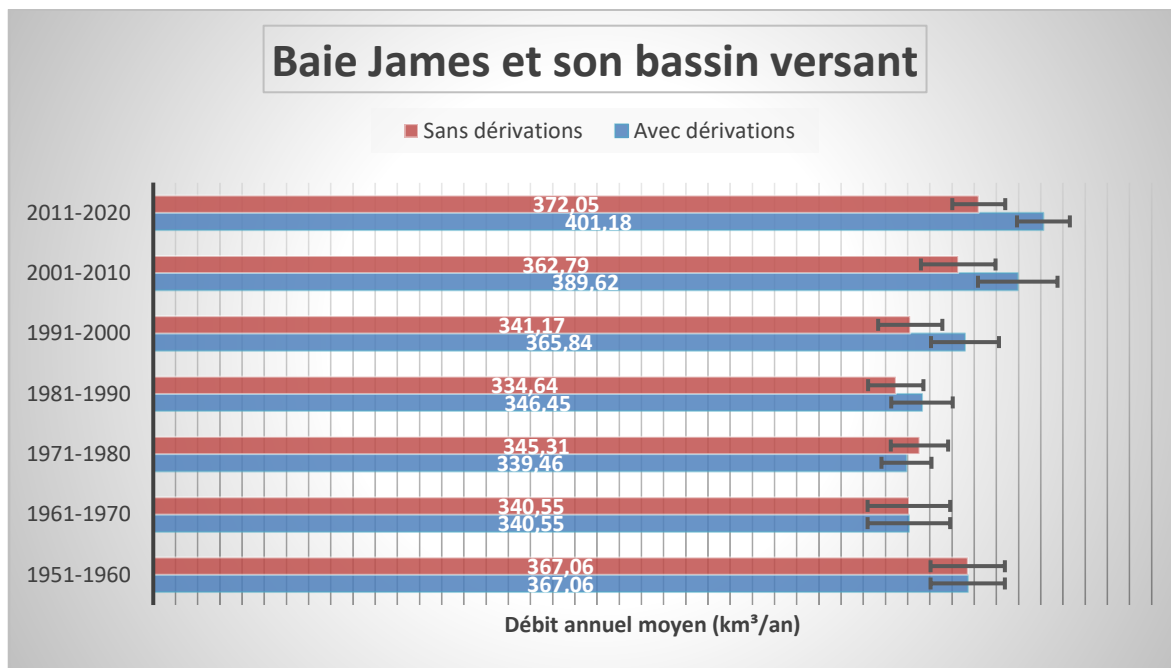


Figure 37. Débit de ruissellement annuel moyenné par décennie entre 1951 et 2020 avec et sans les dérivations et remplissage de réservoirs. Le graphique du haut présente les données pour la baie James (secteurs 0 et 2-5) alors que celui du bas considère l'ensemble de la baie James et de ses environs entre les bassins versants des rivières Winisk et Grande rivière de la Baleine. Les barres d'erreurs représentent ± 1 erreur type.

2.2.4.4 Comparaison des contributions annuelles de l'est et de l'ouest de la baie James

Afin de mieux comprendre la répartition spatiale des apports d'eau douce dans la baie James, les apports provenant de l'est ont été comparés à ceux en provenance de l'ouest. Pour ce faire, les secteurs 2 et 3 (est) et les secteurs 4 et 5 (ouest) ont été jumelés. La Figure 38 présente la série temporelle des débits annuels de ruissellement de l'est et de l'ouest pour la période de 1951 à 2020. La section est étant sujette à des dérivations de bassins versants, les valeurs naturelles et réelles ont été analysées en parallèle. Les valeurs naturelles des débits de ruissellement sont 34 % plus élevé à l'est comparé à l'ouest, mais la pente de la régression est similaire, avec une augmentation annuelle de 0.11 % à l'ouest 0.13 % à l'ouest (Tableau 14). La pente change du tout au tout pour l'est incluant les dérivations, avec une augmentation annuelle de 0.41 % (Tableau 14).

Tableau 14. Moyenne des débits de ruissellement sur la période de 1951 à 2020 avec les pentes de régressions linéaires et leur coefficient de détermination pour l'ouest et l'est (avec et sans l'effet des dérivations). Le ratio de variation est calculé comme le quotient de la pente par la moyenne. * R² est significatif à p = 0.10. ** R² est significatif à p = 0.05. *** R² est significatif à p = 0.01.

	Ouest	Est réel	Est naturel
Moyenne ± écart type (km ³ /an)	133.85 ± 24.87	192.34 ± 30.70	179.97 ± 24.77
Pente (km ³ /an ²)	0.1690	0.7901	0.1830
R ²	0.019	0.274***	0.023
Ratio de variation (%/an)	0.1262	0.4108	0.1017

La Figure 39 compare les débits de ruissellement naturels à l'est et à l'ouest de la baie James. Les dérivations de bassins versants ont été exclues, car elles font intervenir l'influence anthropique dans le comportement naturel de la relation entre les deux rives de la baie James. La régression linéaire témoignant de la relation entre les débits de ruissellement de l'est et de l'ouest donne la formule :

$$\text{débit de l'est} = 0.6288 * \text{débit de l'ouest} + 95.8046$$

avec un R^2 de 0.398 ($p < 0.01$). La pente de la régression et l'ordonnée à l'origine montrent que l'ouest est plus fortement affecté par les années sèches/humides que l'est. Cela est aussi indiqué par les écarts types relatifs (c'est-à-dire écart type divisé par la moyenne) qui sont plus élevés à l'ouest (0.186) qu'à l'est (0.125). La comparaison entre les débits de ruissellement annuels incluant les dérivations est présentée dans l'Annexe II.

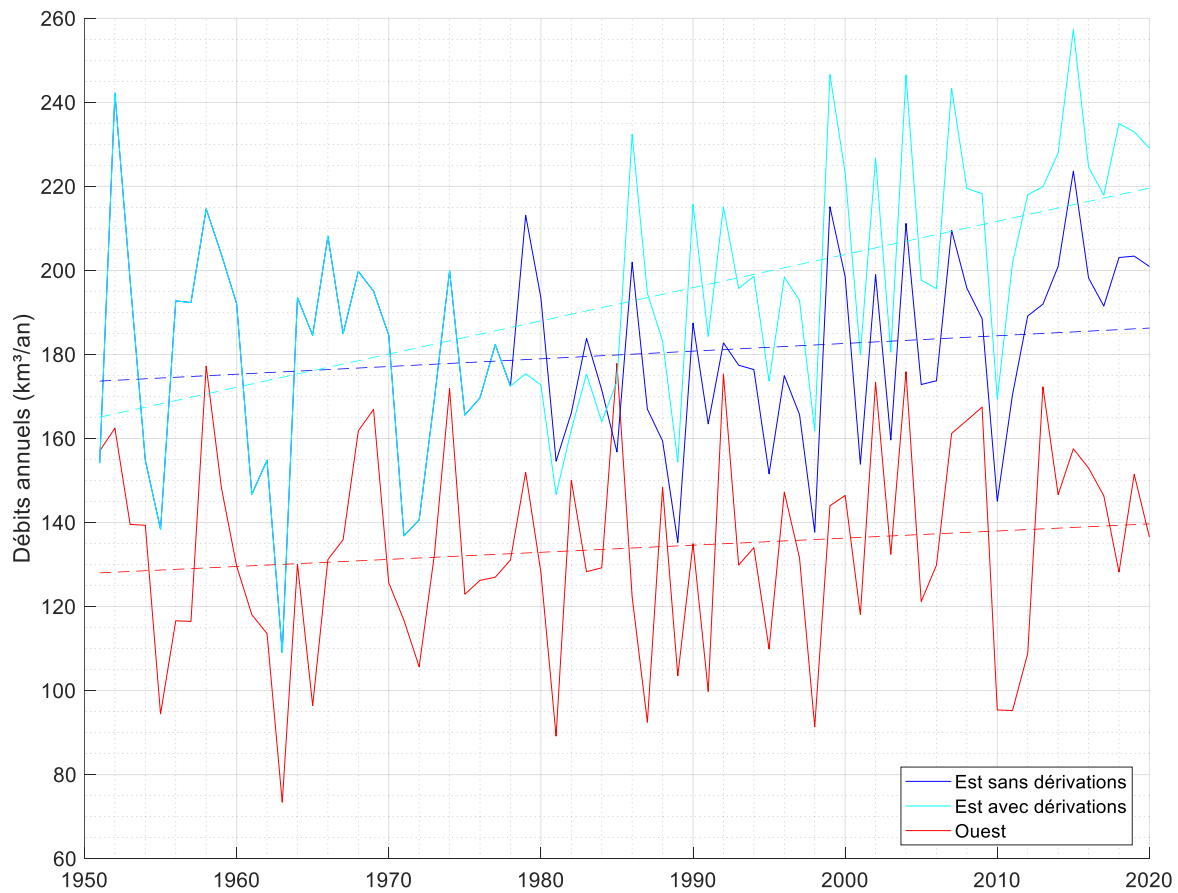


Figure 38. Série temporelle du débit annuel du ruissellement à l'est (secteurs 2 et 3) et à l'ouest (secteurs 4 et 5) de la baie James avec et sans dérivations. Le détail des pentes de régression linéaire et coefficients de détermination est explicité au Tableau 14.

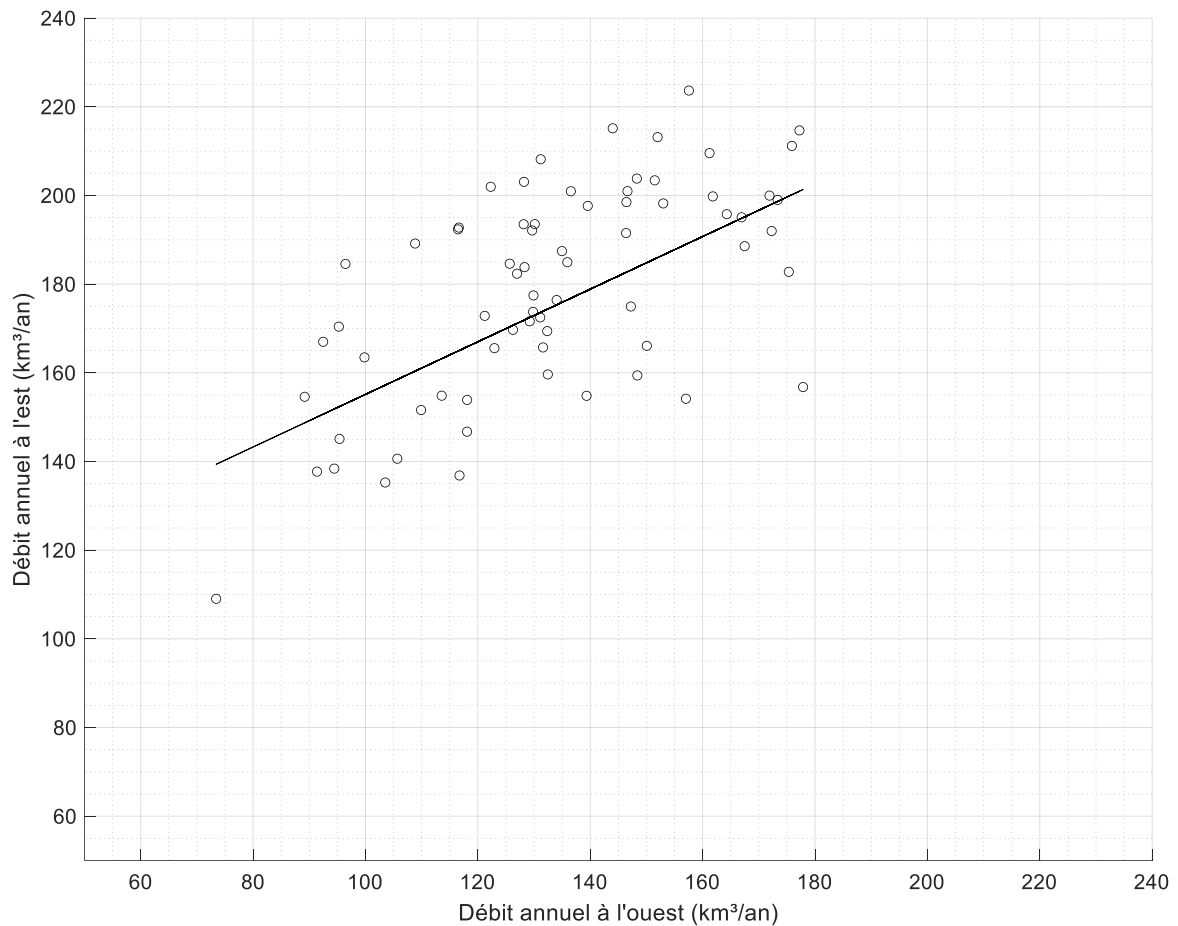


Figure 39. Régression entre le débit annuel de ruissellement de l'est et celui de l'ouest de la baie James en excluant l'effet des dérivations pour chaque année hydrologique entre 1951 et 2020. La formule de la régression linéaire est : Débit de l'est = $0.6288 * \text{Débit de l'ouest} + 95.8046$. Le R^2 est de 0.398 ($p < 0.01$).

On constate également que le débit à l'est n'a été inférieur à celui de l'ouest que durant deux années au cours de cette période de 70 ans. Par ailleurs, la distribution des points est relativement proche de la droite de régression. On remarque que ceux-ci ne sont pratiquement jamais plus éloignés que de $30 \text{ km}^3/\text{an}$ de la droite.

2.2.4.5 Variation mensuelle des précipitations nettes moyennes sur l'ensemble de la baie James

Cette section se portera sur la somme des précipitations et de l'évaporation (les précipitations nettes) et non pas sur le ruissellement, parce que la méthode de calcul du ruissellement se base sur l'échelle minimale d'une année hydrologique et que l'eau s'accumule en partie en hiver sous forme de neige et de glace sans s'écouler avant la fonte. Il est difficile de réduire cette échelle temporelle pour cette raison. C'est par ailleurs la raison pour laquelle le ruissellement à proprement parlé n'est pas abordé dans cette section, mais remplacé par les précipitations nettes.

Les Figures 40, 41 et 42 présentent les séries temporelles de 1951 à 2020 des précipitations nettes pour chacun des mois. L'exercice a été fait sur l'ensemble de la baie James (secteurs 0 et 2-5) en incluant et en excluant les dérivation. Le Tableau 15 présente le sommaire des pentes des régression linéaires et leur R^2 . Les pentes ne sont pas significatives sauf pour les mois d'octobre et décembre avec dérivation, car pour un effectif de 70 (ans), la pente est significative à $p < 0.05$ lorsque $r > 0.232$, c'est-à-dire $R^2 > 0.055$ (Zar, 2010).

La somme des précipitations et de l'évaporation montre une forte variabilité interannuelle pendant tous les mois de l'année sur l'ensemble de la baie James (Figures 40, 41 et 42). Pour la période de 1951 à 2020, les pentes des régressions linéaires sont positives en janvier, avril, août, septembre, octobre et décembre et négatives en février, mars, mai et juin (Figures 40, 41 et 42). Les pentes de juillet et novembre sont quant à elles négatives en excluant les dérivation, mais deviennent positives en les incluant. Chaque pente des débits qui incluent les dérivation est systématiquement plus élevée. La plus grande variation survient en septembre. On constate également que c'est aux mois d'automne que les précipitations nettes sont les plus élevées, soit septembre, octobre et novembre. Pour rappel, ces valeurs ne s'assimilent pas à du ruissellement, mais donnent une idée de la distribution mensuelle de la somme de l'évaporation et des précipitations. Cela explique, entre autres choses, la présence de données négatives.

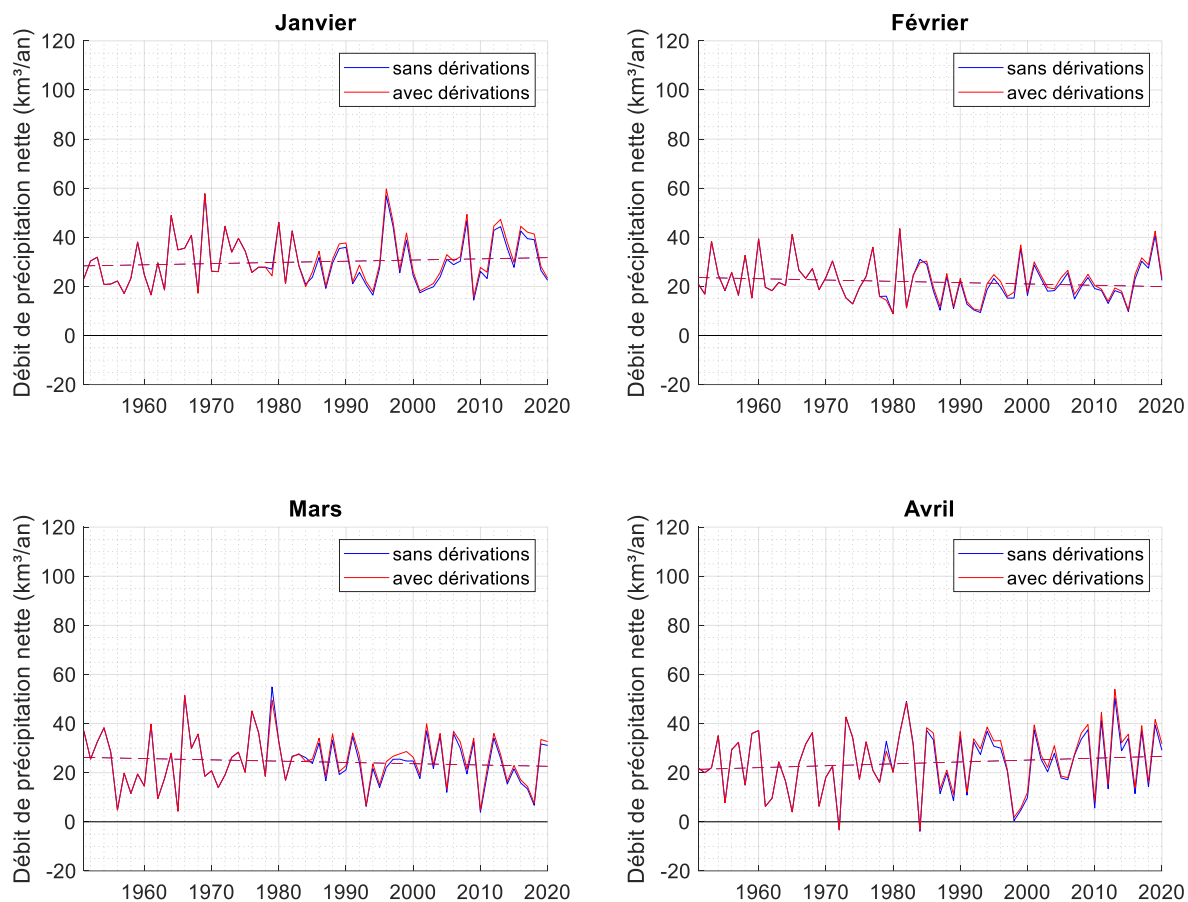


Figure 40. Séries temporelles des précipitations nettes (précipitation + évaporation en valeur négative) sur l'ensemble de la baie James (secteur 0, 2 à 5) perçues à chaque mois pour la période de 1951 à 2020 avec et sans dérivation de bassin versant. Mois de janvier à avril. Les valeurs des pentes et coefficients de détermination sont regroupées dans le Tableau 15.

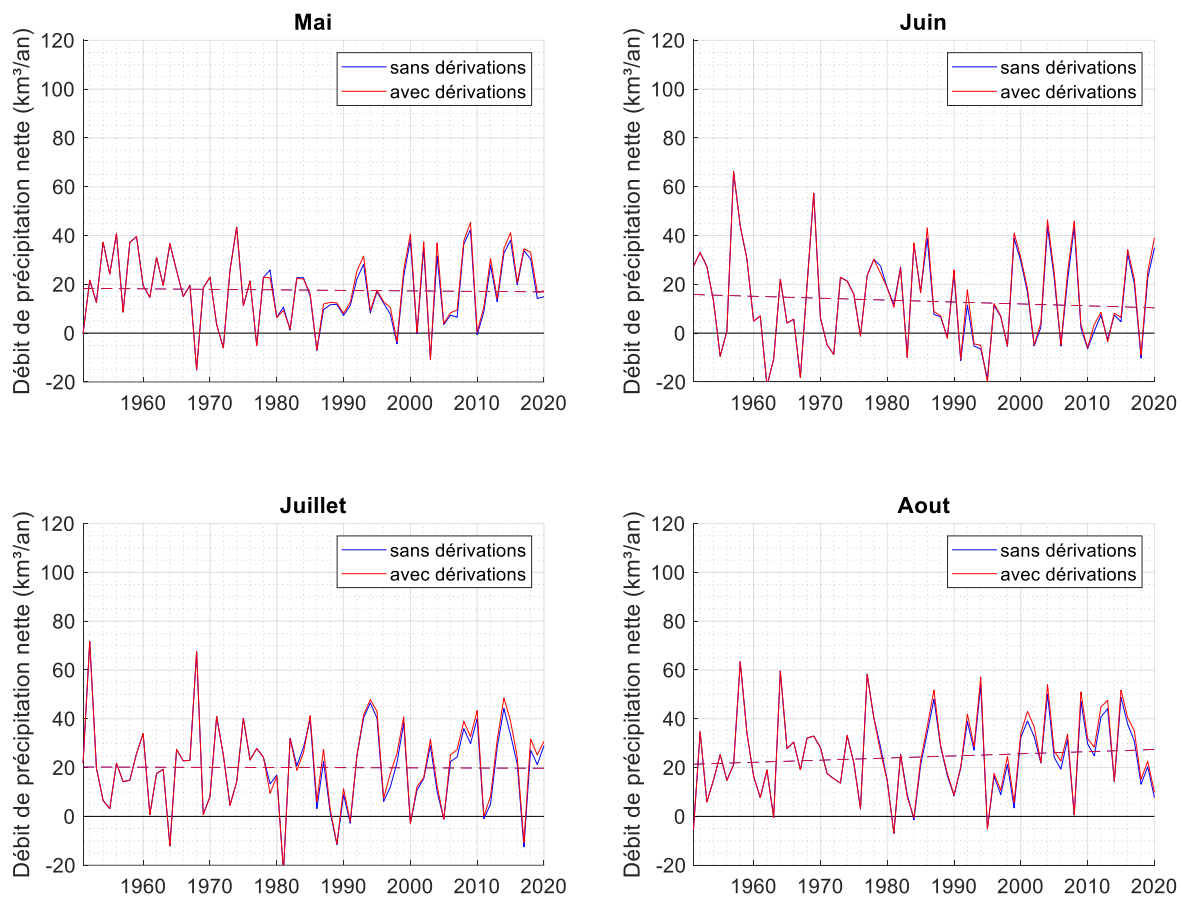


Figure 41. Suite de la Figure 40 pour mai à août. Les valeurs des pentes et coefficients de détermination sont regroupées dans le Tableau 15.

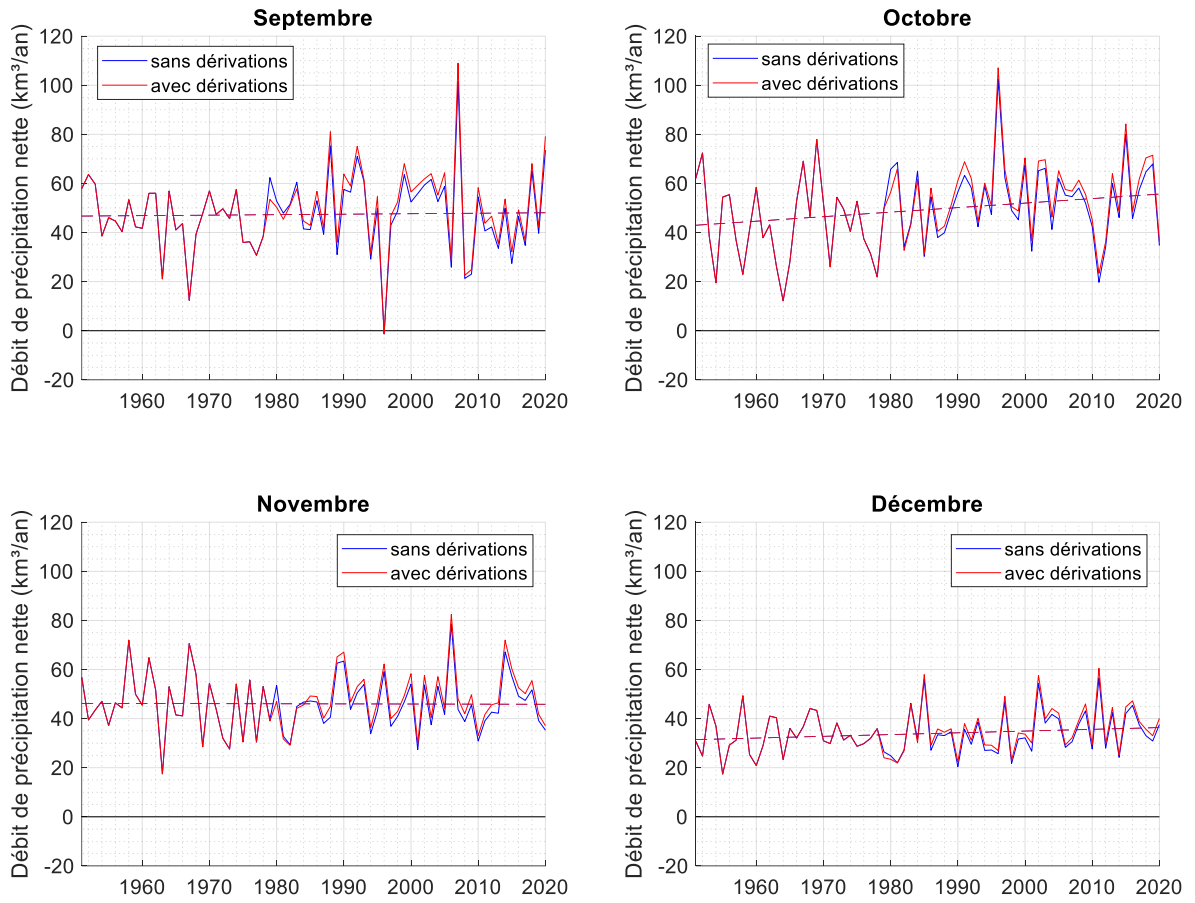


Figure 42. Suite de la Figure 40 pour septembre à décembre. Les valeurs des pentes et coefficients de détermination sont regroupés dans le Tableau 15.

Tableau 15. Sommaire des pentes et coefficients de détermination de chaque mois pour les Figures 40, 41 et 42 en incluant et en excluant les dérivation de bassins versants aux fins de développement hydro-électrique. *Le R² est significatif à p = 0.10. **Le R² est significatif à p = 0.05. ***Le R² est significatif à p = 0.01.

Mois	Sans dérivation		Avec dérivation	
	Pente (km ³ /an ²)	R ²	Pente (km ³ /an ²)	R ²
Janvier	0.0486	0.010	0.0893	0.032
Février	-0.0533	0.018	-0.0258	0.004
Mars	-0.0523	0.010	-0.0168	0.001
Avril	0.0771	0.016	0.1235	0.039*
Mai	-0.0211	0.001	0.0211	0.001
Juin	-0.0787	0.007	-0.0431	0.002
Juillet	-0.0070	0.0001	0.0525	0.004
Août	0.0871	0.012	0.1414	0.030
Septembre	0.0195	0.001	0.0948	0.014
Octobre	0.1841	0.053*	0.2586	0.098***
Novembre	-0.0049	0.0001	0.0649	0.012
Décembre	0.0712	0.029	0.1170	0.070**

Afin de mieux visualiser la variabilité spatiale et mensuelle, l'ensemble des 12 cartes pour chaque mois de l'année entre la période de 1950 à 2019 (années civiles) a été produite. Il s'agit de la moyenne de tous les mois de janvier, février et ainsi de suite de cette période moyennée dans la Figure 43. Chaque pixel représente une tuile ERA5. Même sans indications, la baie James est facilement perceptible de par la différence de précipitation nette perçue. Il y a un fort gradient de précipitations nettes du nord-ouest au sud-est de la zone entre les mois de janvier et avril. Pendant les mois de mai à août, les précipitations nettes sont plus faibles sur l'ensemble des bassins versants comparé à la baie James en elle-même et la tendance s'inverse pour les mois d'octobre à décembre. Le mois où les précipitations nettes sont les plus élevées est septembre.

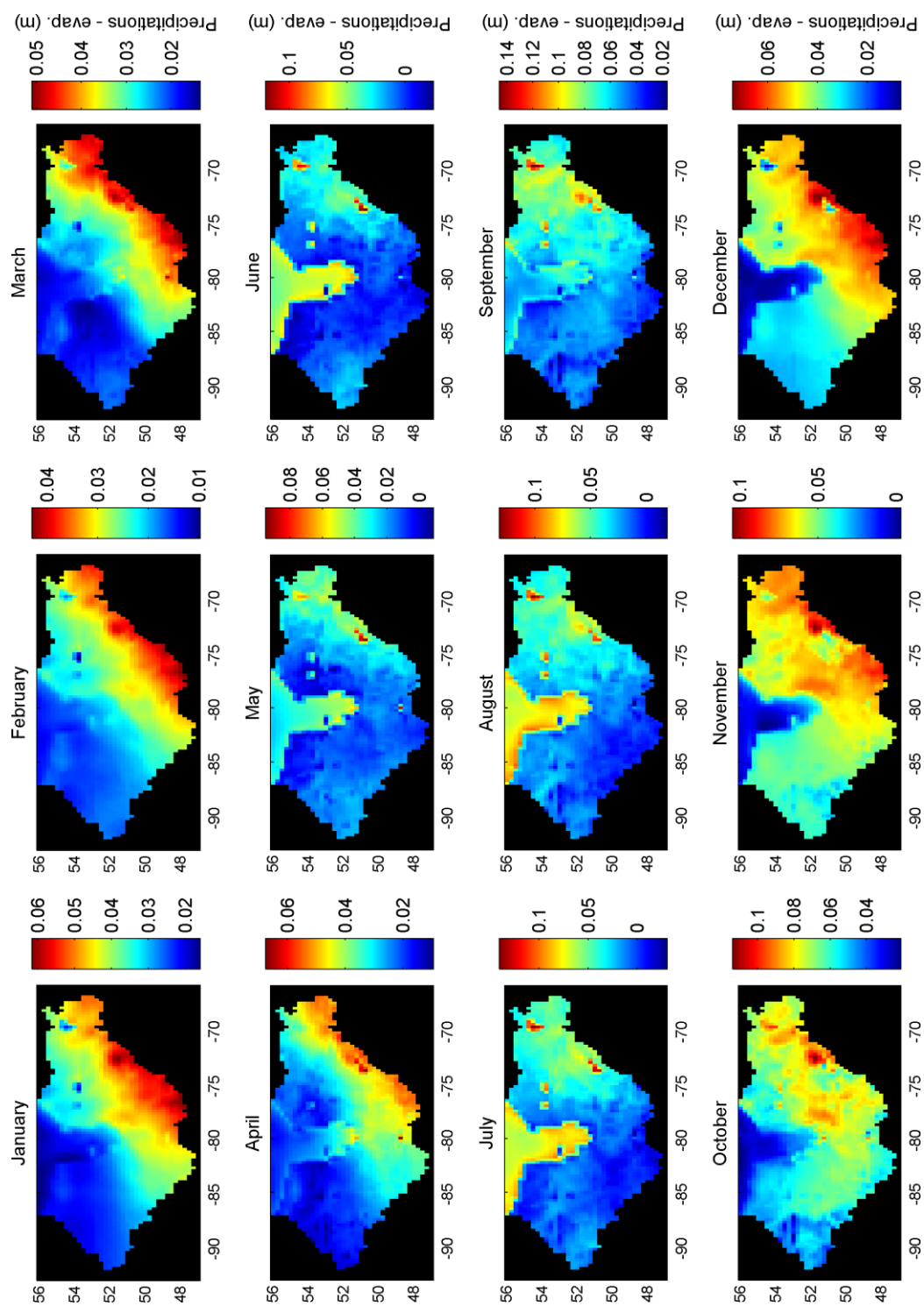


Figure 43. Moyenne mensuelle des précipitations nettes sur la période de 1950 à 2019 en années civiles pour la zone d'étude selon la modélisation par ERA5. Chaque pixel est une tuile du modèle ERA5.

2.2.5 Évaluation des tendances linéaires des débits annuels de ruissellement, évaporation et précipitation

Afin de déterminer si les variations temporelles des valeurs de débit annuel sont significatives ou non, une série de tests de tendance de Mann-Kendall a été effectué sur les données de débits annuels pour la période de l'étude, c'est-à-dire de 1951 à 2020. Alors que la pente de la régression linéaire témoigne de la direction et de l'amplitude de cette tendance, le test de tendance de Mann-Kendall permet d'évaluer si une distribution est monotone ou non. L'hypothèse nulle atteste que la distribution n'est pas monotone et donc, qu'il n'y a aucune tendance et que la pente n'est pas significativement différente de 0. L'hypothèse alternative atteste que la distribution est monotone, c'est-à-dire qu'elle augmente ou diminue. Les tests de Mann-Kendall ont été effectués sur chaque secteur de la zone d'étude pour le ruissellement et sur l'ensemble de la baie James et l'ensemble des secteurs pour les précipitations, l'évaporation et le ruissellement annuels.

Le Tableau 16 résume les valeurs du test de Mann-Kendall pour les débits annuels de ruissellement par zone selon trois scénarios : le scénario naturel où les dérivations de bassins versant et les remplissages de réservoir ne sont pas considérées, le scénario réel où on les y ajoute et le scénario où ce sont les hauteurs d'eau par taille de bassin versant qui sont utilisées, ce qui a pour effet de modérer l'impact des dérivations puisque l'aire de répartition des bassins versants change en même temps que les apports d'eau. L'hypothèse nulle est rejetée si le p-value du test est inférieur au seuil de significativité habituel de 0.05. Selon les tests de tendances de Mann-Kendall, seul le secteur 0 (la baie James en elle-même) témoigne d'une baisse significative du débit annuel de ruissellement selon les trois scénarios. À noter que le secteur 3 a une p-value inférieure à 0.10 dans les trois scénarios. Il est également intéressant de mentionner la grande différence entre les p-value et les pentes respectives du secteur 2 naturel ($p=0.82$) et réel ($p=0.00$), ce qui démontre que les variations du ruissellement dans ce secteur sont dominées par les dérivations de bassin versant et ce, même en utilisant la hauteur d'eau qui modère l'impact des dérivations ($p=0.03$). La hausse des débits de rivières en tenant compte des dérivations est significative pour l'ensemble du bassin versant de la baie James

et l'ensemble des secteurs (Tableau 16), mais cette hausse doit être attribuée principalement à l'impact des dérivations de rivière.

Les conclusions du test Mann-Kendall sont similaires à celles du test de Student appliqué à R^2 (Tableau 16), sauf en ce qui a trait aux débits en hauteur d'eau du secteur 2, pour lesquels Mann-Kendall donne $p=0.029$ alors que le test de Student donne $p=0.055$.

Tableau 16. Période de 1951 à 2020, résultat des tests de Mann-Kendall pour les débits annuels de ruissellement par secteur, sur le bassin versant de la baie James et sur l'ensemble des secteurs. Les résultats sont présentés avec et sans les dérivations et en hauteur d'eau avec les dérivations. La pente de la régression linéaire est significativement différente de 0 si le p-value du test de Mann-Kendall est inférieur à 0.05. La pente de la régression linéaire et R^2 sont aussi présentés. * R^2 est significatif à $p = 0.10$. ** R^2 est significatif à $p = 0.05$. *** R^2 est significatif à $p = 0.01$.

Débits de ruissellement en volume d'eau sans les dérivations				
Zone	Hypothèse retenue	p-value du test	pente (km ³ /an ²)	R ²
Secteur 0	1	0.0039	-0.0817	0.111***
Secteur 1	0	0.3668	-0.0166	0.009
Secteur 2	0	0.8156	-0.0003	0.0000
Secteur 3	0	0.0528	0.1833	0.049*
Secteur 4	0	0.1909	0.1430	0.022
Secteur 5	0	0.6337	0.0260	0.004
Secteur 6	0	0.7999	0.0041	0.0001
BV-Baie James	0	0.2917	0.2703	0.013
Secteurs 0 à 6	0	0.4115	0.2578	0.009
Débits de ruissellement en volume d'eau avec les dérivations				
Zone	Hypothèse retenue	p-value du test	pente (km ³ /an ²)	R ²
Secteur 0	1	0.0039	-0.0817	0.111***
Secteur 1	0	0.0540	-0.0406	0.053*
Secteur 2	1	0.0000	1.3620	0.707***
Secteur 3	1	0.0000	-0.5720	0.324***
Secteur 4	0	0.1909	0.1430	0.022
Secteur 5	0	0.6337	0.0260	0.004
Secteur 6	0	0.7999	0.0041	0.0001
BV-Baie James	1	0.0036	0.8774	0.120***
Secteurs 0 à 6	1	0.0202	0.8410	0.088**
Débits avec dérivations rapportés en hauteur d'eau				
Zone	Hypothèse retenue	p-value du test	pente (mm/an ²)	R ²
Secteur 0	1	0.0039	-1.131	0.111***
Secteur 1	0	0.2315	-0.487	0.016
Secteur 2	1	0.0285	1.078	0.053*
Secteur 3	0	0.0812	0.949	0.043*
Secteur 4	0	0.1909	0.514	0.022
Secteur 5	0	0.6337	0.283	0.004
Secteur 6	0	0.7999	0.048	0.0001
BV-Baie James	0	0.1160	0.602	0.038
Secteurs 0 à 6	0	0.2014	0.508	0.028

Le Tableau 17 présente les valeurs équivalentes du Tableau 16 pour les débits annuels de précipitation et d'évaporation sur la même période de 1951 à 2020. Seules les valeurs pour la baie James et les sept secteurs réunis ont été considérés. Les résultats des tests de Mann-Kendall témoignent d'une tendance significative pour l'intensification des précipitations et l'intensification de l'évaporation selon les trois scénarios sauf les précipitations dans le scénario sans dérivation sur l'ensemble des sept secteurs. Toutefois, dans ce cas le p-value est tout juste supérieur au seuil de significativité ($p=0.054$) et la pente demeure probablement significative. Par ailleurs, toutes les pentes témoignent d'une hausse des débits annuels de précipitation et d'évaporation (pour rappel, les valeurs d'évaporation sont négatives par convention). Si les tendances du ruissellement de rivière ne sont souvent pas significatives, c'est principalement parce que l'effet de la hausse des précipitations est contrebalancé par l'effet de la hausse de l'évaporation pour la période d'étude (le ruissellement s'obtient en additionnant les deux valeurs).

Tableau 17. Période de 1951 à 2020, résultat des tests de Mann-Kendall pour les débits annuels de précipitations totales et d'évaporation sur le bassin versant de la baie James et sur l'ensemble des secteurs. La pente de la régression linéaire est significativement différente de 0 si le p-value du test de Mann-Kendall est inférieur à 0.05. Les tendances de Mann-Kendall ont été notés selon trois scénarios : le scénario naturel où les dérivations de bassins versant ne sont pas considérées, le scénario réel où on les y ajoute et le scénario où ce sont les hauteurs d'eau par taille de bassin versant qui modère l'impact des dérivations. La pente de la régression linéaire et R^2 sont aussi présentés. * R^2 est significatif à $p = 0.10$. ** R^2 est significatif à $p = 0.05$. *** R^2 est significatif à $p = 0.01$.

Débits sans les dérivations				
	Hypothèse retenue	p-value du test	pente (km ³ /an ²)	R ²
Précipitations				
BV-Baie James	1	0.0358	0.5493	0.054*
Secteurs 0 à 6	0	0.0540	0.5867	0.048*
Évaporation				
BV-Baie James	1	0.0010	-0.2790	0.152***
Secteurs 0 à 6	1	0.0015	-0.3288	0.150***
Débits avec les dérivations				
Précipitations				
	Hypothèse retenue	p-value du test	pente (km ³ /an ²)	R ²
BV-Baie James	1	0.0000	1.4482	0.270***
Secteurs 0 à 6	1	0.0000	1.4492	0.227***
Évaporation				
BV-Baie James	1	0.0000	-0.5865	0.402***
Secteurs 0 à 6	1	0.0000	-0.6238	0.357***
Débits avec dérivations rapportés en hauteur d'eau				
	Hypothèse retenue	p-value du test	pente (mm/an ²)	R ²
Précipitations				
BV-Baie James	1	0.0137	0.862	0.075**
Secteurs 0 à 6	1	0.0197	0.792	0.069**
Évaporation				
BV-Baie James	1	0.0106	-0.280	0.096***
Secteurs 0 à 6	1	0.0074	-0.302	0.107***

L'exercice a été reproduit séparément pour les périodes de 1951 à 1976 et 1976 à 2020 puisque les données suggèrent que les débits annuels diminuent jusque dans la période de 1971 à 1980, puis remontent par la suite (Figure 37). Les Tableaux 18, 19 et 20 présente les données équivalentes aux Tableaux 16 et 17 pour les périodes de 1951 à 1976 (Tableau 18) et 1976 à 2020 (Les Tableaux 19 et 20). Pour la période de 1951 à 1976, tous les secteurs montrent une diminution du ruissellement sauf les secteurs 5 et 6. Les ensembles du bassin versant de la baie James et des secteurs 0 à 6 montrent également une diminution des débits de ruissellement. Toutefois ces tendances ne sont statistiquement pas significatives. Les diminutions de l'évaporation sont les seules à démontrer une significativité selon le test de Mann-Kendall sur cette période.

Tableau 18. Équivalent des Tableaux 16 et 17 pour la période de 1951 à 1976. *Le R² est significatif à p = 0.10. **Le R² est significatif à p = 0.05. ***Le R² est significatif à p = 0.01.

Débits de ruissellement en volume d'eau				
Zone	Hypothèse retenue	p-value du test	pente (km ³ /an ²)	R ²
Secteur 0	0	0.4806	-0.0665	0.010
Secteur 1	0	0.2340	-0.0924	0.040
Secteur 2	0	0.4536	-0.2851	0.034
Secteur 3	0	0.6277	-0.3204	0.014
Secteur 4	0	0.2171	-0.4729	0.031
Secteur 5	0	0.3321	0.2346	0.040
Secteur 6	0	0.4275	0.1064	0.011
BV-Baie James	0	0.5666	-0.9103	0.017
Secteurs 0 à 6	0	0.5371	-0.8964	0.013
Débits de ruissellement rapportés en hauteur d'eau				
Zone	Hypothèse retenue	p-value du test	pente (mm/an ²)	R ²
Secteur 0	0	0.4806	-0.921	0.010
Secteur 1	0	0.2340	-2.023	0.040
Secteur 2	0	0.4536	-2.209	0.034
Secteur 3	0	0.6277	-1.674	0.014
Secteur 4	0	0.2171	-1.700	0.031
Secteur 5	0	0.3321	2.552	0.040
Secteur 6	0	0.4275	1.250	0.011
BV-Baie James	0	0.5666	-1.194	0.017
Secteurs 0 à 6	0	0.5371	-1.003	0.013
Débits en volume d'eau				
	Hypothèse retenue	p-value du test	pente (km ³ /an ²)	R ²
Précipitations				
BV-Baie James	0	0.2171	-1.8437	0.067
Secteurs 0 à 6	0	0.2704	-1.9697	0.061
Évaporation				
BV-Baie James	1	0.0063	0.9334	0.286***
Secteurs 0 à 6	1	0.0072	1.0733	0.270***
Débits rapportés en hauteur d'eau				
	Hypothèse retenue	p-value du test	pente (mm/an ²)	R ²
Précipitations				
BV-Baie James	0	0.2171	-2.417	0.067
Secteurs 0 à 6	0	0.2704	-2.204	0.061
Évaporation				
BV-Baie James	1	0.0063	1.224	0.286***
Secteurs 0 à 6	1	0.0072	1.201	0.270***

Tableau 19. Équivalent du Tableau 16 pour la période de 1976 à 2020. *Le R² n'est pas significatif à p = 0.05, mais significatif à p = 0.10. **Le R² est significatif à p = 0.05. ***Le R² est significatif à p = 0.01.

Débites de ruissellement sans les dérivations				
Zone	Hypothèse retenue	p-value du test	pente (km ³ /an ²)	R ²
Secteur 0	1	0.0390	-0.1056	0.089**
Secteur 1	0	0.0590	0.0791	0.092**
Secteur 2	0	0.0617	0.2144	0.088**
Secteur 3	1	0.0095	0.3799	0.126**
Secteur 4	0	0.1504	0.2696	0.034
Secteur 5	0	0.1678	0.1164	0.035
Secteur 6	0	0.2365	0.0751	0.018
BV-Baie James	0	0.0944	0.8747	0.069*
Secteurs 0 à 6	0	0.1246	1.0289	0.071*
Débites de ruissellement avec les dérivations				
Zone	Hypothèse retenue	p-value du test	pente (km ³ /an ²)	R ²
Secteur 0	1	0.0390	-0.1056	0.089**
Secteur 1	0	0.1561	0.0583	0.055
Secteur 2	1	0.0000	1.9216	0.684***
Secteur 3	1	0.0449	-0.4675	0.158***
Secteur 4	0	0.1504	0.2696	0.034
Secteur 5	0	0.1678	0.1164	0.035
Secteur 6	0	0.2365	0.0751	0.018
BV-Baie James	1	0.0023	1.7345	0.223***
Secteurs 0 à 6	1	0.0042	1.8679	0.199***
Précipitation nette avec dérivations rapportés en hauteur d'eau				
Zone	Hypothèse retenue	p-value du test	pente (mm/an ²)	R ²
Secteur 0	1	0.0390	-1.462	0.089**
Secteur 1	0	0.0834	1.608	0.080*
Secteur 2	1	0.0000	4.681	0.392***
Secteur 3	1	0.0157	2.036	0.106**
Secteur 4	0	0.1504	0.969	0.034
Secteur 5	0	0.1678	1.267	0.035
Secteur 6	0	0.2365	0.882	0.018
BV-Baie James	1	0.0133	1.817	0.168***
Secteurs 0 à 6	1	0.0215	1.730	0.155***

Tableau 20. Équivalent du Tableau 17 pour la période de 1976 à 2020. *Le R^2 est significatif à $p = 0.10$. **Le R^2 est significatif à $p = 0.05$. ***Le R^2 est significatif à $p = 0.01$.

Débits sans les dérivations				
	Hypothèse retenue	p-value du test	pente (km^3/an^2)	R^2
Précipitations				
BV-Baie James	1	0.0028	1.5403	0.211***
Secteurs 0 à 6	1	0.0060	1.7548	0.211***
Évaporation				
BV-Baie James	1	0.0000	-0.6656	0.362***
Secteurs 0 à 6	1	0.0003	-0.7260	0.310***
Débits avec les dérivations				
Précipitations				
	Hypothèse retenue	p-value du test	pente (km^3/an^2)	R^2
BV-Baie James	1	0.0001	2.2766	0.349***
Secteurs 0 à 6	1	0.0002	2.4609	0.330***
Évaporation				
BV-Baie James	1	0.0000	-0.8976	0.452***
Secteurs 0 à 6	1	0.0000	-0.9484	0.393***
Débits avec dérivations rapportés en hauteur d'eau				
	Hypothèse retenue	p-value du test	pente (mm/an^2)	R^2
Précipitations				
BV-Baie James	1	0.0015	2.161	0.238***
Secteurs 0 à 6	1	0.0025	2.096	0.237***
Évaporation				
BV-Baie James	1	0.0002	-0.798	0.321***
Secteurs 0 à 6	1	0.0007	-0.755	0.280***

À noter que de 1951 à 1976, il n'y a que 26 données annuelles, contre 70 pour l'ensemble de la période d'étude. Le test de tendance de Mann-Kendall obtient plus difficilement des valeurs positives pour de plus petits échantillons (Meals et al., 2011). De même, le test de Student exige pour un niveau de significativité de 0.05 que $R^2 \geq 0.151$ avec 26 échantillons, mais seulement $R^2 \geq 0.055$ avec 70 échantillons. On remarque que l'on obtient exactement les mêmes résultats que l'on mesure en termes de volume ou de hauteur d'eau pour la période 1951 à 1976. Cela est normal puisqu'aucunes modifications de bassin versants n'est venu altérer la taille des zones étudiées, la superficie des bassins versants ne changeant pas sur la période, la hauteur d'eau est proportionnelle au volume.

De 1976 à 2020, les pentes s'inversent et les p-value du test de Mann-Kendall sont plus souvent en dessous du seuil critique à 0.05 (Tableaux 19 et 20). Les fortes augmentations des précipitations et de l'évaporation sont significatives selon le test. Par ailleurs, l'amplitude des pentes s'approchent du double des pentes observées sur la période de 1951 à 2020. En ce qui a trait au ruissellement, le secteur 3 présente une hausse significative pour le scénario sans dérivation et les secteurs 1 et 2 ainsi que le bassin versant de toute la baie James présentent des hausses avec des p-value entre 0.05 et 0.10, alors que le secteur 0 présente une diminution significative (a contrario de toutes les autres). En incluant les dérivations, les secteurs 2 et 3 ainsi que le bassin versant de toute la baie James et l'ensemble des sept secteurs démontrent tous des augmentations significatives.

CHAPITRE 3

DISCUSSION

3.1 LIMITATIONS DE LA METHODE D’EVALUATION DU DEBIT ANNUEL DE RUISSELLEMENT PAR L’UTILISATION DU MODELE ERA5

3.1.1 Limitation dans la délimitation des bassins versants

Une difficulté du présent travail était de devoir affiner les délimitations des bassins versants. En effet, les polygones des bassins versants disponibles sur le Réseau hydro national incluent les aires non jaugées de part et d'autre de l'embouchure de chaque rivière et la limite terre-mer est très approximative. Ces corrections ont été effectuées à la main à l'aide du logiciel ArcMap, de cartes topographiques (série CanVec) et des données satellitaires. Il va sans dire que le tracé du pourtour des bassins versants en suivant le long des crêtes et sommets peut conduire à certaines erreurs qu'il demeure difficile de quantifier. C'est d'autant plus vrai lorsque la topographie est faible comme dans le cas de l'ouest de la baie James et a fortiori aux abords du bassin de la rivière Roggan. On peut toutefois comparer les superficies des bassins versants utilisées ici avec celles rapportées par le Ministère de l'Environnement (2019). À titre d'exemple la section détournée du bassin versant de la rivière Caniapiscou présente une superficie de 37 380 km² selon le Ministère de l'Environnement (2019) alors que sa superficie a été ici estimée à 38 784 km², ce qui présente un écart de 3.7 %. Le bassin versant de la baie James posséderait quant à lui une superficie de 684 000 km² selon le Ministère de l'Environnement (2019) et 690 468 km² selon la présente étude, démontrant ici un écart de 0.9 %. Ainsi, s'il peut subsister certains écarts au niveau régional, au niveau du bassin versant de la baie James dans sa globalité, ces écarts sont négligeables.

3.1.2 Limitation du modèle ERA5 et de l'algorithme pour évaluer le ruissellement

Les débits de rivières présentés dans ce travail sont affectés par plusieurs limitations liées d'une part à la résolution et la qualité du modèle ERA5 et d'autre part aux approximations utilisées pour calculer les débits à partir des précipitations et de l'évaporation. Les principaux facteurs responsables d'une partie des différences entre les débits annuels modélisés et ceux observés aux stations hydrométriques sont détaillés ci-dessous.

La résolution des pixels ERA5 est de 0.25° par 0.25° , soit 28 km nord-sud et 16 à 18 km est-ouest pour les latitudes de la zone d'étude. Cela peut être trop grossier pour bien traiter des petits bassins versants quand les précipitations varient sur des courtes distances, comme par exemple près de la côte. De plus, la faible résolution du modèle ERA5 tend à réduire considérablement les variations d'altitudes. Betts et al. (2020) mentionnent le cas de la chaîne de montagne des Adirondacks (État de New York), dont plusieurs pics dépassent les 1200 m d'altitude. Le modèle ERA5 utilise une altitude moyenne de 600 m, loin de représenter la variabilité topographique de la zone. Il en résulte des variations de température. Or, les données de ruissellement, de précipitations et d'évaporation sont sujettes à l'influence de la température. Dans le bassin versant de la baie James, c'est surtout les régions montagneuses aux limites sud-est et est de la zone qui pourraient être affectées.

Tel qu'observé par Alfieri et al. (2020), le modèle ERA5 produit des différences régionales prononcées, nécessitant des études détaillées des processus hydrologiques en cours pour une région donnée. Le modèle semble fournir de meilleurs résultats pour des latitudes moyennes de l'hémisphère nord.

Les données de précipitations et d'évaporation proviennent de deux modélisations distinctes d'ERA5 : la modélisation de 1979 à nos jours, qui est continuée chaque mois, et la modélisation historique couvrant 1950 à 1978. Cette dernière était encore qualifiée de préliminaire au moment d'utiliser ses valeurs. Toutefois, comme le mentionne ECMWF (2022a), le problème observé sur ces valeurs concerne les cyclones tropicaux qui seraient

surévalués par le modèle. Cela ne s'applique donc pas aux données du bassin versant de la baie James, trop au nord pour être affectée.

Hersbach et al. (2019) ont produit une analyse exhaustive du modèle. Ils mentionnent des problèmes de biais de température dans la haute atmosphère qui peuvent produire des valeurs erronées de précipitations. On y mentionne également la production à des endroits spécifiques de précipitations trop élevées nommées « rain bombs ». Toutefois ces épisodes surviendraient rarement. Ils pourraient toutefois en partie expliquer la différence marquée des précipitations modélisées par ERA5 par rapport aux stations hydrométriques situées sur les rivières Winisk et Ekwan pour l'année 1991.

Malgré que le modèle présente une amélioration marquée par rapport à son prédécesseur, ERA-Interim, certaines erreurs subsistent. Betts et al. (2019) ont comparé les valeurs obtenues par le modèle avec celles de la base de données produite par Mekis et Vincent (2011) sur l'ensemble du Canada. Ils en concluent que ERA5 a un biais négatif de vitesse de vent qui augmente quasi-linéairement avec la vitesse du vent et qui est plus grand pendant la journée que pendant la nuit. Pendant la saison estivale, ERA5 surestime les précipitations de $8 \pm 9\%$ par rapport à la base de données de Mekis et Vincent (2011). Ce biais passe à $-22 \pm 7\%$ pendant l'hiver, mais il est impossible d'affirmer que le biais provient d'ERA5 puisqu'on peut aussi supposer que les corrections du modèle de Mekis et Vincent (2011) avec le couvert de neige pourraient être trop fortes.

Bien que cette liste présente de potentielles propensions du modèle ERA5 à générer des erreurs, il est indéniable que le modèle est une nette avancée sur son prédécesseur ERA-Intérim (Hersbach et al., 2019). De plus, notre étude a montré que les données de débit annuel de ruissellement du modèle calibré avec un coefficient de 1.06 n'étaient pas significativement différentes des valeurs observées aux stations hydrométriques, permettant de les utiliser avec un niveau de confiance fort.

Cette étude n'utilise pas de modèle hydrologique pour représenter l'écoulement horaire ou quotidien des cours d'eau. Pour cette raison, la résolution temporelle est limitée aux débits

moyens annuels. L'utilisation d'années hydrologiques minimise le problème de stockage d'eau sous forme de neige ou de glace. Néanmoins, l'algorithme assume que la quantité d'eau dans les cours d'eau, les nappes phréatiques et les réservoirs sont identiques à la fin de chaque année hydrologique, ce qui n'est pas nécessairement le cas. En cas de très fortes précipitations durant la deuxième moitié de septembre, le débit annuel pourrait être surestimé car toute l'eau tombée n'aura pas eu le temps d'atteindre la baie James le 30 septembre. Par contre, en cas d'importante sécheresse en août et septembre, le débit annuel pourrait être sous-estimé car le volume d'eau stocké dans les lacs, les milieux humides et les nappes phréatiques sera moindre en fin d'année qu'en début d'année hydrologique. De même, les niveaux d'eau particulièrement hauts ou bas au 30 septembre dans les réservoirs gérés par Hydro-Québec induiront des surestimations ou des sous-estimations du débit annuel. Toutefois, ces problèmes ne font que décaler l'eau entre deux années successives. Ils ne devraient pas influencer les tendances pluriannuelles calculées dans cette étude. Par contre, ils pourraient expliquer certaines différences ponctuelles entre les débits modélisés et les observations des stations hydrométriques.

Cette étude assume aussi que toutes les précipitations nettes tombées dans un bassin versant vont s'écouler dans celui-ci, ignorant de possibles mouvements d'eau sous-terrain entre les bassins versants. Une partie significative de l'écoulement de l'eau dans un bassin versant peut être souterrain (Orlova et Branfireun, 2014), mais les échanges par-dessous une ligne de partage des eaux sont nettement moins fréquents. De plus, de tels écoulements souterrains entre deux bassins versants se jetant tous les deux dans la baie James n'affecteront pas les résultats globaux pour toute la baie James.

3.1.3 Limitations dans l'utilisation des données de stations hydrométriques

Déry et al. (2016) fait état de plusieurs difficultés dans l'utilisation des données de débits de rivières provenant des stations hydrométriques. Ces données ont été utilisées pour la validation de notre modèle et affectent l'ensemble des résultats produits par Déry et al. (2016). De manière générale, des erreurs peuvent émerger de la méthode de collection des

données, de la fréquence d'échantillonnage, des conditions environnementales telles que le couvert de glace, les effets de refoulements causés par un barrage engendré par l'accumulation de glaces, les inondations, les barrages de castors et la végétation ainsi que les conditions géographiques locales telles que la présence ou l'absence de plaines d'inondation. Les erreurs se situeraient autour de 2 à 5 % en l'absence de plaine d'inondation et de couvert de glace, mais monteraient à 5-12 % en présence de plaine d'inondation et/ou de couvert de glace.

Déry et al. (2016) fait également mention de données manquantes, a fortiori dans les premières années de leur étude. Les données ont aussi été lacunaires pour les stations en Ontario entre le milieu et la fin des années 1990 et au Québec entre le début et le milieu des années 2000. Le nombre de stations hydrométriques a continué de diminuer pendant cette décennie avec une amélioration dans les années 2010. Les manquements principaux concernent les rivières Ekwan (1964-1966 et 1996-2010), les rivières Albany, Winisk et Attawapiskat (1996-1998) et la rivière Moose (1998-2001). Les données pour les rivières à débit détournées d'Eastmain et Rupert sont aussi manquantes depuis 2005, car secret commercial d'Hydro-Québec. Les données manquantes n'affectent que très peu cette étude. Elles réduisent le nombre d'années disponibles pour effectuer une comparaison, mais ce nombre est tout de même suffisant pour effectuer la validation. Par contre, la période entre 1951 et 1960 n'a pu être comparée avec aucune donnée de débits de rivière observés. Il était par ailleurs difficile de trouver des stations hydrométriques satisfaisant les critères de sélection présentés dans la section 1.5.1 dans le secteur 2. Ce secteur a aussi été évité afin de ne pas jumeler la validation de la méthode calculant le débit annuel naturel à l'estimation du débit de rivières dont l'écoulement est contrôlé par plusieurs barrages d'accumulation.

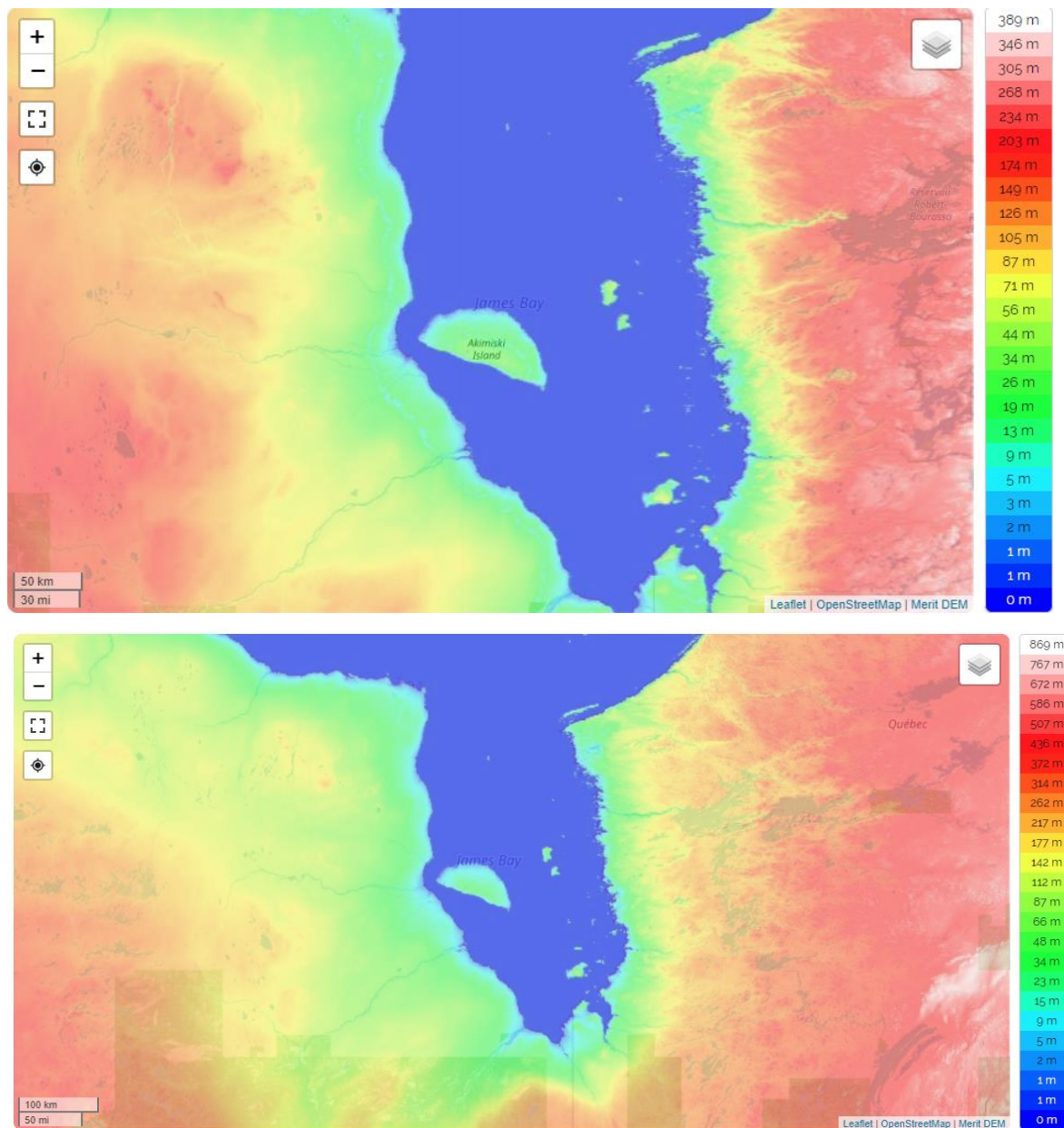


Figure 44. Cartes topographiques de la baie James à deux échelles (source des données <https://fr-ca.topographic-map.com>). On remarque l'escarpement croissant à l'est et la topographie plus plane à l'ouest.

Le manque de stations situées aux embouchures des rivières est compréhensible étant donné la présence de plaines d'inondation à certains endroits. La Figure 44 témoigne du faible gradient altitudinal présent sur la rive ouest de la baie James favorisant la présence de

plaines inondées. Le débit mesuré par les stations hydrométriques ne correspond donc pas au débit des bassins versants complet de rivières, puisqu'une grande portion de l'eau rejoint la rivière en aval de ces stations. Le sous-bassin versant en amont de chaque station hydrométrique a donc été tracé pour la validation. Toutefois, la validation n'a pas tenu compte de la partie la plus avale des bassins versants, ce qui pourrait constituer un problème si la partie avale non jaugée par les stations se comporte différemment de la section amont.

Les flags de qualité soulèvent également des questions sur la précision des débits de ruissellement observés aux stations hydrométriques. Le nombre d'années-stations comportant au moins une valeur quotidienne flaggée est de 300 alors que seulement 31 années-stations ne comportent aucun flag. Toutefois, tel que montré à la Figure 14, il n'y a pas de différence notable entre les pentes de l'ensemble des données non flaggées et l'ensemble des 331 données.

La présence de barrages présente également une nouvelle difficulté. En plus de limiter l'utilisation des stations hydrométriques dans le secteur afin d'éviter de devoir tenir compte de l'effet des dérivations dans la validation du modèle ERA5, il est difficile de quantifier l'apport en eau souterraine passant sous les barrages et digues. De plus, il demeure possible que de faibles débits résiduels subsistent pour d'autres dérivations que celles de la rivière Rupert, ou que le débit résiduel de la rivière Rupert soit en réalité plus élevé (ou plus faible) que le débit défini dans les accords avec la nation crie.

Toutefois, comme l'objectif n'est pas de définir le débit de ruissellement de rivière à partir des valeurs de stations hydrométriques, mais plutôt de valider l'utilisation du modèle ERA5 en comparant les débits de ruissellement observés et modélisés, il n'est pas nécessaire d'avoir une série temporelle observée parfaite sans données manquantes. De plus, la présence de flag ne démontre pas de différence significative avec les données sans flags. Enfin, le problème de dérivation de bassin versant a pu être contourné en évitant d'utiliser pour la validation des mesures de stations hydrométriques où des barrages et digues importantes étaient présentes. À noter qu'une dérivation de bassin versant est présente en amont de la

Grande rivière de la Baleine où une station hydrométrique a été utilisée. Toutefois, la taille du bassin versant n'a diminué que de 4.3 % (1 722 km² sur un total de 39 888 km²).

3.2 COMPARAISON DES DEBITS DE RIVIERE MODELISES PAR ERA5 ET LES TRAVAUX DE DERY ET AL. (2016)

Déry et al. (2016) ont effectué une étude exhaustive sur les débits de ruissellement de rivière dans le nord du Canada et notamment dans la région de la baie d'Hudson pour 42 rivières sur des périodes de 10 ans entre 1964 et 2013. Treize de ces rivières font aussi partie du présent travail, soit les rivières d'ouest en est : Winisk, Ekwan, Attawapiskat, Albany, Moose, Harricana, Nottaway, Broadback, Rupert, Pontax et Eastmain. Les données de Déry et al. (2016) ont été comparées aux données de modélisation d'ERA5 calibré de la présente étude (Tableau 21, Figures 45 et 46). À noter que Déry et al. (2016) utilisent des années civiles de janvier à décembre, et non des années hydrologiques d'octobre à septembre.

On constate que les données de modélisation d'ERA5 diffèrent quelque peu des données de Déry et al. (2016). La variation est considérable sur certaines rivières à débit faible ou moyen, telles que Ekwan (ratio ERA5/Dery = 2.11), Harricana (ratio 1.78) et Attawapiskat (ratio 1.69). Pour la rivière Ekwan, la station hydrométrique utilisée par Déry et al. (2016) est la même que celle qui a été ici utilisée pour la validation du modèle ERA5 pour interpréter les débits de ruissellement, soit la station 04EA001 (voir Tableau 5). Or, le bassin de cette station hydrométrique est de 10 160 km² alors que celui que nous avons mesuré pour le bassin total de la rivière Ekwan est de 18 839 km². Le quotient de la superficie totale du bassin de la rivière Ekwan sur le bassin de sa station hydrométrique est de 1.85. Ce qui expliquerait grandement le ratio de 2.11 susmentionné. La variation est plus faible sur les rivières à fort débit. Le test de rangs signés de Wilcoxon sur les 65 données appariées rejette l'hypothèse H₀ (p-value < 0.001). Autrement dit, les données de modélisation avec ERA5 ne proviennent pas de la même distribution que les données de Déry et al. (2016). La Figure 47 met en évidence que les données de modélisation ont une tendance à la surévaluation par rapport aux valeurs de Déry et al. (2016) comme le démontre l'ordonnée à l'origine de la droite de régression de 2.7621 km³/an. Un test de Student démontre également que cette valeur est significativement différente de 0 (p<0.05, intervalle de confiance de 1.712 à 3.824 km³/an). Cela dit, le coefficient de détermination élevé de 0.982 et la pente de la régression

linéaire (0.999) très proche de la valeur parfaite de 1 démontrent que l'association demeure excellente entre les valeurs observées par Déry et les valeurs modélisées avec ERA5. Cette pente est non-significative différente de 1 à $p=0.05$ pour un intervalle de confiance de 0.966 à 1.032.

Tableau 21. Débits de ruissellement annuels par période de 10 ans (années civiles) entre 1964 et 2013 selon Déry et al. (2016) et le modèle ERA5 calibré (valeurs moyennes et écarts types). Les noms complets des rivières sont : Winisk, Ekwon, Attawapiskat, Albany, Moose, Harricana, Nottaway, Broadback, Rupert, Pontax, Eastmain, La Grande et Grande rivière de la Baleine.

Déry-Débit annuel moyen par décennie (km ³ /an) par rivière													
Période	Win.	Ekw.	Atta.	Alba.	Moo.	Har.	Not.	Bro.	Rup.	Pon.	East.	LG	GRB
1964-1973	17.78	3.24	13.22	33.27	42.76	7.48	33.11	10.22	27.54	3.11	30.02	56.80	21.86
1974-1983	14.17	2.69	10.74	28.40	39.46	8.20	33.49	9.91	27.66	3.00	20.62	58.77	20.03
1984-1993	12.63	2.32	9.24	30.05	38.76	7.91	29.93	9.62	25.17	3.23	3.17	96.12	19.38
1994-2003	14.02	2.75	11.33	32.14	35.90	7.39	32.97	10.06	26.17	3.24	3.10	99.50	17.80
2004-2013	17.63	2.82	12.61	34.99	38.16	7.76	31.85	10.34	20.03	3.02	3.62	109.90	18.97
Déry-Écart type par période (km ³ /an) par rivière													
1964-1973	2.53	0.49	2.19	5.77	6.02	0.73	3.62	1.40	2.45	0.00	3.41	6.45	2.30
1974-1983	2.69	0.63	2.36	4.88	6.24	1.18	3.99	1.24	2.25	0.37	7.66	10.73	1.98
1984-1993	4.23	0.86	2.45	7.27	4.90	0.88	4.66	0.83	1.78	0.42	0.32	6.98	1.92
1994-2003	2.02	0.14	1.84	20.16	5.60	0.91	3.76	0.97	1.62	0.40	0.31	8.43	2.07
2004-2013	4.55	0.26	3.19	8.10	7.83	0.38	4.66	1.10	4.08	0.38	0.17	7.73	1.49
ERA5-Débit annuel moyen par décennie (km ³ /an) par rivière													
1964-1973	22.23	6.49	21.34	35.07	36.74	12.70	34.83	10.83	27.22	3.90	28.62	59.77	22.25
1974-1983	20.47	5.92	18.44	34.21	42.45	14.44	37.96	11.33	28.01	3.94	19.43	54.23	18.88
1984-1993	17.80	5.18	16.57	33.73	41.86	14.00	35.02	10.54	26.26	3.89	2.67	98.76	18.95
1994-2003	18.69	5.04	18.76	35.97	41.80	14.10	37.70	11.30	27.72	3.93	2.65	102.11	17.28
2004-2013	22.30	6.47	20.83	37.71	40.45	13.75	36.95	11.83	22.09	4.32	3.01	117.94	19.56
ERA5-Écart type par période (km ³ /an) par rivière													
1964-1973	5.26	1.33	5.07	7.25	8.43	3.45	8.02	3.18	5.40	1.06	4.75	8.17	2.21
1974-1983	4.80	1.67	4.79	11.19	8.67	2.40	6.47	2.50	4.13	0.90	12.97	16.06	1.94
1984-1993	6.94	2.05	6.21	10.94	7.45	2.56	6.17	1.64	3.07	0.53	0.44	15.71	3.12
1994-2003	4.30	1.58	5.01	7.49	7.27	1.76	4.87	1.47	3.60	0.67	0.56	15.45	3.29
2004-2013	8.45	2.16	7.01	12.40	10.63	2.77	6.32	2.08	8.98	0.59	0.35	13.36	3.18

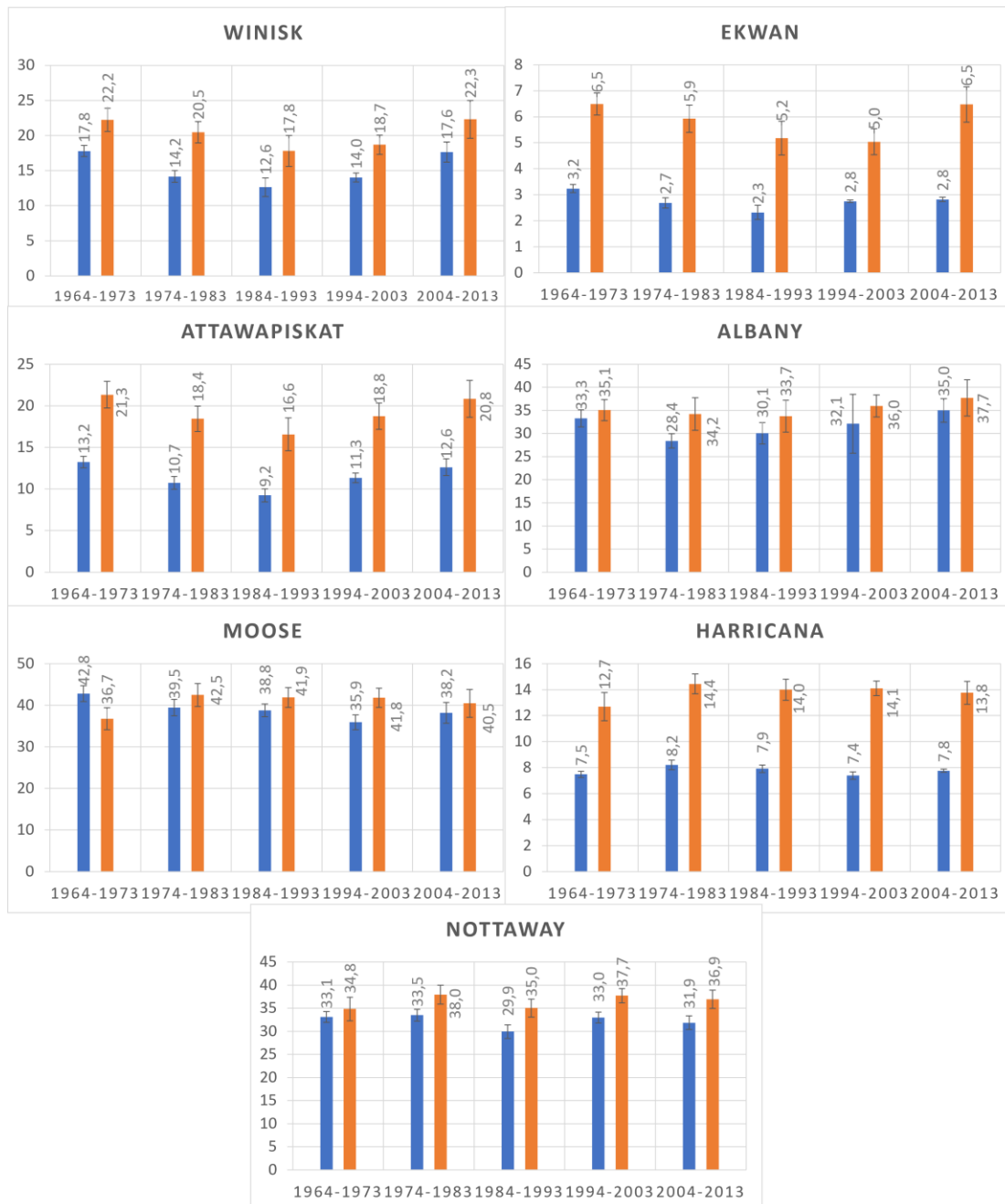


Figure 45. Comparaison des débits annuels moyens de rivières (années civiles) (en km³/an) pour les périodes 1964-1973, 1974-1983, 1984-1993, 1994-2003 et 2004-2013 mesurés par Déry et al. (2016) (en bleu) et à partir du modèle ERA5 calibré (orange) pour les rivières Winisk, Ekwana, Attawapiskat, Albany, Moose, Harricana, Nottaway. Les barres d'erreur représentent ± 1 erreur type.

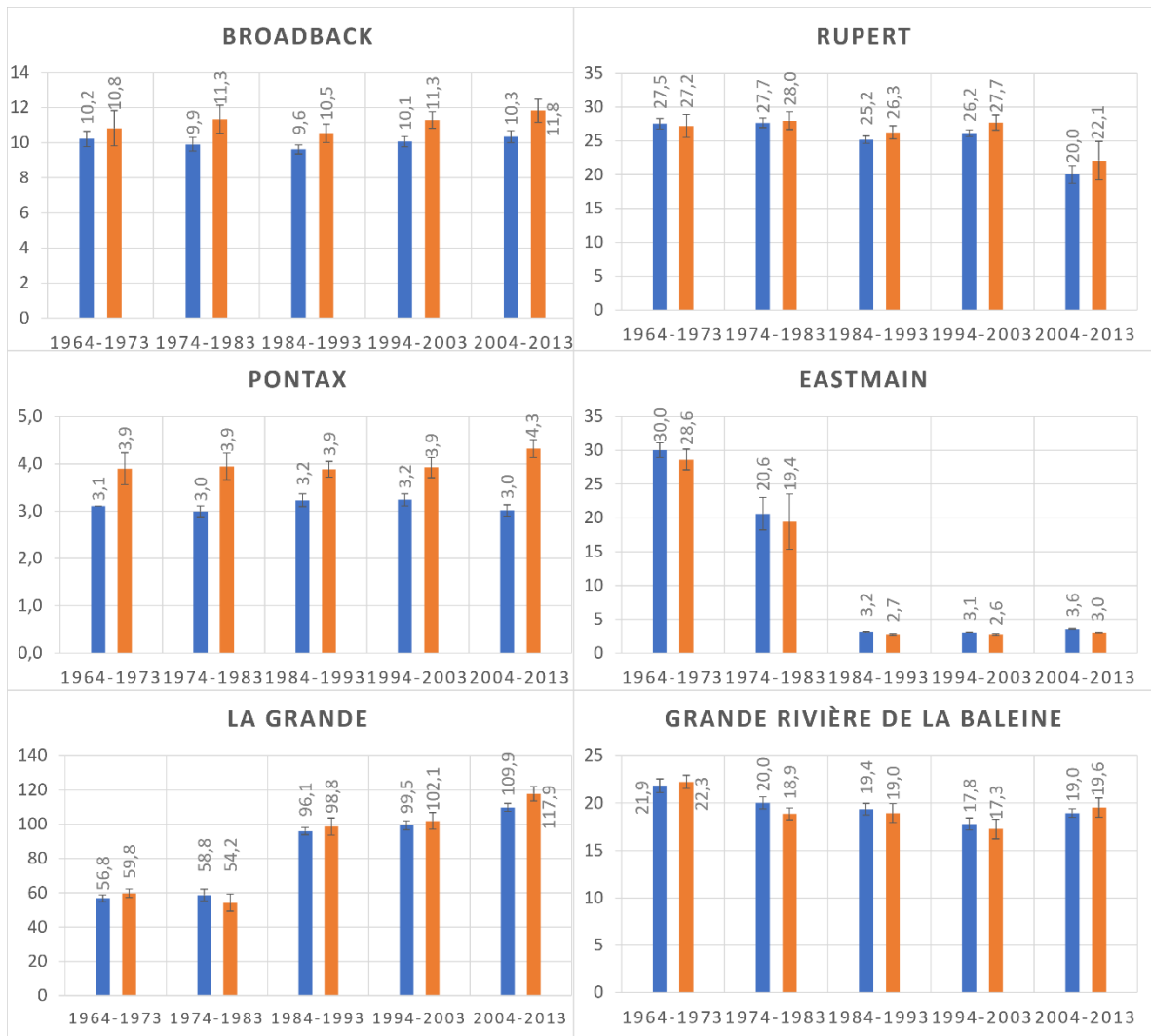


Figure 46. Comparaison des débits annuels moyens de rivières (années civiles) (en km³/an) pour les périodes 1964-1973, 1974-1983, 1984-1993, 1994-2003 et 2004-2013 mesurés par Déry et al. (2016) (bleu) et à partir du modèle ERA5 calibré (orange) pour les rivières Broadback, Rupert, Pontax, Eastmain, La Grande et Grande rivière de la Baleine. Les barres d'erreur représentent ± 1 erreur type.

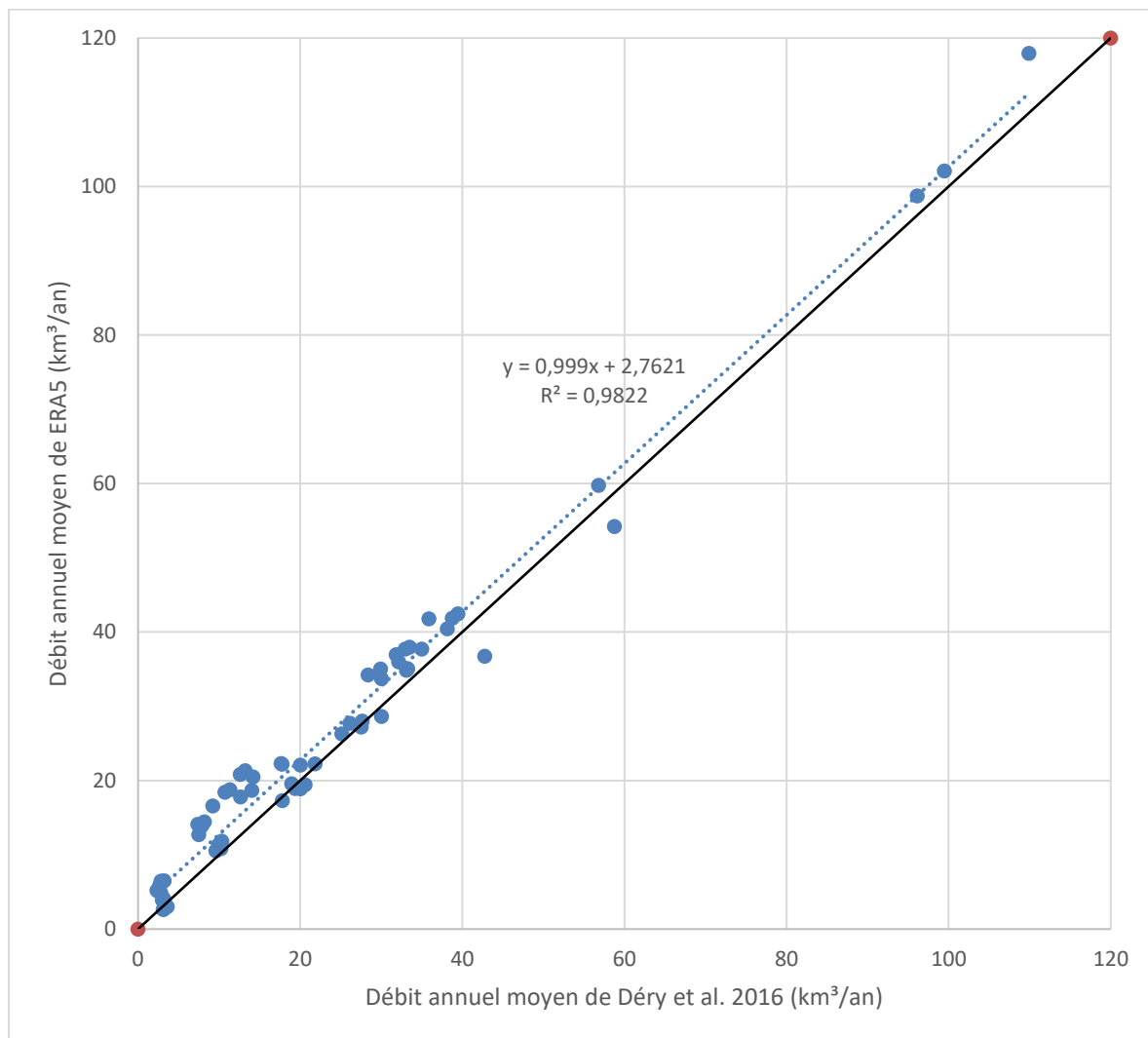


Figure 47. Débits annuels moyens par période de 10 ans entre 1964 et 2013 sur l'ensemble des 13 rivières modélisées par ERA5 en fonction des débits obtenus par Déry et al. (2016). La droite noire présente ce que serait une relation parfaite alors que la régression linéaire est affichée en pointillé bleu. Notez que l'écart entre les deux modèles est plus important en proportion des volumes plus faibles pour les rivières ayant un faible débit (inférieure à 20 km³/an).

3.2.1 Limitation majeure de la comparaison des débits de rivières modélisés par ERA5 et estimés par Déry et al. (2016)

La cause principale de l'écart entre les valeurs de Déry et al. (2016) et les débits de ruissellement modélisés par ERA5 se trouve dans la définition des bassins versants. Déry et

al. (2016) considèrent que la station la plus près de l’embouchure d’une rivière mesure le débit total du bassin versant de cette rivière. Ils n’ont pas appliqué de correctifs pour que les stations ne se situant pas directement à l’embouchure d’une rivière représentent plus fidèlement l’entièreté du bassin versant. La Figure 13 montre bien toute l’importance de bien délimiter l’aire du bassin versant en aval des stations hydrométriques tel qu’effectué dans le présent travail. Cinq de ces neuf stations ont également servi à la publication de Déry et al. (2016). Pour la rivière Albany, par exemple, qui possède un bassin versant de 104 697 km², la station hydrométrique située le plus près de son embouchure couvre une aire de drainage de seulement 86 578 km², soit 83% du total. Le Tableau 22 présente un comparatif des débits de ruissellement annuels moyens par période selon Déry et al. (2016), le modèle ERA5 et les données de stations (en années civiles). On constate effectivement que les données de Déry et al. (2016) sont plus proches des valeurs aux stations que les valeurs modélisées par ERA5 sur l’ensemble des 104 697 km² du bassin versant.

Tableau 22. Comparatif des débits moyens annuels par période selon qu’ils ont été rapportés par Déry et al. (2016), calculé avec le modèle ERA5 pour tout le bassin versant ou mesurés par la station hydrométrique 04HA001, soit la station la plus en aval de la rivière Albany. Deux périodes sont manquantes pour les données de stations puisque les années de la période n’étaient pas toutes disponibles. À noter qu’une journée était aussi manquante pour la période de 2004 à 2013 (le 25 septembre 2012), la moyenne du débit de la journée précédente et suivante a été appliqué pour représenter le débit de cette journée. À noter qu’il s’agit ici d’années civiles.

Débit annuel moyen de la rivière Albany (km ³ /an)			
Période	Déry	ERA5	Station
1964-1973	33.27	35.07	
1974-1983	28.40	34.21	28.40
1984-1993	30.05	33.73	30.04
1994-2003	32.14	35.97	
2004-2013	34.99	37.71	34.97

3.2.2 Limitations dans l'utilisation des données de stations hydrométriques par Déry et al. (2016)

Outre les limitations dues à la position des stations hydrométriques dans les bassins versants (section 0), les données manquantes dans les observations des stations affectent également les travaux de Déry et al. (2016) puisque ces auteurs devaient estimer ces données. Au contraire, la méthode de la présente étude basée sur le modèle ERA5 produit une série continue de données ayant toutes la même précision.

Les données manquantes affectent a fortiori les premières années de l'étude de Déry et al. (2016) qui se base essentiellement sur les valeurs de débits récoltés aux stations hydrométriques.

Pour pallier au problème des données manquantes, si les stations à proximité de l'embouchure des rivières ne sont pas disponibles certaines années, Déry et al. (2016) utilisent une station plus en amont, dont le débit est ensuite ajusté pour tenir compte de la différence de l'aire de drainage. Si les données de stations plus en amont sont aussi manquantes, une climatologie journalière du débit calculée à partir de toutes les données disponibles est utilisée. Cela affecte également la variabilité du ruissellement en faisant diminuer l'écart type.

3.3 LE CYCLE DE L'EAU DOUCE DANS LA BAIE JAMES

Le cycle de l'eau douce est riche et complexe et fait intervenir de multiple processus comme en témoigne la Figure 1. Certains de ces processus ont été abordés ici. La présente étude s'est intéressée aux précipitations, à l'évaporation et surtout au ruissellement annuel dans l'ensemble du bassin versant de la baie James et les secteurs 0 à 6. Toutefois, deux sujets demeurent manquants dans la compréhension du cycle de l'eau douce de la Baie : l'eau souterraine et les apports d'eau saumâtres de la baie d'Hudson.

3.3.1 L'eau souterraine

L'écoulement de l'eau souterraine est difficile à quantifier et nécessiterait des connaissances approfondies de la topographie, de la géologie et de l'hydrogéologie de la région. La compréhension de cet écoulement dans les bassins versants de la baie James dépasse le cadre de cette recherche. Néanmoins deux points méritent d'être relevés ici.

L'eau souterraine n'est pas assujettie aux déviations de rivières et il est probable qu'un écoulement souterrain existe sous et à côté des barrages servant à la déviation. Cet écoulement peut d'ailleurs être favorisé par le lac de barrage, qui contribue à la recharge de la nappe phréatique.

La plupart des estimations estime que l'eau souterraine représente entre 6 et 10 % du débit des rivières (Bobba et al., 2012) Cet apport en eau douce vers la mer n'est pas mesuré par les stations hydrométriques et il est souvent ignoré. La modélisation par ERA5 permet toutefois d'inclure ces apports dans le ruissellement global annuel. Il est cela dit très difficile d'en évaluer la contribution précise. À noter que l'eau souterraine ne le demeure que sur une partie de son trajet vers l'exutoire.

3.3.2 Apport d'eau saumâtre de l'ouest de la baie d'Hudson et des rivières Nelson et Severn et circulation d'eau de surface de la baie James

Selon la modélisation de Prinsenbergh (1982), la zone influencée par l'apport en eau douce de la Grande Rivière a augmenté suite aux dérivations de rivières, surtout en hiver (Figure 5), tandis que celle à l'embouchure de la rivière Eastmain s'est fortement réduite (Figure 6). Prinsenbergh (1980) prédisait une réduction de 79 % du débit naturel de la rivière Eastmain. Or, on observe plutôt une réduction de 90 % (Figure 23). Le débit actuel serait donc plus de deux fois inférieur à celui de la prédiction de Prinsenbergh (1980).

Par ailleurs, les eaux de la baie d'Hudson qui pénètrent à l'ouest de la baie James comportent déjà une salinité réduite par l'apport des rivières Nelson (principalement), Severn et Winisk. En effet, les panaches de ces rivières ne se mélangent pas avec l'ensemble de la baie d'Hudson, mais l'eau saumâtre s'écoule préférentiellement le long de la côte jusqu'à la baie James (Figure 5).

Bien que la rivière Nelson soit relativement éloignée de la baie James (environ 700 km en suivant le long de la rive sud de la baie d'Hudson de l'embouchure de la rivière Nelson jusqu'à l'embouchure de la baie James), son apport d'eau douce est important étant donné le gigantesque bassin versant dont elle dispose. En incluant depuis 1977 la diversion d'une grande proportion de la rivière Churchill (75% de son débit aurait été dévié vers la rivière Nelson), celui-ci représente une aire de 1 125 000 km² (Déry et al., 2016), soit plus de l'aire totale de toute notre zone d'étude (932 310 km²). La station hydrométrique 05UF007 près de l'embouchure de la rivière Nelson fournit des données excellentes (sans flags de qualité) en continu sur l'ensemble de sa période de production de 1987 à 2020, soit pour les années hydrologiques de 1988 à 2020 (Figure 48). Selon les données de cette station, la rivière Nelson aurait un débit annuel moyen de 112 km³. Sur cette période, le débit a augmenté en moyenne de 1.68 km³/an² ($R^2 = 0.412$, $p < 0.01$), soit une augmentation de plus de 60% de 1988 à 2020.

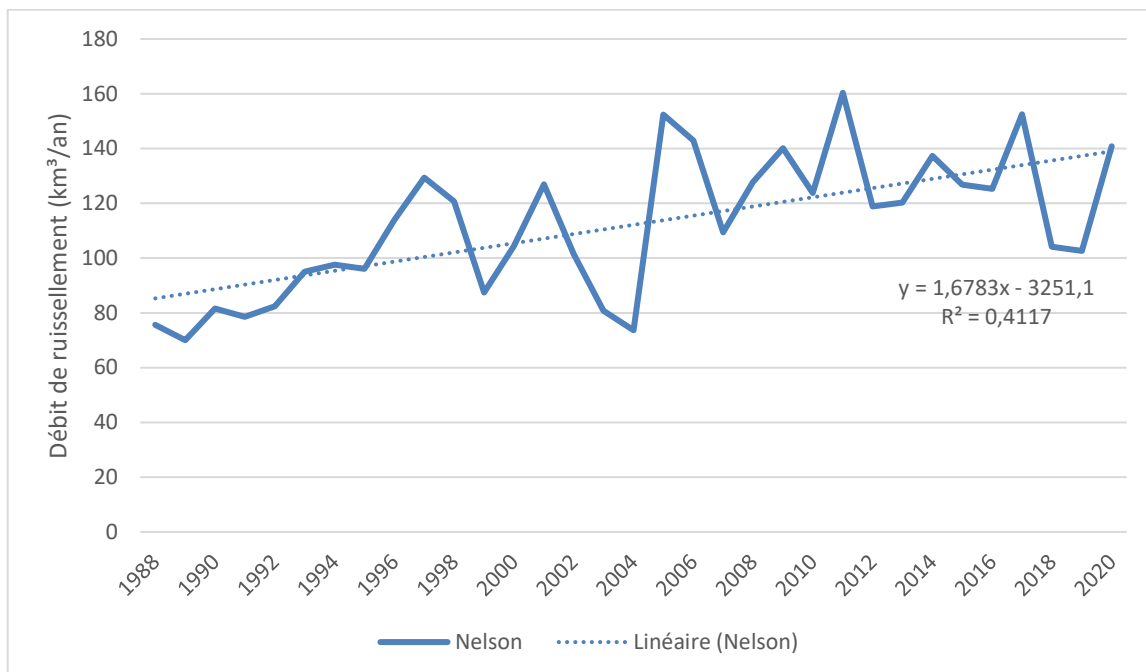


Figure 48. Débit annuel (année hydrologique) mesuré à la station 05UF007 située à proximité de l'embouchure de la rivière Nelson. Il faut noter que cette station ne contenait aucun flag et qu'une donnée manquante (19 janvier 2010) a été estimée en calculant la moyenne du jour précédent et du jour suivant (4040 m³/s).

Les débits annuels mesurés par la station 04CC001 située près de l'embouchure de la rivière Severn (Figure 49) sont de moindre qualité que celles de la rivière Nelson avec quelques années manquantes, moins d'années d'échantillonnage et de nombreux flags (4635 journées flaggées sur un total de 7305 de la période d'échantillonnage utilisée en excluant les années indisponibles). On y constate toutefois une diminution significative de -0.3314 km³/an² ($R^2 = 0.230$, $p < 0.05$, $n = 20$). Enfin, la rivière Winisk, qui est représentée dans le secteur 6 de la présente étude, n'a pas eu d'augmentation significative de son débit (section 2.2.2.7). Sur la série temporelle de 1951 à 2020 et à partir des données de ruissellement extraites en utilisant le modèle ERA5, le débit augmenterait de 0.0102 km³/an² sur la rivière Winisk spécifiquement ($R^2 = 0.001$, $p > 0.10$).

En résumé, le débit de la rivière Nelson a augmenté de 1.68 km³/an² (1988-2020), celui de la rivière Severn a diminué de -0.33 km³/an² (1971-1994) (voir Figure 49) et celui de la

rivière Winisk n'a pas changé significativement avec une hausse observée de $0.0102 \text{ km}^3/\text{an}^2$ (1951-2020).

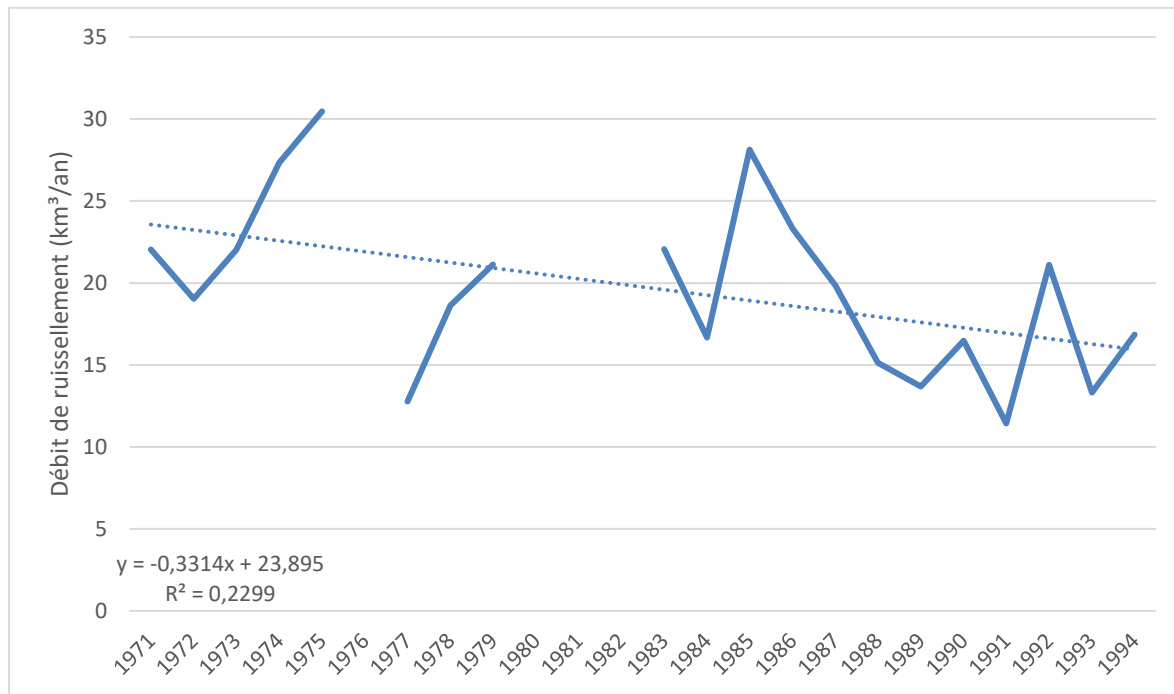


Figure 49. Débit de ruissellement annuel mesuré à la station 04CC001 située à proximité de l'embouchure de la rivière Severn.

Pour la période de 1964 à 2013, Déry et al. (2016) observaient des hausses du débit de ruissellement des rivières Nelson et Severn respectivement de $0.3740 \text{ km}^3/\text{an}^2$ et de $0.0004 \text{ km}^3/\text{an}^2$ tandis qu'ils observaient plutôt une baisse de $0.0464 \text{ km}^3/\text{an}^2$ du débit de la rivière Winisk. Il est important de mentionner que la hausse du débit de la rivière Nelson est contrebalancée par une diminution du débit de la rivière Churchill. Celle-ci, sur la même période, voit son débit de ruissellement diminuer de $0.1863 \text{ km}^3/\text{an}^2$.

L'augmentation nette de l'apport en eau douce vers le sud-ouest de la baie d'Hudson a aussi pu diminuer la salinité de l'eau pénétrant depuis la baie d'Hudson dans la baie James, bien qu'il soit difficile d'estimer quelle fraction de l'eau de ces trois rivières atteint la baie James. À titre de comparaison, sur la période de 1964 à 2013, on observe une hausse du débit de ruissellement de $0.0003 \text{ km}^3/\text{an}^2$ ($R^2 = 0.0056$, $p > 0.10$) (scénario naturel excluant la

dérivation de la rivière Caniapiscou) et $0.0004 \text{ km}^3/\text{an}^2$ ($R^2 = 0.0116$, $p > 0.10$) (scénario réel). Il est donc aisé de constater que les variations des débits des rivières à l'ouest de la baie James ont le potentiel d'influer sur l'apport d'eau douce de la baie James. Il serait intéressant de se pencher spécifiquement sur la dynamique des apports d'eau saumâtre de la baie d'Hudson dans la baie James dans des travaux ultérieurs.

3.4 IMPACT DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LA BAIE JAMES ET CONTRIBUTION DE LA PRESENTE RECHERCHE

3.4.1 Ruissellement, précipitations et évaporation dans le contexte des changements climatiques

Notre étude rapporte une hausse réelle (incluant les dérivations) des débits annuels de ruissellement en volume de 18.4 % et en hauteur d'eau de 9.5 % pour l'ensemble de la baie James pour la période de 1951 à 2020 (année hydrologique). Pour les secteurs 0 à 6, les variations en volume et en hauteur d'eau diffèrent puisque la hausse en hauteur d'eau est modérée par le fait que le bassin versant des secteurs 0 à 6 est passé d'une superficie de $893\,526 \text{ km}^2$ à $932\,310 \text{ km}^2$ et a ainsi gagné 4.3 % en superficie durant cette période grâce à l'apport de la partie amont du bassin de la rivière Caniapiscou. Pour l'ensemble de la baie James, la superficie totale du bassin versant est passée de $762\,708 \text{ km}^2$ à $803\,214 \text{ km}^2$ pour un gain de 5.3 % avec les apports des sections amonts des rivières Caniapiscou et Grande rivière à la Baleine. Force est de constater que les résultats diffèrent fortement par rapport à la petite augmentation de la superficie totale des bassins versants. Cela peut notamment s'expliquer par le fait que les secteurs dérivés sont soumis à de forts débits de précipitation et ruissellement et que la pente de régression linéaire est très fortement influencée par l'impact des dérivations de rivières pour le scénario réel en volume tandis que l'impact est modéré lorsqu'on mesure les débits en hauteur d'eau. Les précipitations ont quant à elles augmentées de 15.6 % en volume et 7.0 % en hauteur d'eau. L'évaporation a, pour sa part, augmenté de 13.1 % en volume et 4.7 % en hauteur d'eau. Si les bassins versants n'avaient subi aucune dérivation ni remplissage de réservoir durant cette période, les hausses pour le ruissellement, les précipitations et l'évaporation aurait été de 5.5 %, 5.9 % et 6.2 %

respectivement. L'exercice a été fait pour les sept secteurs d'étude, la baie James et l'ensemble des sept secteurs pour le ruissellement et la baie James et l'ensemble des sept secteurs pour les précipitations et l'évaporation pour les périodes de 1951 à 2020 et 1976 à 2020 (Voir les Tableaux 23 et 24).

Tableau 23. Variations du ruissellement sans et avec dérivations et de la hauteur d'eau pour les différents secteurs de la baie James entre 1951-2020 et 1976-2020. La pente est obtenue en utilisant la régression linéaire et le pourcentage de variation (Δ) est calculé entre le début et la fin de chaque période par rapport au débit moyen. Les pentes mises en gras sont significatives à $p=0.05$ selon le test de Mann-Kendall (voir la section 2.2.5).

	1951-2020			1976-2020		
Débits de ruissellement sans les dérivations						
Zone	Moyenne	Pente	Δ	Moyenne	Pente	Δ
	(km ³ /an)	(km ³ /an ²)	(%/70 ans)	(km ³ /an)	(km ³ /an ²)	(%/45 ans)
Secteur 0	38.12	-0.08	-13.96	37.18	-0.11	-12.01
Secteur 1	22.94	-0.02	-4.94	22.31	0.08	17.34
Secteur 2	68.47	-0.0003	-0.03	67.59	0.21	15.37
Secteur 3	111.50	0.18	12.21	113.33	0.38	16.32
Secteur 4	104.88	0.14	10.02	106.62	0.27	12.07
Secteur 5	28.97	0.03	6.49	28.61	0.12	20.15
Secteur 6	25.13	0.004	1.15	24.70	0.08	14.69
BV-Baie James	351.94	0.27	5.52	353.34	0.87	11.80
Secteurs 0 à 6	400.01	0.26	4.62	400.34	1.03	12.28
Débits de ruissellement avec les dérivations						
Secteur 0	38.12	-0.08	-13.96	37.18	-0.11	-12.01
Secteur 1	22.34	-0.04	-11.96	21.37	0.06	13.08
Secteur 2	98.16	1.36	188.83	113.77	1.92	122.60
Secteur 3	94.19	-0.57	-35.06	86.40	-0.47	-21.71
Secteur 4	104.88	0.14	10.02	106.62	0.27	12.07
Secteur 5	28.97	0.03	6.49	28.61	0.12	20.15
Secteur 6	25.13	0.004	1.15	24.70	0.08	14.69
BV-Baie James	364.31	0.88	18.41	372.58	1.73	23.40
Secteurs 0 à 6	411.78	0.84	15.40	418.65	1.87	22.32
Débits avec dérivations rapportés en hauteur d'eau						
	(mm/an)	(mm/an ²)	(%/70 ans)	(mm/an)	(mm/an ²)	(%/45 ans)
Secteur 0	527.7	-1.1	-13.96	514.7	-1.5	-12.01
Secteur 1	499.1	-0.5	-6.60	483.6	1.6	16.17
Secteur 2	539.7	1.1	15.03	537.9	4.7	48.70
Secteur 3	581.9	0.9	12.11	591.1	2.0	16.80
Secteur 4	377.1	0.5	10.02	383.4	1.0	12.06
Secteur 5	315.2	0.3	6.49	311.3	1.3	20.16
Secteur 6	295.2	0.0	1.14	290.1	0.9	14.69
BV-Baie James	463.7	0.6	9.52	466.8	1.8	19.20
Secteurs 0 à 6	449.8	0.5	8.23	451.4	1.7	18.87

Tableau 24. Variations des précipitations et de l'évaporations sans et avec dérivations pour les différents secteurs de la baie James entre 1951-2020 et 1976-2020. La pente est calculée par régression linéaire et le pourcentage de variation est calculé entre le début et la fin de chaque période par rapport au débit moyen. Les pentes mises en gras sont significatives à $p=0.05$ selon le test de Mann-Kendall (voir la section 2.2.5).

	1951-2020			1976-2020		
Débits des précipitations sans les dérivations						
Zone	Moyenne	Pente	Δ	Moyenne	Pente	Δ
	(km ³ /an)	(km ³ /an ²)	(%/70 ans)	(km ³ /an)	(km ³ /an ²)	(%/45 ans)
BV-Baie James	677.03	0.55	5.85	681.14	1.54	10,72
Secteurs 0 à 6	777.22	0.59	5.43	781.02	1.75	10,65
Débits des précipitations avec les dérivations						
BV-Baie James	700.00	1.45	15.61	716.87	2.28	15.41
Secteurs 0 à 6	799.26	1.46	13.55	815.31	2.46	14.57
Débits de l'évaporation sans les dérivations						
BV-Baie James	-325.09	-0.28	6.19	-327.80	-0.67	9.57
Secteurs 0 à 6	-377.21	-0.33	6.29	-380.67	-0.73	8.97
Débits de l'évaporation avec les dérivations						
BV-Baie James	-333.12	-0.59	13,13	-340.29	-0.90	12.62
Secteurs 0 à 6	-384.92	-0.62	12,03	-392.66	-0.95	11.49
Débits des précipitations avec dérivations rapportés en hauteur d'eau						
	(mm/an)	(mm/an ²)	(%/70 ans)	(mm/an)	(mm/an ²)	(%/45 ans)
BV-Baie James	891.05	0.86	7.01	898.32	2.16	11.44
Secteurs 0 à 6	873.12	0.79	6.56	879.20	2.10	11.34
Débits de l'évaporation avec dérivations rapportés en hauteur d'eau						
BV-Baie James	-424.10	-0.28	4.73	-426.40	-0.80	8.79
Secteurs 0 à 6	-420.50	-0.30	5.16	-423.40	-0.76	8.36

3.4.2 Prévisions selon un nouveau scénario

Il est difficile d'écarter l'effet des dérivations de bassin versant et remplissage de réservoirs. Or, ces dérivations faussent les prédictions pour le futur puisque les pentes de régression linéaire sont grandement affectées par ces interventions humaines, qui ont eu lieu entre 1979 et 2009, mais qui ne se répéteront pas dans le futur. Il a donc été convenu d'utiliser un scénario où l'on considère les bassins versants dans leur situation actuelle (avec dérivation) et où l'on assume que ces dérivations ont toujours été. On assume du même coup

que les remplissages de réservoir n'ont jamais eu lieu. Ainsi, on écarte l'impact des dérivations et remplissage tout en conservant le profil actuel de la région. Les deux périodes de 1951 à 2020, soit l'ensemble de la temporalité de cette étude, et celle de 1976 à 2020 ont été utilisées pour cet effort. Les Figures 50 et 51 présentent les prévisions jusqu'en 2050 depuis respectivement 1951 et 1976. Ce modèle prédit des pentes de précipitations, évaporation et ruissellement de 0.5608, -0.3066 et 0.2542 km³/an² avec des R² de 0.051 (p<0.10), 0.164 (p<0.01) et 0.011 (p>0.10) respectivement pour toute la période 1951 à 2020, ces pentes deviennent plus abruptes et statistiquement plus significative avec des valeurs de 1.6122, -0.6858 et 0.9263 km³/an² pour des R² de 0.210 (p<0.01), 0.352 (p<0.01) et 0.071 (p<0.10) respectivement pour 1976 à 2020. La variation de la pente des précipitations (1951-2020 et 1976-2020) souligne la difficulté à prédire l'évolution future des précipitations.

Selon Vincent et al. (2015), la hausse moyenne des précipitations totales pour le Canada est de 19 % [15% - 22 %] durant la période de 1948 à 2012. Les précipitations ont augmenté principalement dans le nord au-delà du 60° parallèle (Figure 52), mais les valeurs absolues sont encore largement supérieures dans le sud. Par ailleurs, Zhang et al. (2019) rapporte une hausse annuelle moyenne des précipitations entre 1948 et 2012 pour l'Ontario et le Québec de 9.7 et 10.5 %. La hausse est plus marquée à l'ouest et au sud de l'Ontario et au nord et à l'est du Québec.

On constate que le bassin versant de la baie James est relativement épargné par ces changements dans son ensemble si ce n'est une hausse modérée à l'extrême ouest, une hausse modérée à l'extrême est et une diminution modérée dans une petite portion au sud-ouest (Figure 52). En utilisant la pente de la régression linéaire sur la période de 1951 à 2020 (sans dérivation), on obtient des précipitations de 697.54 km³/an en 1948 et 733.43 km³/an en 2012 sur l'ensemble de la baie James, correspondant à une hausse pour la Baie de 5.1 %. Cela semble concorder avec les observations de Vincent et al. (2015) et Zhang et al. (2019).

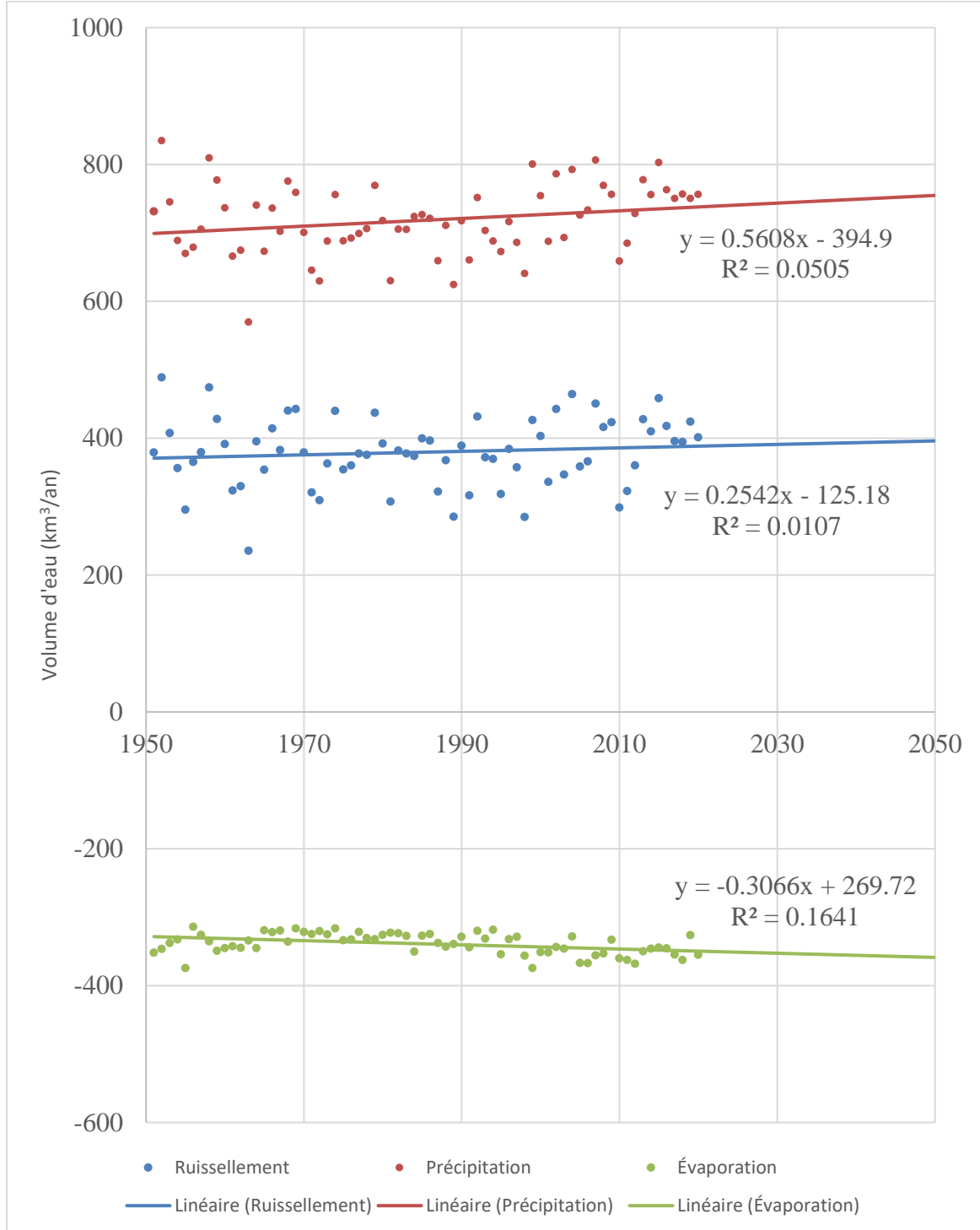


Figure 50. Modèle de prévision linéaire des précipitations, de l'évaporation et du ruissellement basé sur la période de 1951 à 2020 en assumant les dérivations actuelles pour toute la période et aucun remplissage de réservoir.

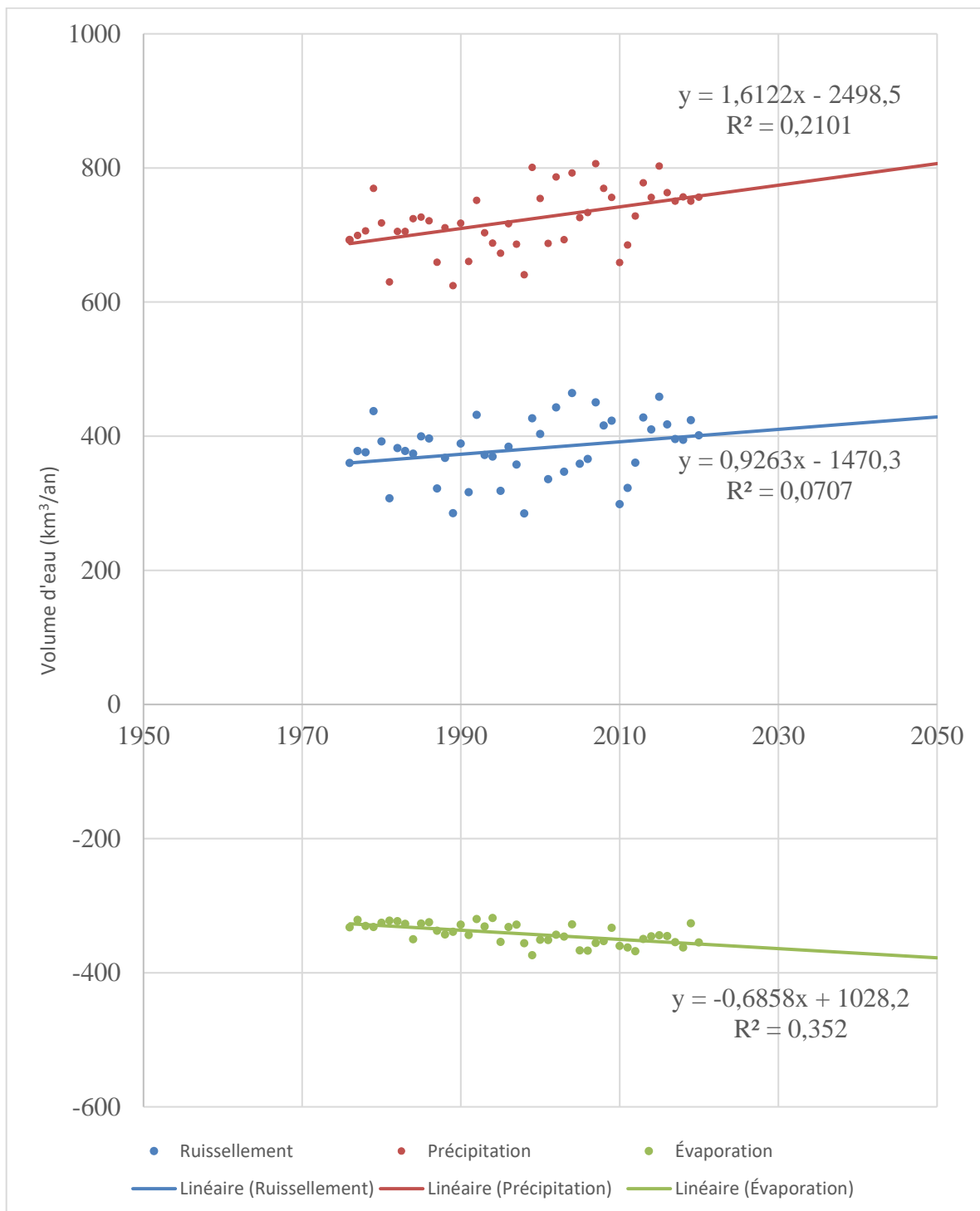


Figure 51. Modèle de prévision linéaire des précipitations, de l'évaporation et du ruissellement basé sur la période de 1976 à 2020 en assumant les dérivations actuelles pour toute la période et aucun remplissage de réservoir.

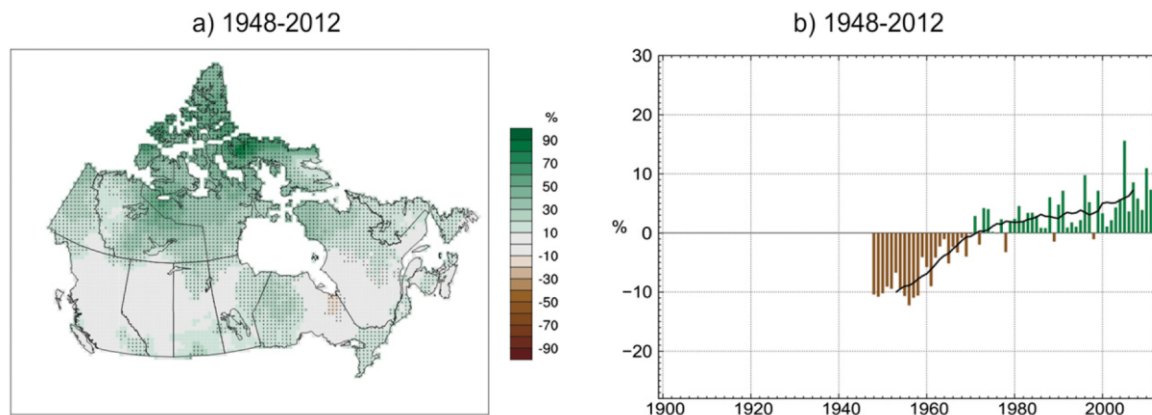


Figure 52. a) Tendence annuelle des précipitations totales de 1948 à 2012 [$\% (65 \text{ ans})^{-1}$]. Les zones où les tendances sont significatives à 0.05 sont marqués par des points. b) Anomalies de précipitations annuelles pour le Canada de 1948 à 2012. La ligne noire est une moyenne mobile de 11 années, tiré de Vincent et al. (2015).

Il est difficile de prédire l'état des précipitations futures puisqu'une myriade de variables doivent être considérées. On ne sait d'ailleurs pas quel sera le forçage radiatif causé par l'homme dans le futur, car cela dépendra de la quantité de gaz à effet de serre qui seront émis.

Zhang et al. (2019) utilisent les scénarios de précipitation selon le scénario plutôt optimiste RCP2.6 et le scénario plus réaliste RCP8.5 (Figure 53). Les précipitations annuelles moyennes pour la période de 2031 à 2050 devraient être en hausse de 5.5 %, 5.5% et 7.1 % pour le Canada, l'Ontario et le Québec par rapport au niveau de 1986 à 2005 selon le modèle RCP2.6 et 7.3 %, 6.6 % et 9.4 % selon le modèle RCP8.5. De nouveau, les hausses les plus importantes se produiront dans le grand nord canadien et les hausses seront modérées dans le bassin versant de la baie James (Figure 53).

Chassé et al. (2013) utilisent six modèles pour évaluer les moyennes des précipitations, de l'évaporation et des précipitations nettes (précipitation – évaporation) futures par rapport aux valeurs pour la période de 1986 à 2005 sur l'ensemble du bassin versant de la baie d'Hudson (incluant la baie James) selon les scénarios RCP4.5 et RCP8.5. Pour la période de 2026 à 2045, il y aurait une hausse des précipitations, de l'évaporation et des précipitations

nettes de respectivement 5.9 %, 6.6 % et 4.9 % (RCP4.5) et de 6.9 %, 7.4 % et 6.1 % (RCP8.5).

Pour le bassin versant de la baie James, notre étude rapporte une moyenne de précipitation de 709.62 km³/an (en excluant les remplissages de réservoir et en considérant que les dérivations ont toujours été présentes) pour la période de 1986 à 2005. En utilisant la régression linéaire basée sur la période de 1951 à 2020, on extrapole un débit moyen de précipitation de 749.41 km³/an pour la période de 2031 à 2050. Ce qui représente une hausse de 5.6 %. En utilisant plutôt la régression linéaire basée sur la période de 1976 à 2020, on obtient un débit moyen de précipitation de 791.19 km³/an entre 2031 et 2050. Ce qui représente une hausse de 11.5 % par rapport à la période de 1986 à 2005. La hausse prédite par la pente de régression linéaire de 1976 à 2020 semble plutôt élevée lorsqu'on la compare avec la carte de Zhang et al. (2019) (Figure 53). À noter que celle-ci manque malheureusement de précision pour notre région d'étude. La régression linéaire basée sur la période de 1951 à 2020 semble cela dit mieux correspondre au changement prédit par Zhang et al. (2019) et Chassé et al. (2013).

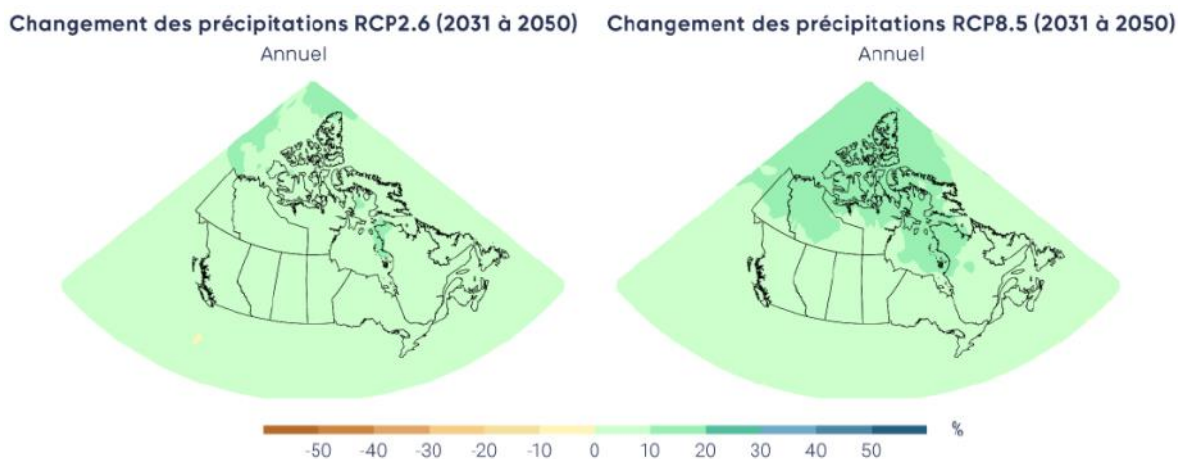


Figure 53. Prévission des changements de précipitations annuelles par rapport au niveau de 1986 à 2005 selon les scénarios RCP2.6 (gauche) et RCP8.5 (droite) pour la période de 2031 à 2050, tiré de Zhang et al. (2019).

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'objectif de cette étude est d'améliorer les connaissances de la variabilité spatio-temporelle des apports d'eau douce à la baie James et à ses environs immédiats dans la baie d'Hudson entre les rivières Winisk et Grande rivière de la Baleine sur la période de 1951 à 2020 (années hydrologiques). La comparaison des débits modélisés à partir des données ERA5 avec les observations des stations hydrométriques a confirmé la validité des débits modélisés après la multiplication avec un coefficient de calibration de 1.06. La méthode de modélisation des débits annuels avec les données d'ERA5 est donc validée malgré les limitations d'ERA5, dont notamment sa résolution de $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ et la surestimation de certaines années à très faible débit comme constaté pour la rivière Ekwan.

Dans le cadre du développement du potentiel hydro-électrique de la Grande Rivière, plusieurs détournements de rivières ont eu lieu en plus de remplissage de réservoirs pour alimenter plusieurs centrales hydro-électriques. Les rivières Eastmain et Rupert ont été considérablement affectés par ces dérivations, avec des diminutions respectives de 90 % et de 57 % de leurs débits annuels. La Grande rivière de la Baleine a aussi subi l'effet d'une dérivation partielle de son bassin versant, mais la diminution du débit est moindre (5 %). Le bassin versant de la baie James et l'ensemble du secteur d'étude ont vu leur débit de ruissellement annuel global majoré par la dérivation d'une grande partie du bassin versant de la rivière Caniapiscou, dont l'exutoire naturel se trouve dans la baie d'Ungava.

Afin de différencier l'impact des changements climatiques et du développement du potentiel hydro-électrique, deux scénarios ont été modélisés, le scénario réel avec les dérivations et les réservoirs et un scénario hypothétique (nommé "naturel") sans dérivations et sans réservoirs. Sur l'ensemble du bassin versant de la baie James, les débits ont augmenté entre 1951 à 2020 pour le scénario naturel de $0.27 \text{ km}^3/\text{an}^2$ (0.079%/an, statistiquement non

significatif) et pour le scénario réel de $0.88 \text{ km}^3/\text{an}^2$ (0.263 \%/an , statistiquement significatif selon un test Mann-Kendall). L'évolution des précipitations nettes annuelles (débit annuel divisé par l'aire du bassin, soit une hauteur d'eau, ce qui permet de tenir compte des changements de l'aire du bassin versant de la baie James) indique une hausse de $0.60 \text{ mm}/\text{an}^2$ (hausse statistiquement non significative).

Toutefois, les précipitations et l'évaporation démontrent des tendances significatives avec des augmentations respectives de $0.55 \text{ km}^3/\text{an}^2$ et $0.28 \text{ km}^3/\text{an}^2$ pour le scénario naturel et de 1.45 et $0.59 \text{ km}^3/\text{an}^2$ pour le scénario réel pour la période de 1951 à 2020. La hausse de l'évaporation compense partiellement la hausse des précipitations totales, ce qui réduit l'augmentation du ruissellement.

Les tendances à moyen terme ne sont toutefois pas monotones durant la période d'étude. Le débit total, l'évaporation et les précipitations ont diminué entre 1951 à 1976 avant d'augmenter rapidement entre 1976 et 2020. Ainsi les débits ont augmenté entre 1976 et 2020 de $0.87 \text{ km}^3/\text{an}^2$ ($p=0.08$) pour le scénario naturel et de $1.73 \text{ km}^3/\text{an}^2$ ($p=0.001$) pour le scénario réel.

La comparaison entre l'est et l'ouest de la baie James montre que le débit annuel de ruissellement est supérieur à l'est bien que l'ouest comporte des bassins versants plus vastes.

En comparant les valeurs de débit de ruissellement annuel trouvé par cette étude à partir des précipitations et de l'évaporation du modèle ERA5 avec les moyennes décennales des débits rapporté par Déry et al. (2016), il a été constaté que ces dernières étaient nettement plus basses pour certaines rivières, et assez proches des données modélisées pour les autres rivières. Toutefois, Déry et al. (2016) considère que le bassin versant de chaque rivière s'arrête à la station hydrométrique la plus en aval, ce qui sous-estime considérablement la taille des bassins versants et les débits lorsque la station hydrométrique est éloignée de l'embouchure.

Le sujet de la présente étude nécessiterait un approfondissement des connaissances sur l'eau souterraine de la région de la baie James en plus de mesurer l'apport d'eau saumâtre

entrant au nord-ouest dans la baie James depuis la baie d'Hudson. Bien que les hausses de débit des rivières Severn et Nelson (affluents de la baie d'Hudson) aient été calculées, il eut fallu comparer les variations de la salinité et du flux de l'eau entrant dans la baie James en provenance de la baie d'Hudson pour avoir une idée de la portion d'eau douce qui pénètre dans la baie James par ce biais.

Évaluer les précipitations futures dans la baie James demeure complexe dans un contexte de changements climatiques, car de multiples variables comme l'impact futur de l'humain demeure inconnu à ce jour. Le modèle de régression linéaire basé sur la période de 1951 à 2020 semble le plus réaliste en comparant avec les travaux de Vincent et al. (2015) et Zhang et al. (2019) pour prédire le climat futur (2031-2050). Ce modèle rapporte que les précipitations ont augmenté de 5.1 % entre 1948 et 2012, et une extrapolation prédit que les précipitations de 2031-2050 devraient être de 5.6 % supérieure à celles de 1986-2005. À noter que la région du bassin versant de la baie James est relativement épargnée par la montée des précipitations prédites pour le nord du Canada.

Il aurait été possible de recalculer les débits obtenus par Déry et al. (2016) afin que ceux-ci ne sous-estiment pas la superficie des bassins versants en multipliant chaque débit de rivière extrait à une station hydrométrique par le ratio de la superficie réelle du bassin versant sur la taille de celle de la station la plus en aval utilisée dans leur étude. Tout porte à croire que les deux études auraient trouvé des résultats plus similaires. Toutefois, le risque aurait alors été de mésuser certaines valeurs de débit de leur étude en faisant une mauvaise interprétation de leur méthode d'obtention.

En définitive, le cycle de l'eau douce de la baie James recèle beaucoup de secrets. Bien qu'il semble désormais possible de pallier au manque de données des stations hydrométriques en utilisant le modèle numérique ERA5, il faudrait également améliorer les connaissances générales de la circulation d'eau saumâtre entre les baies James et d'Hudson en plus de faire des études approfondies sur l'eau souterraine de cette région.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Alfieri, L., Lorini, V., Hirpa, F. A., Harrigan, S., Zsoter, E., Prudhomme, C. & Salamon, P. (2020). A global streamflow reanalysis for 1980-2018. *Journal of Hydrology X*, 6, 1-12. doi:10.1016/j.hydroa.2019.100049
- Andersson, J. C., Arheimer, B., Traoré, F., Gustafsson, D. & Ali, A. (2017). Process refinements improve a hydrological model concept applied to the Niger River basin. *Hydrological Processes*, 31(25), 4540-4554. doi:10.1002/hyp.11376
- Berrisford, P., Dee, D., Poli, P., Brugge, R., Fielding, K., Fuentes, M., Kallberg, P., Kobayashi, S., Uppala, S. & Simmons, A. (2011). ERA report series, 1 The ERA-Interim archive, Version 2.0. *ECMWF*, 1-23.
- Betts, A. K., Chan, D. Z. & Desjardins, R. L. (2019). Near-Surface Biases in ERA5 Over the Canadian Prairies. *Frontiers in Environmental Science*, 7(129), 1-17.
- Betts, A. K., Reid, D. & Crossett, C. (2020). Evaluation of the FLake Model in ERA5 for Lake Champlain. *Frontiers in Environmental Science*, 8, 1-9.
- Blain, C. B. (2013) The Mann-Kendall test : the need to consider the interaction between serial correlation and trend. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 35(4). 393-402.
- Bobba, A. G., Chambers, P. A. & Wrona, F. J. (2012). Submarine groundwater discharge (SGWD): an unseen yet potentially important coastal phenomenon in Canada. *Natural Hazards*, 60, 991-1012. doi:10.1007/s11069-011-9884-7
- Bush, E. & Lemmen, D. S. (2019). *Rapport sur le climat changeant du Canada*. Gouvernement du Canada. 446 p.

- Carrier-Belleau, C., Drolet, D., McKindsey, C. W. & Archambault, P. (2021). Environmental stressors, complex interactions and marine benthic communities' responses. *Scientific Report*, 11(4194). doi:10.1038/s41598-021-83533-1
- Chassé, J., Lambert, N. & Lavoie, D. (2013). Precipitation, Evaporation and Freshwater Flux over Canada from six Global Climate Models. *Can. Tech. Rep. Hydrogr. Ocean Sci.* 287, 1-57.
- Correa, S., Paiva, R., Espinoza, J. & Collischonn, W. (2017). Multi-decadal Hydrological Retrospective: Case study of Amazon floods and droughts. *Journal of Hydrology*, 549, 667-684.
- Dai, A. & Trenberth, K. (2002). Estimates of Freshwater Discharge from Continents: Latitudinal and Seasonal Variations. *Journal of Hydrometeorology*, 3(6), 660-687.
- Déry, S. & Wood, E. (2005). Decreasing river discharge in northern Canada. *Geophysical Research Letters*, 32(10).
- Déry, S., Mlynowski, T., Hernandez-Henriquez, M. & Straneo, F. (2011). Interannual variability and interdecadal trends in Hudson Bay streamflow. *Journal of Marine Systems*, 88(3), 341-351.
- Déry, S., Stadnyk, T., MacDonald, M. & Gauli-Sharma, B. (2016). Recent Trends and Variability in River Discharge Across Northern Canada. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(12), 4801-4818.
- Déry, S., Stadnyk, T., MacDonald, M., Koenig, K. & Guay, C. (2018). Flow Alteration Impacts on Hudson Bay River Discharge. *Hydrological Processes*, 32(24), 3576-3587.
- ECMWF (2016). IFS Documentation - Cy41r2. Operational implementation 8 March 2016. Part IV: Physical Processes. *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*. doi:10.21957/tr5rv27xu

ECMWF (2021). *ERA5: data documentation. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts.* Disponible à :

<https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5%3A+data+documentation> (Consulté le 21 décembre 2021)

ECMWF (2022a). *ERA5 hourly data on single levels from 1950 to 1978 (preliminary version).* Disponible à : <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels-preliminary-back-extension?tab=overview> (Consulté le 18 avril 2022)

ECMWF (2022b). *Parameter database.* Disponible à : <https://apps.ecmwf.int/codes/grib/param-db?> (Consulté le 19 janvier 2022)

El-Sabh, M. I. & Koutitonsky, V. G. (1977). An Oceanographic Study of James Bay before the Completion of the La Grande Hydroelectric Complex. *Arctic Institute of North America*, 169-186. doi:10.14430/arctic2697

Environnement Canada (2015). *Service de données et d'informations hydrométriques.* Environnement Canada. Disponible à : https://publications.gc.ca/collections/collection_2015/ec/En56-251-2015-fra.pdf (Consulté le 20 avril 2022)

Environnement et ressources naturelles Canada (2022). *Niveau d'eau et débit, foire aux questions.* Environnement Canada. Disponible à : https://eau.ec.gc.ca/contactus/faq_f.html (Consulté le 26 mars 2022)

Fatichi, S. (2022). *Mann-Kendall Test. MATLAB Central File Exchange.* Disponible à : https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/25531-mann-kendall-test?s_tid=prof_contriblnk (Consulté le 30 mars 2022)

Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K. & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria : Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377, 80-91.

Hayeur, G. (2001). *Synthèse des connaissances environnementales acquises en milieu nordique de 1970 à 2000*. Hydro-Québec. 110 p. Disponible à : https://www.hydroquebec.com/data/developpement-durable/pdf/pop_06_08.pdf (Consulté le 25 avril 2022)

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horanyi, A., Muñoz-Savater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavatti, G., Bidlot, J., Bonavita, M., De Chiara, G., Dahlgren, P., Dee, D., Diamantakis, M., Dragani, R., Flemming, J., Forbes, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hogan, R., Holm, E., Janiskova, M., Keely, S., Laloyaux, P., Lopez, P., Lupu, C., Radnoti, G., de Rosnay, P., Rozum, I., Freja, V., Villaume, S. & Thépaut, J. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146, 1999-2049.

Hoshiba, Y., Hasumi, H., Itoh, S., Matsumura, Y. & Nakada, S. (2021). Biogeochemical impacts of flooding discharge with high suspended sediment on coastal seas: a modeling study for a microtidal open bay. *Scientific Report*, 11(21322). doi:10.1038/s41598-021-00633-8

Hydro-Québec (2010). Aménagement hydroélectrique Eastmain-1-A-Sarcelle-Rupert. *Hydro-Québec, Bulletin d'information numéro 1*. Disponible à : <http://www.hydroquebec.com/hydroetcompagnie/docs/rupert/iyimtaak-juin-2010.pdf> (Consulté le 3 avril 2022)

Hydro-Québec (2011). Info projet, Eastmain-1-A-Sarcelle-Rupert. *Hydro-Québec, Bulletin n° 1*. Disponible à : http://www.hydroquebec.com/hydroetcompagnie/docs/rupert/bulletin_2011_05.pdf (Consulté le 3 avril 2022)

Hydro-Québec (2012). *Centrales de l'Eastmain-1-A et de la Sarcelle et dérivation Rupert; Bilan des mesures d'atténuation et de mise en valeur; Volume 3 - Waskaganish*. Hydro-

Québec. Disponible à : <http://www.hydroquebec.com/data/hydro/pdf/bilans-2012/waskaganish-fr.pdf> (Consulté le 20 mars 2022)

Hydro-Québec Production (2004). *Centrale de l'Eastmain-1-A et dérivation Rupert. Étude d'impact sur l'environnement*. Volume 2. Chapitres 10 à 12. Hydro-Québec Production.

Ingram, R. G. & Prinsenberg, S. (1998). Coastal oceanography of Hudson Bay and surrounding eastern Canadian Arctic waters, coastal segment. Dans Robinson, A. R. & Brink K. H. (Eds.), *The Sea* (Vol. 11, 835-861). John Wiley and Sons, Inc.

IPCC (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC.

Knoben, W. J., Freer, J. E. & Woods, R. A. (2019). Technical note : Inherent benchmark or not ? Comparing Nash-Sutcliffe and Kling-Gupta efficiency scores. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(10), 4323-4331.

Knoben, W. J., Woods, R. A. & Freer, J. E. (2018). A Quantitative Hydrological Climate Classification Evaluated with Independent Streamflow Data. *Water Resour. Res.*, 54(7), 5088-5109.

Landy, J. C., Ehn, J. K., Babb, D. G., Thériault, N. & Barber, D. G. (2017). Sea ice thickness in the Eastern Canadian Arctic: Hudson Bay. *Remote Sensing of Environment*, 200, 281-294.

Lane, R. A., Coxon, G., Freer, J. E., Wagener, T., Hohnes, P. J., Bloomfield, J. P., Greene, S., Macleod, C. J. & Reaney, S. M. (2019). Benchmarking the predictive capability of hydrological models for river flow and flood peak predictions across over 1000 catchments in Great Britain. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23, 4011-4032.

LeBlond, P., Lazier, J. & Weaver, A. (1996). Can Regulation of Freshwater Runoff in Hudson Bay Affect the Climate of the North Atlantic ? *Arctic*, 49(4), 348-355. doi:10.14430/arctic1210

Lukovich, J. V., Jafarikhasragh, S., Myers, P. G., Ridenour, N. A., de la Guardia, L. C., Hu, X., Grivault, N., Marson, J., Pennelly, Clark., Stroeve, J. C., Sydor, K., Wong, K., Stadnyk, T. A. & Barber, D. B. (2021). Simulated impacts of relative climate change and river discharge regulation on sea ice and oceanographic conditions in the Hudson Bay Complex. *Elementa: Science of Anthropocene*, 9(1), 1-19.

McCuen, R. H., Knight, Z. & Cutter, A. G. (2006). Evaluation of the Nash-Sutcliffe Efficiency Index. *Journal of Hydrologic Engineering*, 11, 597-602.

Meals, D. W., Spooner, J., Dressing, S. A. & Harcum., J. B. (2011). *Statistical analysis for monotonic trends*, Tech Notes 6, United States Environmental Protection Agency, 23 p. Disponible à : <https://www.epa.gov/nps/nonpoint-source-monitoring-technotes> (Consulté le 16 avril 2022)

Mekis, É. & Vincent, L. A. (2011). An Overview of the Second Generation Adjusted Daily Precipitation for Trend Analysis in Canada. *Atmosphere-Ocean*, 49(2), 163-177.

Ministère de l'Environnement. (2019). *Fiche technique barrage Caniapiscau*. Répertoire des barrages, Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, Gouvernement du Québec. Disponible à : https://www.cehq.gouv.qc.ca/barrages/detail.asp?no_mef_lieu=X0003263 (Consulté le 10 novembre 2019)

Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D. & Veith, T. L. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50(3), 885-900.

Nash, J. E. & Sutcliffe, I. V. (1970). River Flow Forecasting Through Conceptual Models Part 1 - A Discussion of Principles. *Journal of Hydrology*, 10, 282-290.

Natural Resources Canada. (2008). *National Hydro Network User Guide Series; Creating a Geometric Network in ArcGIS using NHN Data, Edition 1.0*. Sherbrooke: GeoBase. Centre for Topographic Information, Geomatics Canada, Natural Resources Canada. Disponible à : https://ftp.maps.canada.ca/pub/nrcan_rncan/vector/geobase_nhn_rhn/doc/GeoBase_nhn_en_ArcGIS9x_Geometric_Network.pdf (Consulté le 3 février 2022)

Noone, M. (2006). *Interbasin Water Transfer Projects In North America*. The North Dakota State Water Commission.

Orlova, J. & Branfireun, B. A. (2014). Surface Water and Groundwater Contributions to Streamflow in the James Bay Lowland, Canada. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 46(1), 236-250.

Prinsenbergh, S. J. (1977). Fresh Water Budget of Hudson Bay. Manuscript Report Series No. 5, Fisheries and Environment Canada, *Canada Centre for Inland Waters*. Disponible à : <https://waves-vagues.dfo-mpo.gc.ca/Library/79590.pdf> (Consulté le 7 mars 2022)

Prinsenbergh, S. J. (1980). Man-Made Changes in Freshwater Input Rates of Hudson and James Bays. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 37, 1101-1110.

Prinsenbergh, S. J. (1982). Present and future circulation and salinity in James Bay. *Le Naturaliste Canadien*, 109, 827-841.

Prinsenbergh, S. J. (1984). Freshwater contents and heat budgets of James Bay and Hudson Bay. *Continental Shelf Research*, 3(2), 191-200.

Prinsenbergh, S. J. (1986). Salinity and Temperature Distributions of Hudson Bay and James Bay. *Elsevier Oceanography Series*, 44, 163-186.

Ressources naturelles Canada. (2016). *CanVec*. Ressources naturelles Canada. Disponible à : https://ftp.maps.canada.ca/pub/nrcan_rncan/vector/canvec/doc/CanVec_fr.pdf (Consulté le 13 janvier 2022)

Ritter, A. & Munoz-Carpena, R. (2013). Performance evaluation of hydrological models: Statistical significance for reducing subjectivity in goodness-of-fit assessments. *Journal of Hydrology*, 480, 33-45.

Saucier, F., Senneville, S., Prinsenber, S., Roy, F., Smith, G., Gachon, P., Caya, D. & Laprise, R. (2004). Modelling the sea ice-ocean seasonal cycle in Hudson Bay, Foxe Basin and Hudson Bay, Canada. *Climate Dynamics*, 23, 303-326. doi:10.1007/s00382-004-0445-6

Schetagne, R. & Therrien, J. (2013). *Environmental Monitoring at the La Grande Complex. Evolution of Fish Mercury Levels*. Summary Report 1978-2012. GENIVAR inc. and Hydro-Québec Production. Disponible à : <https://www.hydroquebec.com/data/developpement-durable/pdf/evolution-fish-mercury-levels.pdf> (Consulté le 6 février 2022)

Schönfelder, L. H., Bakken, T. H., Alfredsen, K. & Adera, A. G. (2017). *Application of HYPE in Norway*. SINTEF Energy Research.

Shea, Dennis; National Center for Atmospheric Research Staff (Eds). (2016, mars 01). *The Climate Data Guide: ERA-15*. Disponible à : <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/era-15>

Siqueira, V. A., Paiva, R. C., Fleishmann, A. S., Fan, F. M., Ruhoff, A. L., Pontes, P. R., Paris, A., Calmant, S. & Collischonn, W. (2018). Toward continental hydrologic-hydrodynamic modeling in South America. *Hydrol. Earth Syst. Sciences*, 22(9), 4815-4842. doi:10.5194/hess-22-4815-2018

Société d'énergie de la Baie James (1987). *Le complexe hydroélectrique de la Grande Rivière : réalisation de la première phase*. Société d'énergie de la Baie James.

Société d'énergie de la Baie James (1996). *Le complexe hydroélectrique de la Grande Rivière : réalisation de la deuxième phase*. Société d'énergie de la Baie James.

Stewart, D. B. & Lockhart, W. L. (2005). An Overview of the Hudson Bay Marine Ecosystem. *Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences* 2586. Fisheries and Oceans Canada.

Sutanudjaja, E. H., Van Beek, R., Wanders, N., Wada, Y., Bosmans, J. H., Drost, N., Van Der Ent, R. J., De Graaf, I. E., Hoch, M. J., De Jong, K., Karssenberg, D., Lopez Lopez, P., Pebenteiner, S., Schmitz, O., Straatsma, M. W., Vannamettee, E., Wisser, D. & Bierkens, M. F. (2018). PCR-GLOBWB 2: A 5 arcmin global hydrological and water resources model. *Geosci. Model Dev.*, 11(6), 2429-2453. doi:10.5194/gmd-11-2429-2018

Towner, J., Cloke, H. L., Zsoter, E., Flamig, Z. & Hoch, J. M. (2019). Assessing the performance of global hydrological models for capturing peak river flow in the Amazon Basin. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 23, 3057-3080. doi:10.5194/hess-23-3057-2019

Uppala, S. M., Kallberg, P. W., Simmons, A. J., Andrae, U., Da Costa Bechtold, V., Fiorino, M., Gibson, J. K., Haseler, J., Hernandez, A., Kelly, G. A., Li, X., Onogi, K., Saarinen, S., Sokka, N., Allan, R. P., Andersson, E., Arpe, K., Balmaseda, M. A., Beljaars, A. C., Van de Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Caires, S., Chevallier, F., Hoskins, B. J., Isaksen, L., Janssen, P. A., Jenne, R., McNally, A. P., Mahfouf, J., Morcrette, J., Rayner, N. A., Saunders, R. W., Simon, P., Sterl, A., Trenberth, K. E., Huntch, A., Vasiljevic, D., Viterbo, P. & Woollen, J. (2005). The ERA-40 re-analysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 131(612), 2961-3012. doi:10.1256/qj.04.176

Vincent, L., Zhang, X., Brown, R., Feng, Y., Mekis, E., Milewska, E., Wan, H. & Wang, X. (2015). Observed Trends in Canada's Climate and Influence of Low-Frequency Variability Modes. *Journal of Climate*, 28(11), 4545-4560.

Zar, J. H. (2010). *Biostatistical Analysis* (éd. 5). Pearson Prentice Hall.

Zhang, X., Flato, G., Kirchmeier-Young, M., Vincent, L., Wan, H., Wang, X., Rong, R., Fyfe, J., Li, G. & Kharin, V. V. (2019). Les changements de température et de précipitations

pour le Canada. Dans E. Bush & D. S. Lemmen (Éds), *Rapport sur le climat changeant du Canada*. Gouvernement du Canada, 113-193.

ANNEXE I
SÉRIES TEMPORELLES, COMPARATIFS DU RUISSELLEMENT OBSERVÉ
ET MODÉLISÉ ET ERREURS RELATIVES AUX STATIONS
HYDROMÉTRIQUES

Grande rivière de la Baleine

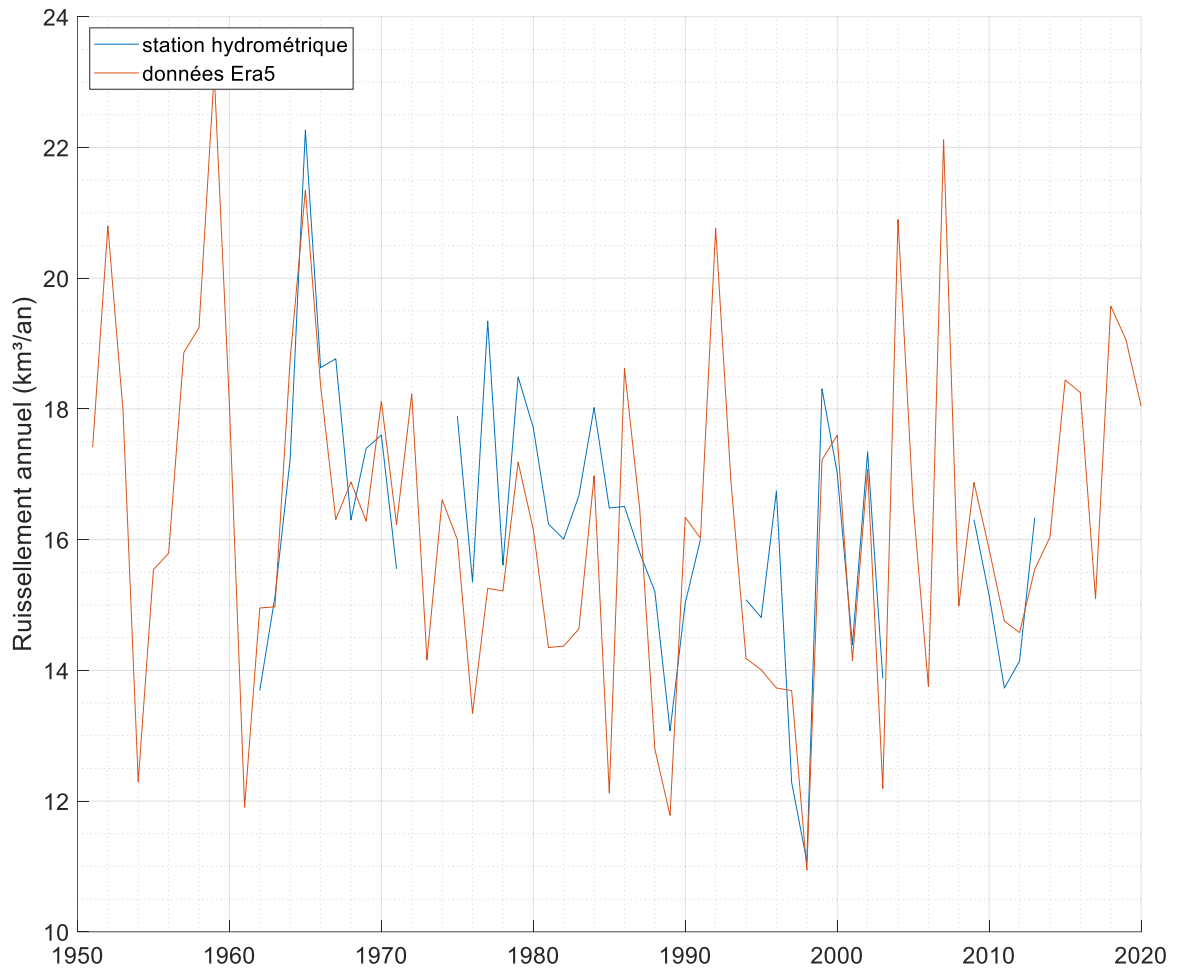


Figure 54. Grande rivière de la Baleine, série temporelle du débit mesuré à la station hydrométrique et débit modélisé par ERA5.

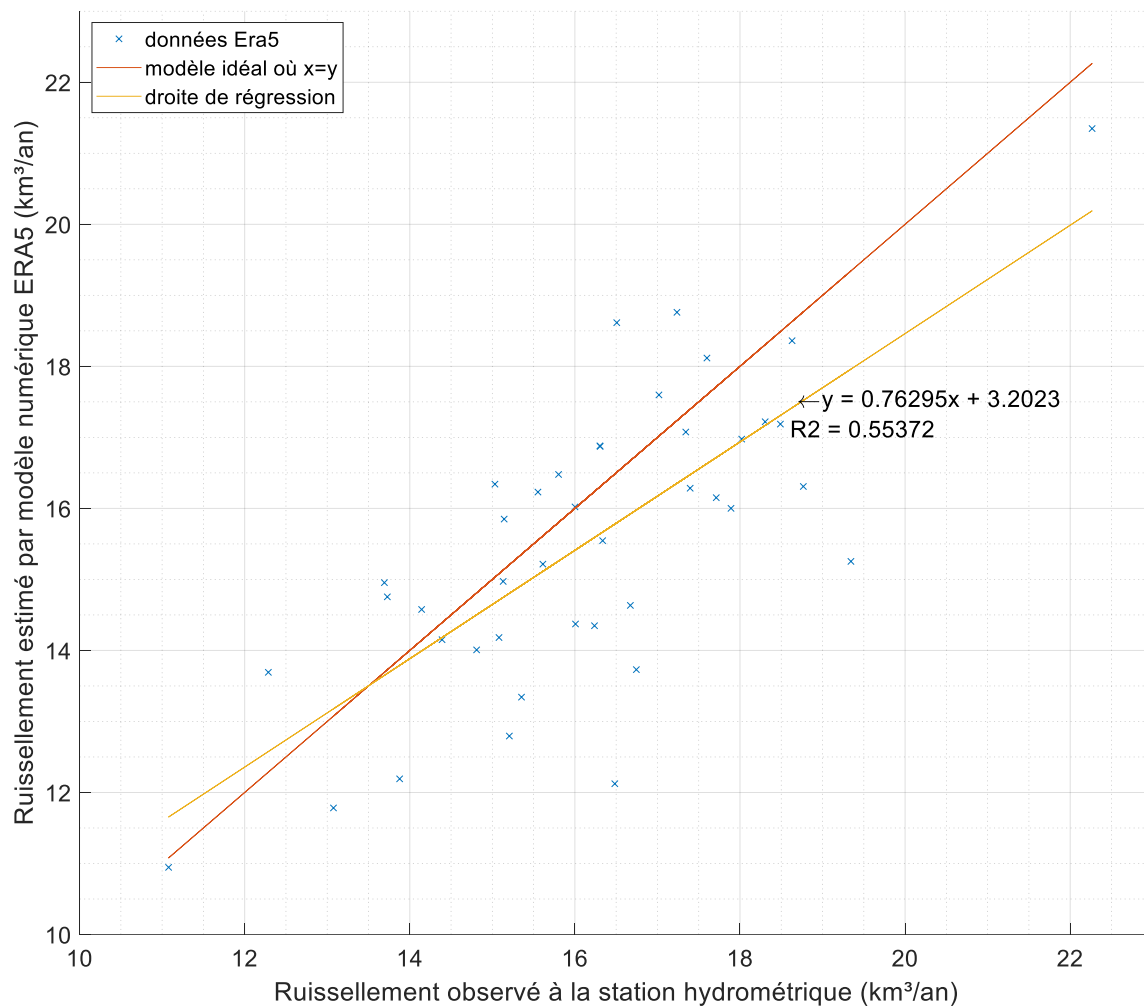


Figure 55. Grande rivière de la Baleine, débit annuel modélisé par ERA5 en fonction du débit observé à la station hydrométrique.

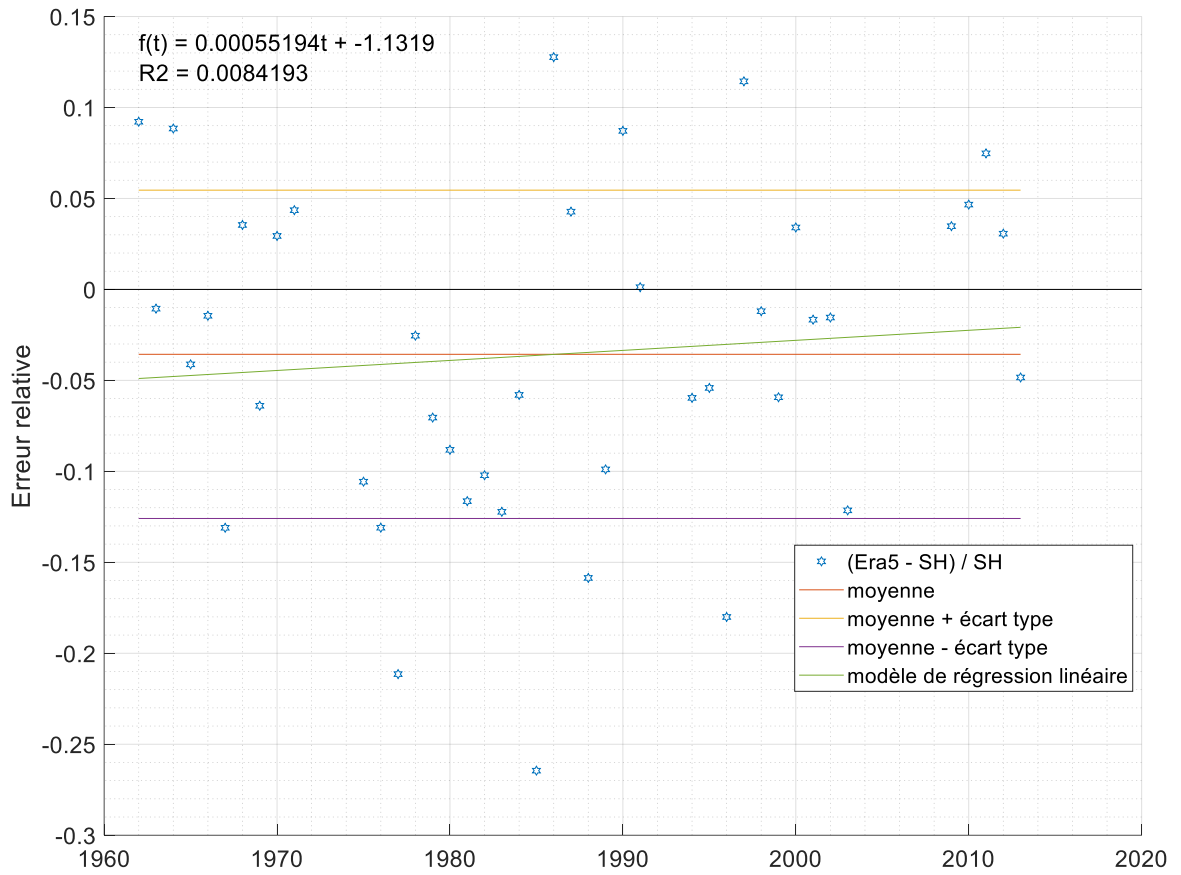


Figure 56. Grande rivière de la Baleine, erreurs relatives sur les données ERA5 par rapport à la station hydrométrique.

Pontax

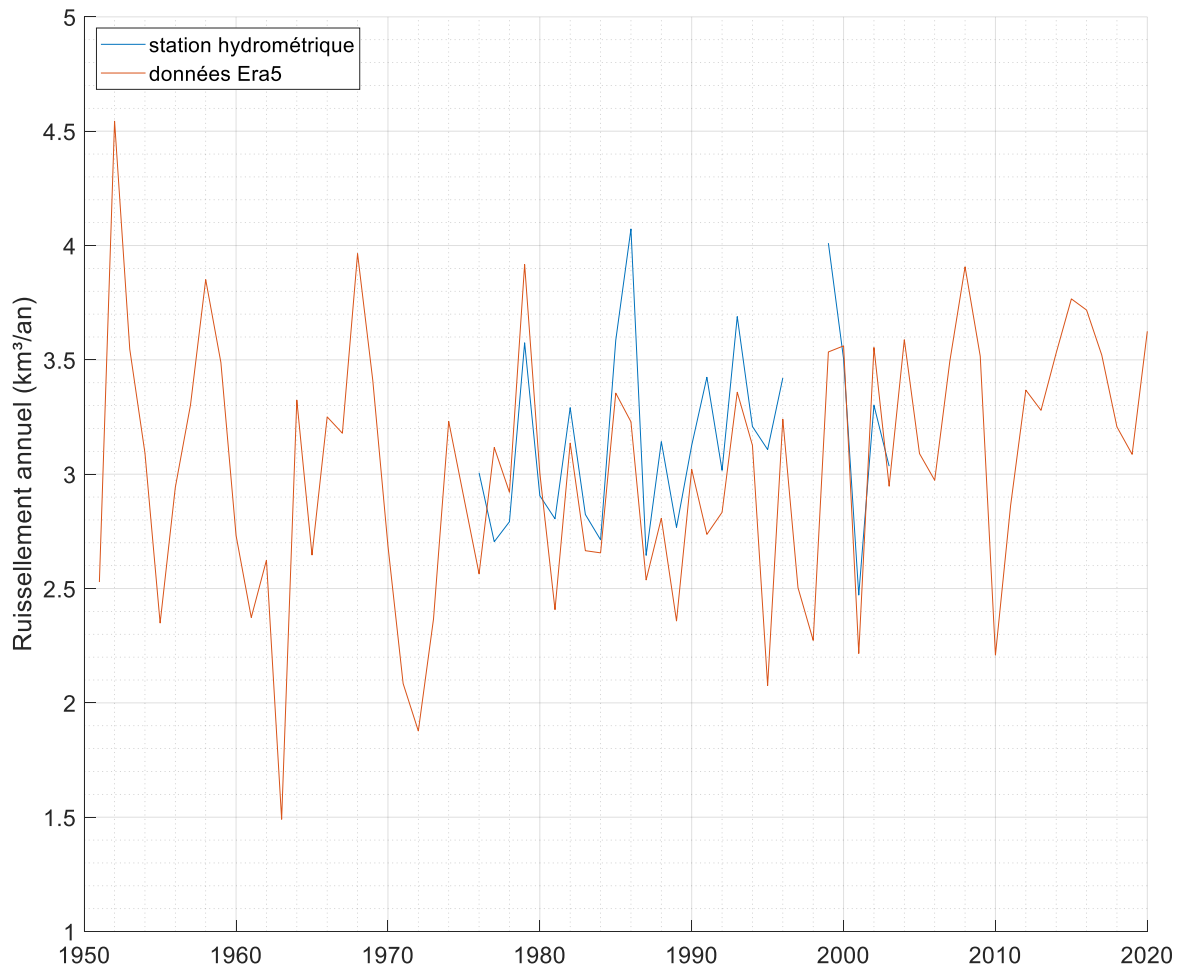


Figure 57. Rivière Pontax, série temporelle du débit mesuré à la station hydrométrique et débit modélisé par ERA5.

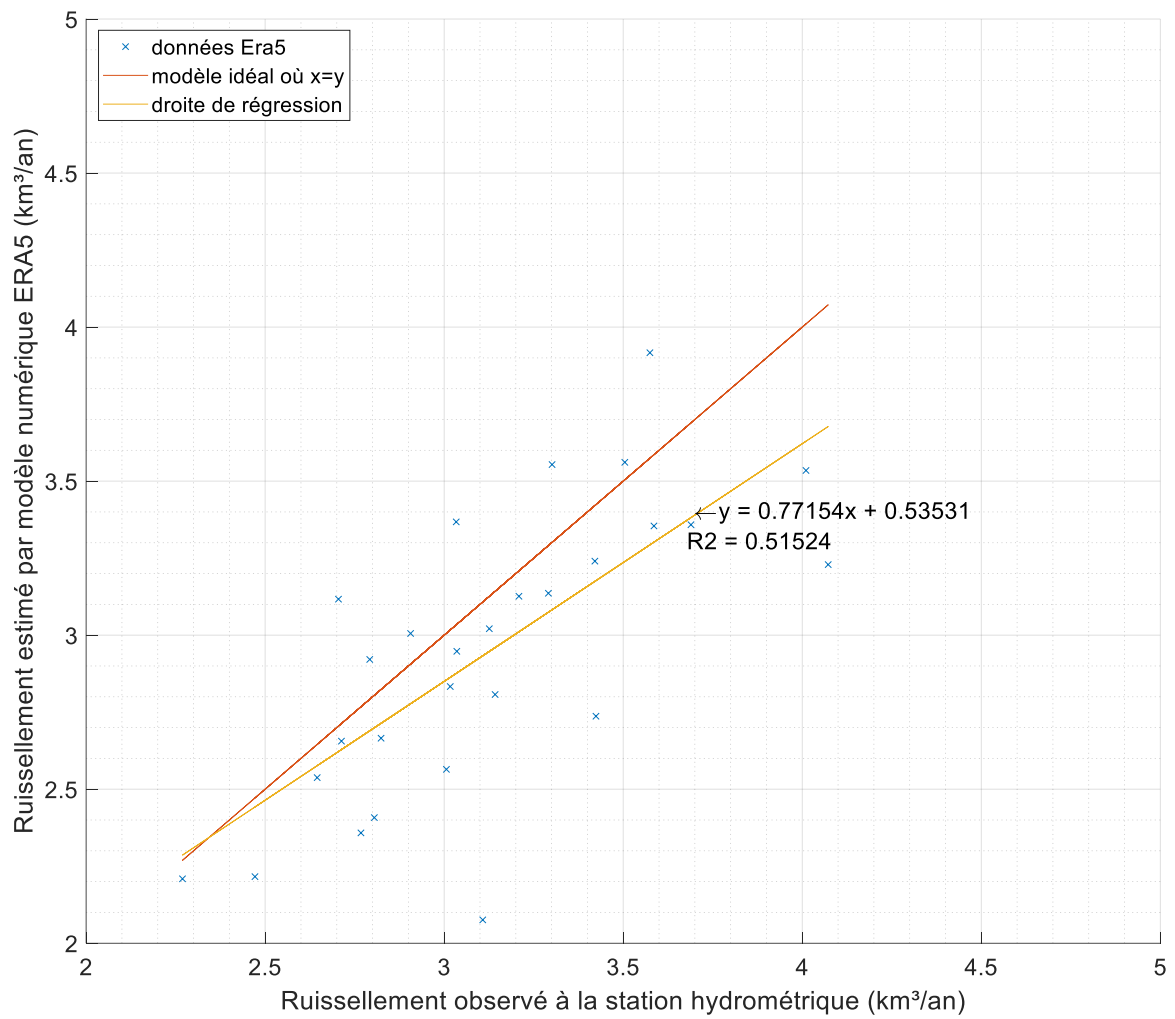


Figure 58. Rivière Pontax, débit annuel modélisé par ERA5 en fonction du débit observé à la station hydrométrique.

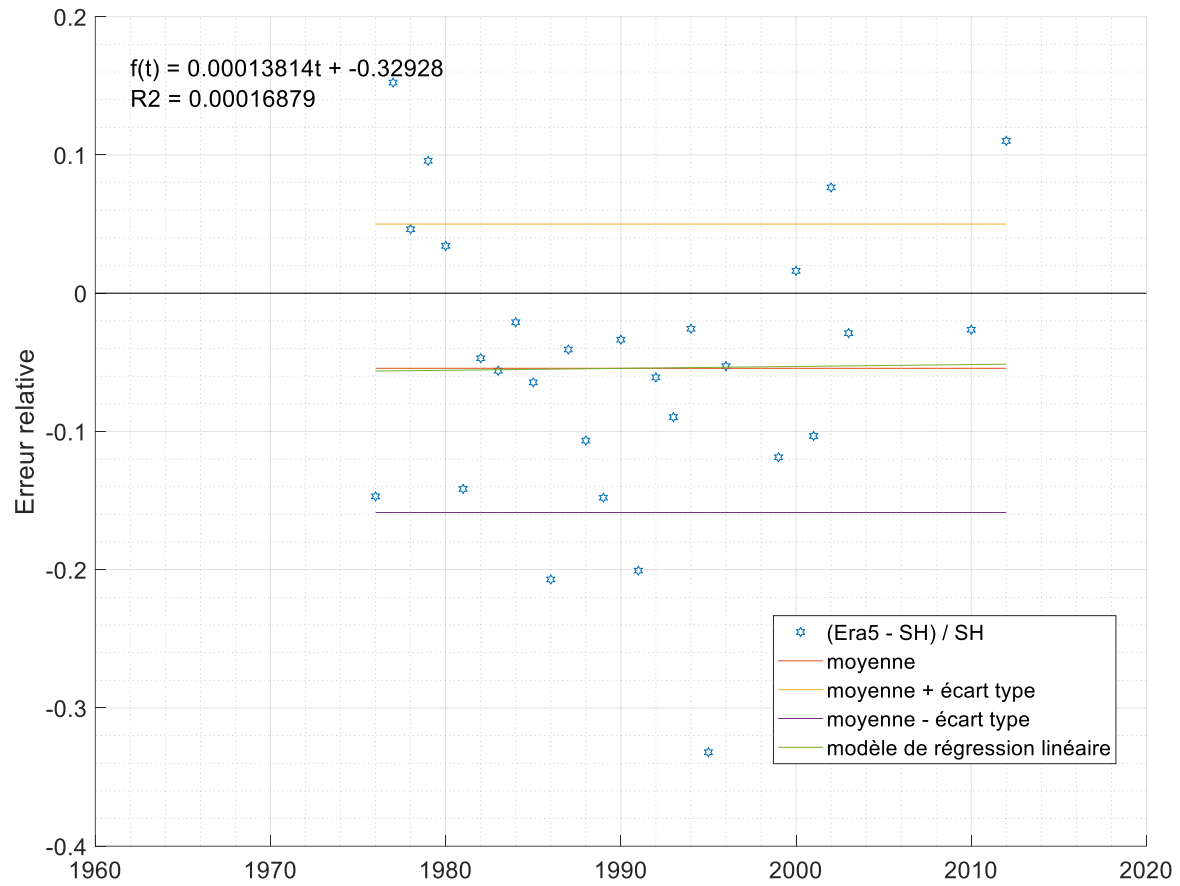


Figure 59. Rivière Pontax, erreurs relatives sur les données ERA5 par rapport à la station hydrométrique.

Broadback

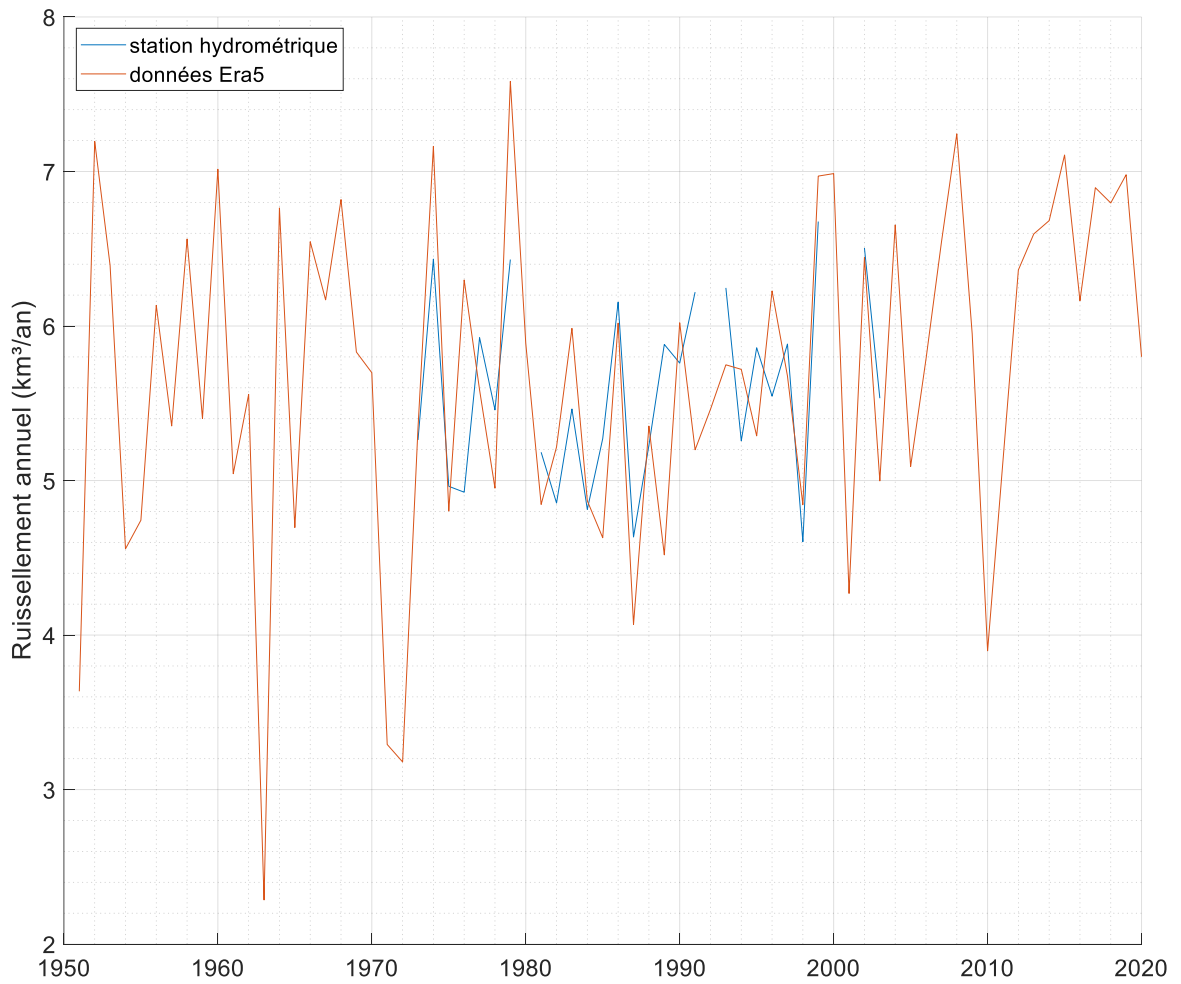


Figure 60. Rivière Broadback, série temporelle du débit mesuré à la station hydrométrique et débit modélisé par ERA5.

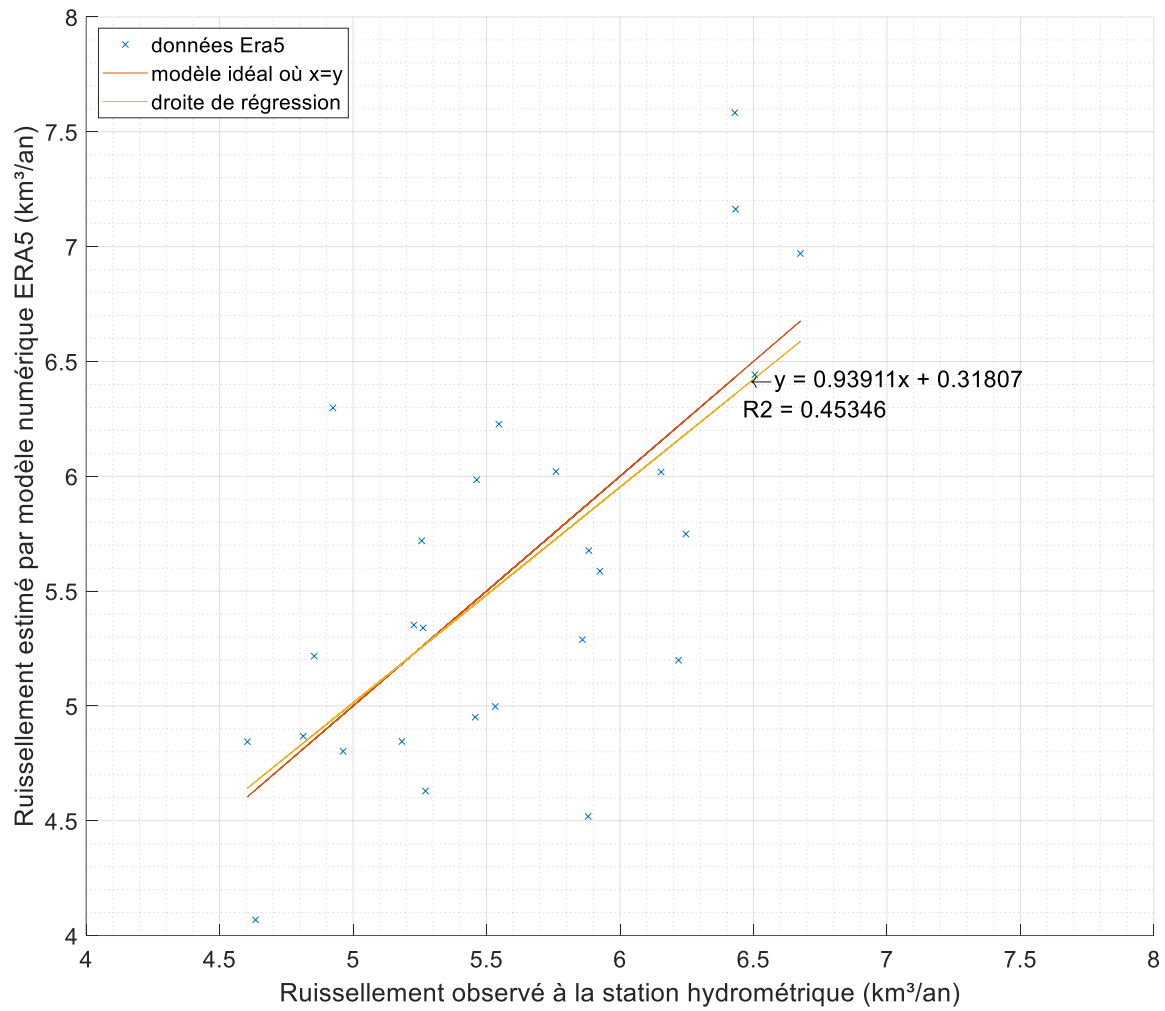


Figure 61. Rivière Broadback, débit annuel modélisé par ERA5 en fonction du débit observé à la station hydrométrique.

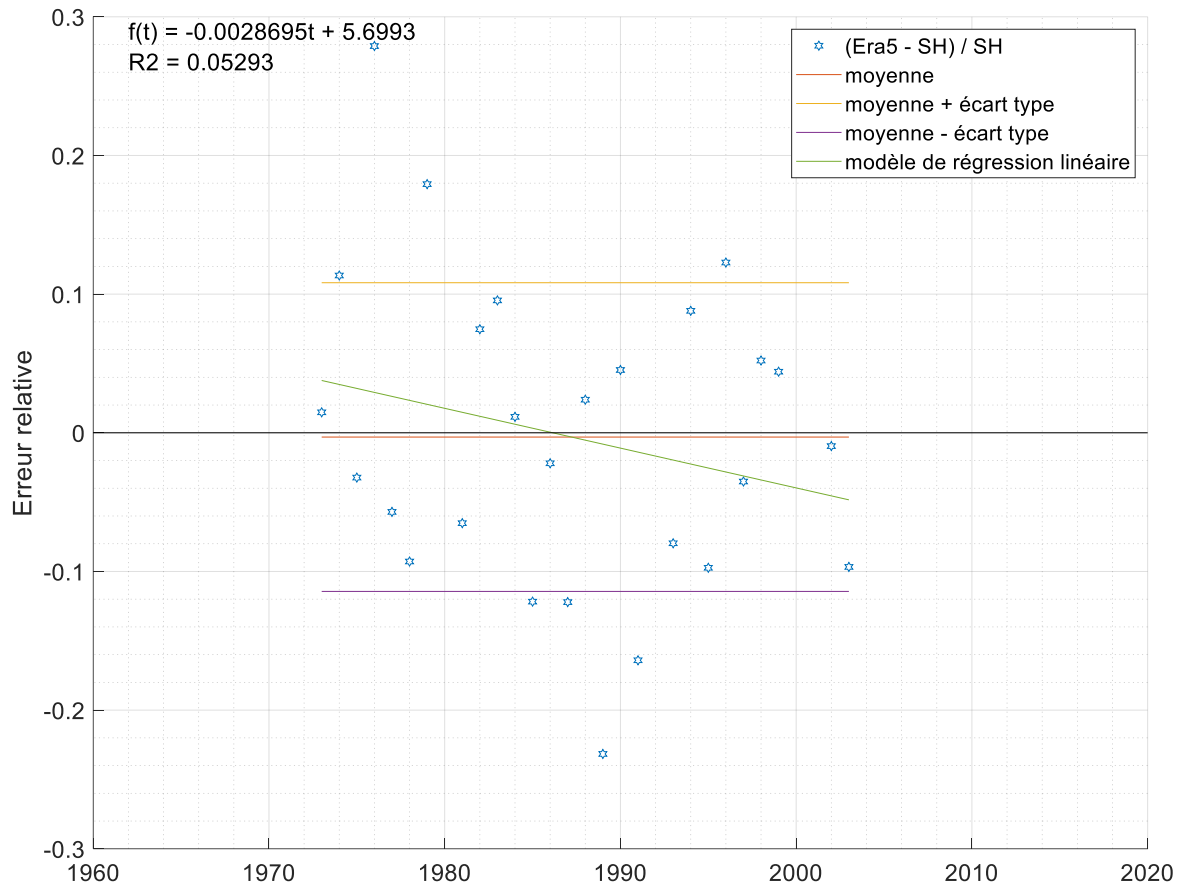


Figure 62. Rivière Broadback, erreurs relatives sur les données ERA5 par rapport à la station hydrométrique.

Nottaway

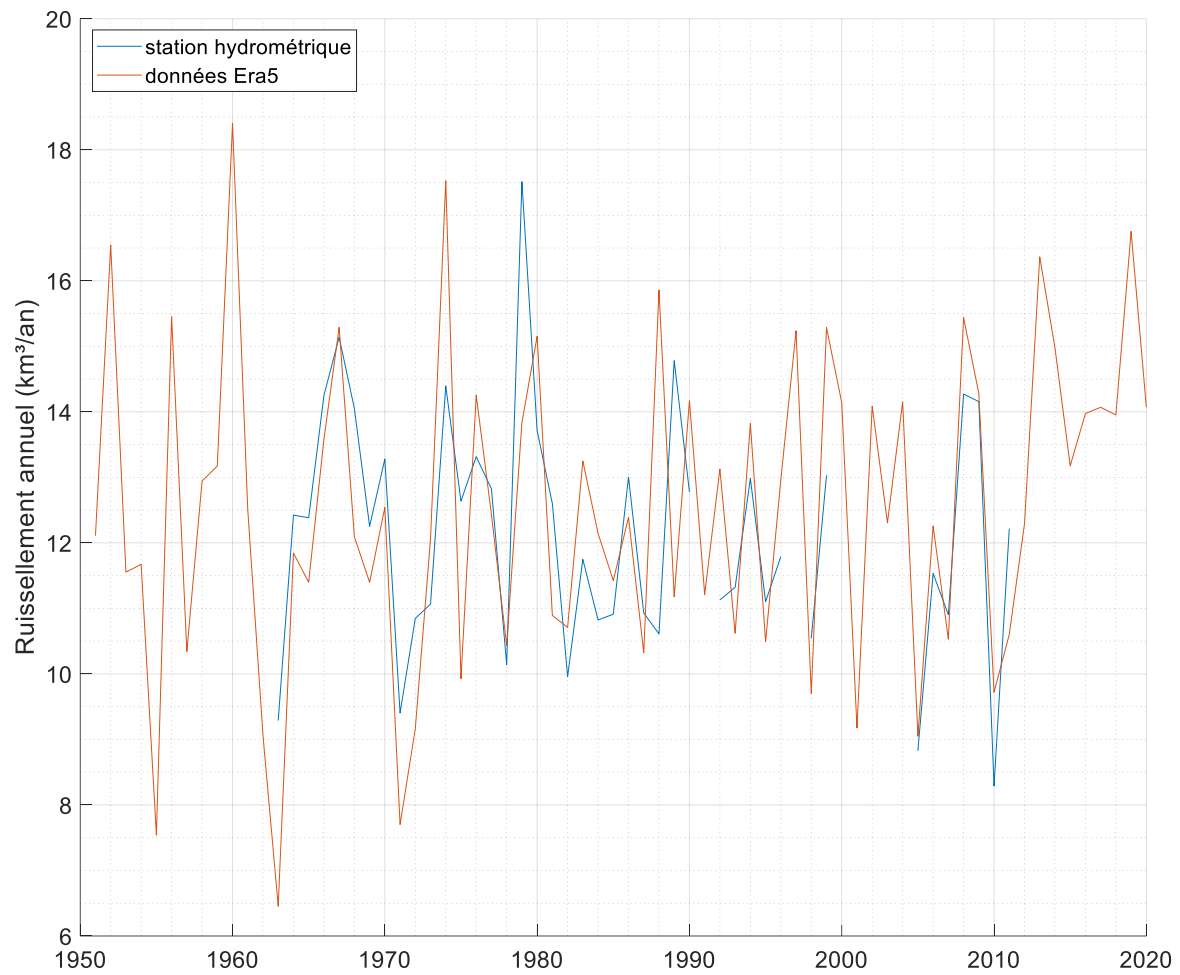


Figure 63. Rivière Nottaway, série temporelle du débit mesuré à la station hydrométrique et débit modélisé par ERA5.

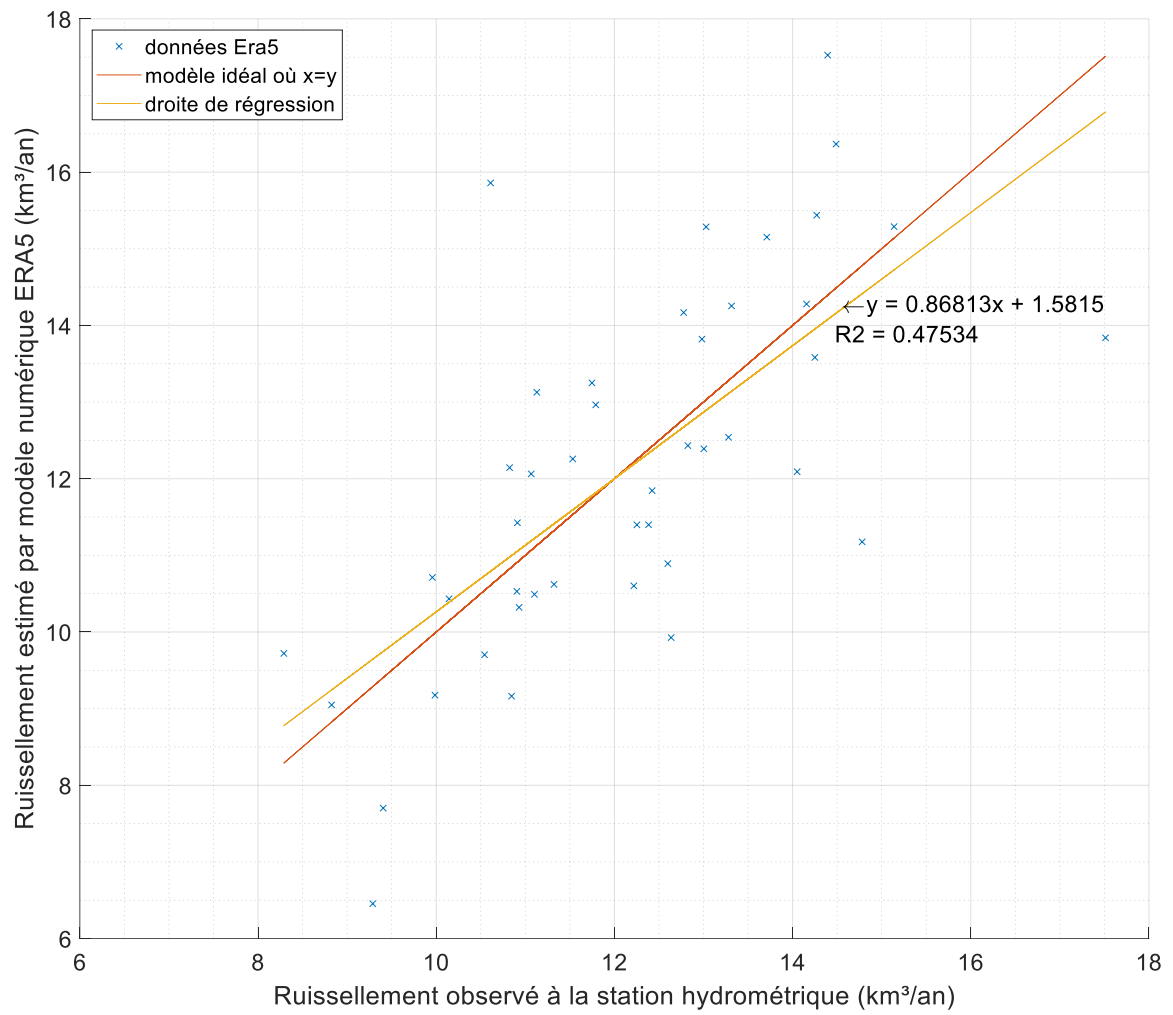


Figure 64. Rivière Nottaway, débit annuel modélisé par ERA5 en fonction du débit observé à la station hydrométrique.

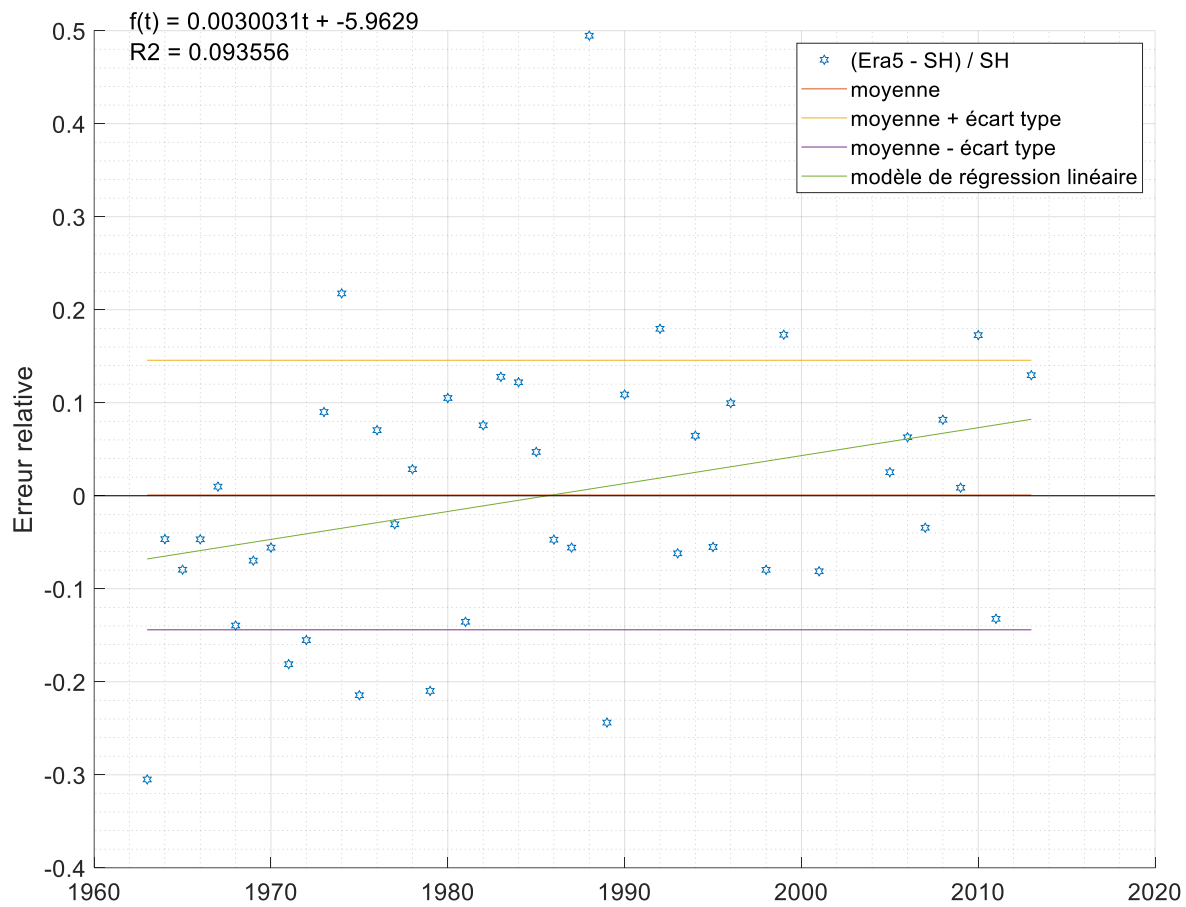


Figure 65. Rivière Nottaway, erreurs relatives sur les données ERA5 par rapport à la station hydrométrique.

Moose

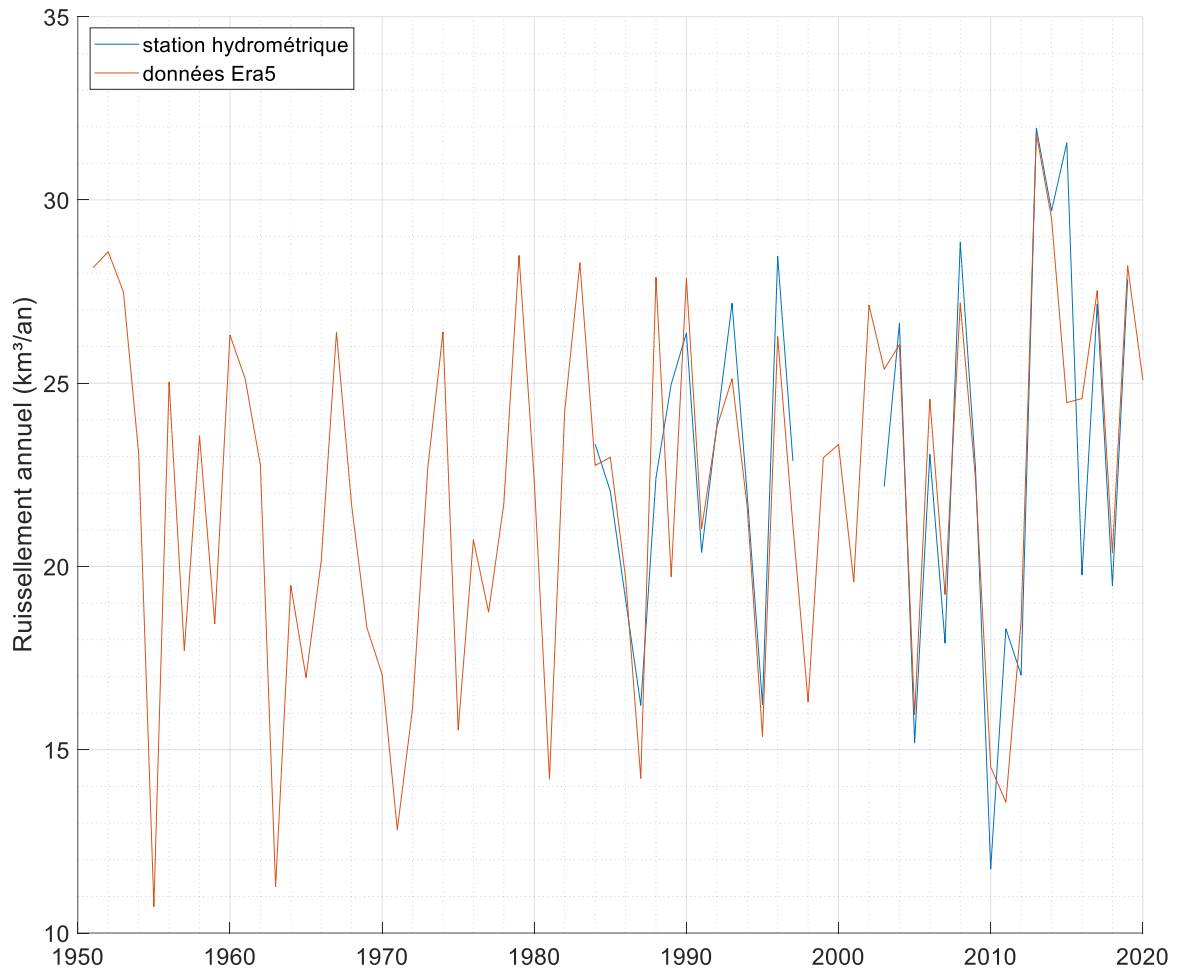


Figure 66. Rivière Moose, série temporelle du débit mesuré à la station hydrométrique et débit modélisé par ERA5.

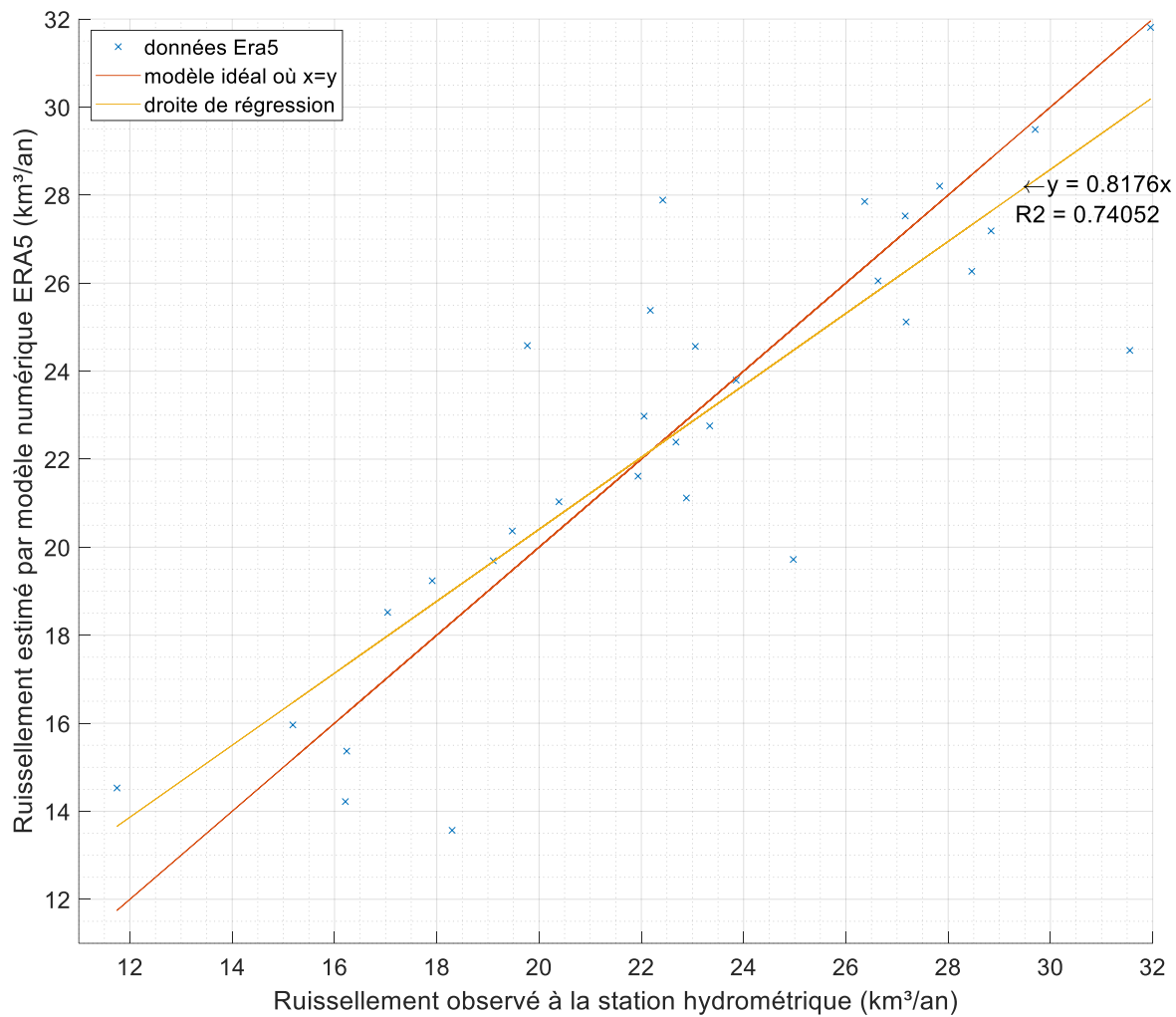


Figure 67. Rivière Moose, débit annuel modélisé par ERA5 en fonction du débit observé à la station hydrométrique.

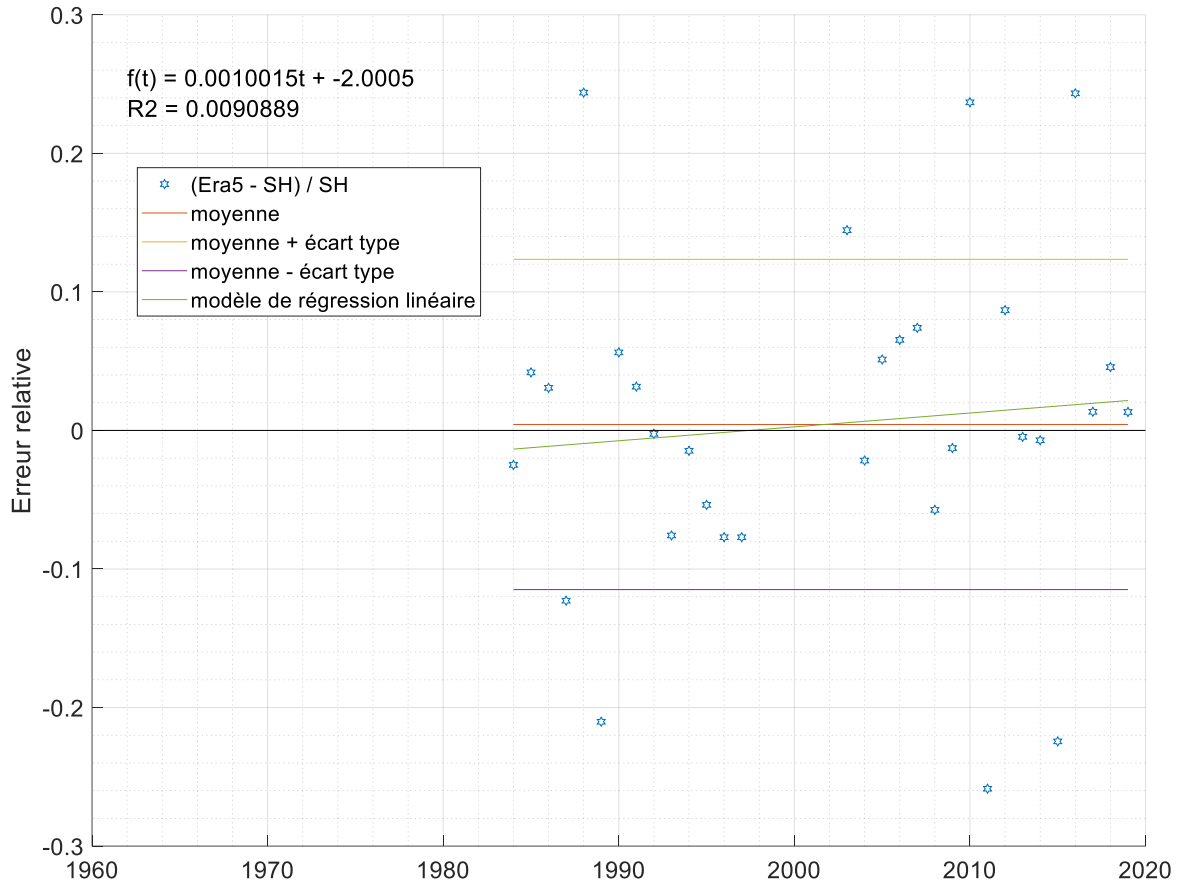


Figure 68. Rivière Moose, erreurs relatives sur les données ERA5 par rapport à la station hydrométrique.

Albany

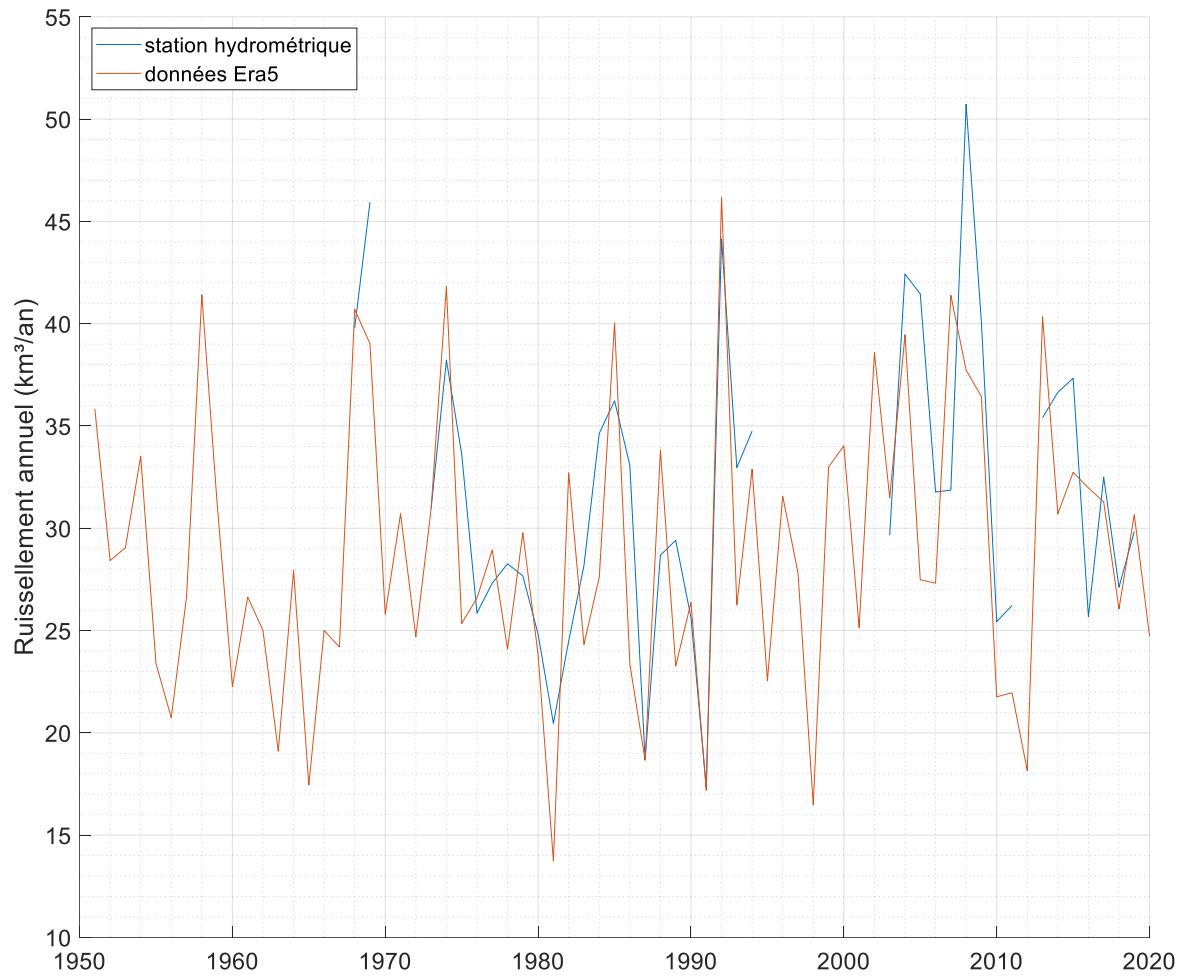


Figure 69. Rivière Albany, série temporelle du débit mesuré à la station hydrométrique et débit modélisé par ERA5.

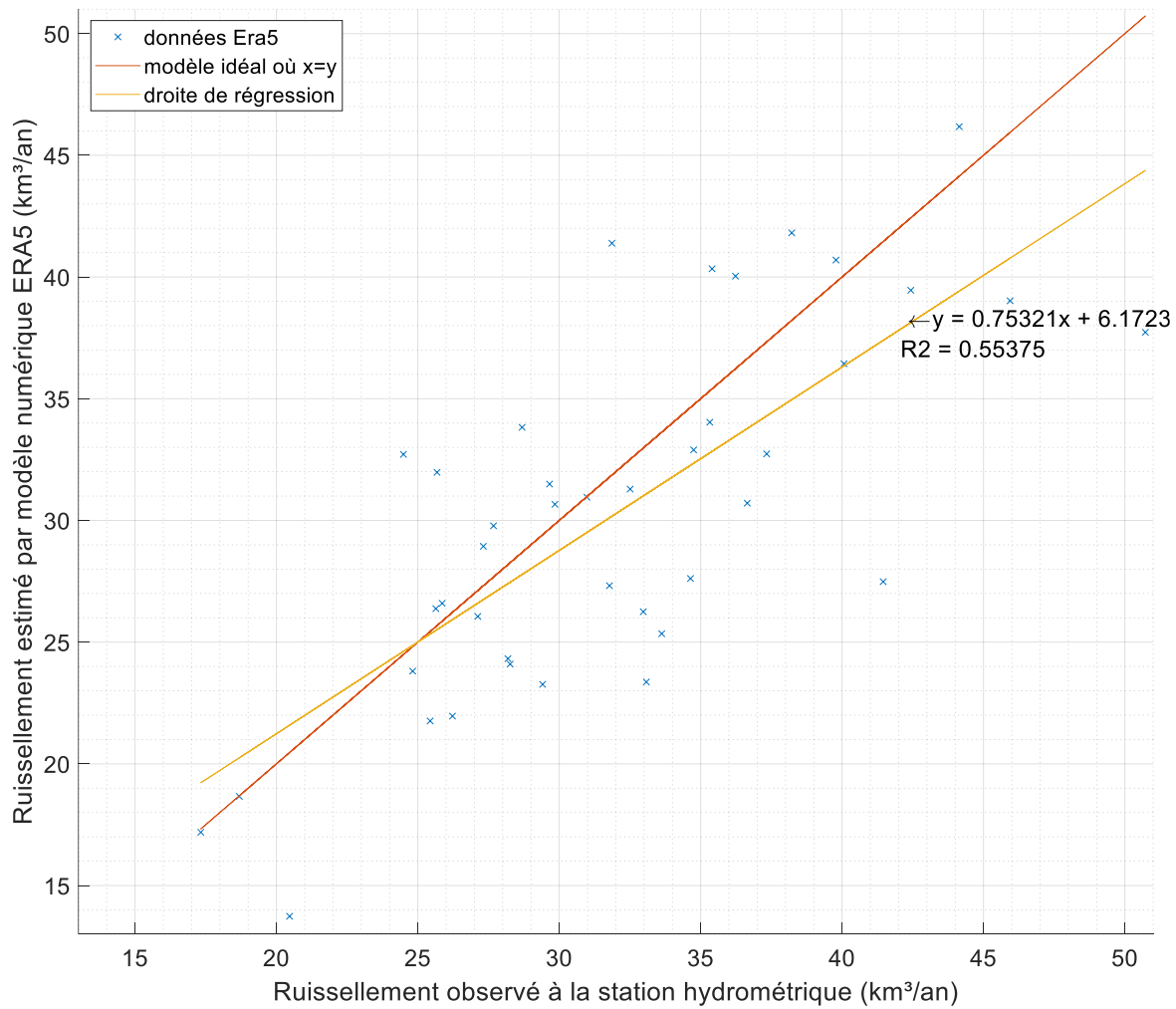


Figure 70. Rivière Albany, débit annuel modélisé par ERA5 en fonction du débit observé à la station hydrométrique.

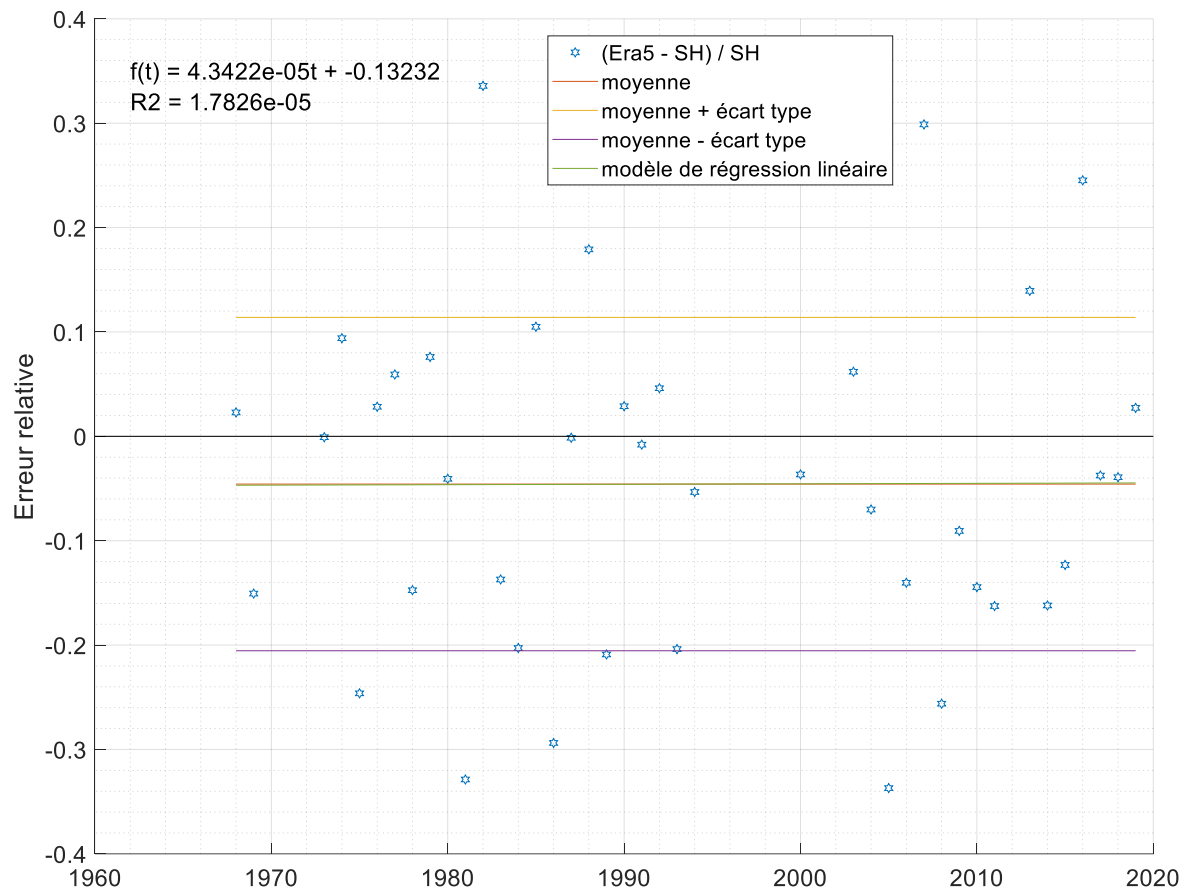


Figure 71. Rivière Albany, erreurs relatives sur les données ERA5 par rapport à la station hydrométrique.

Attawapiskat

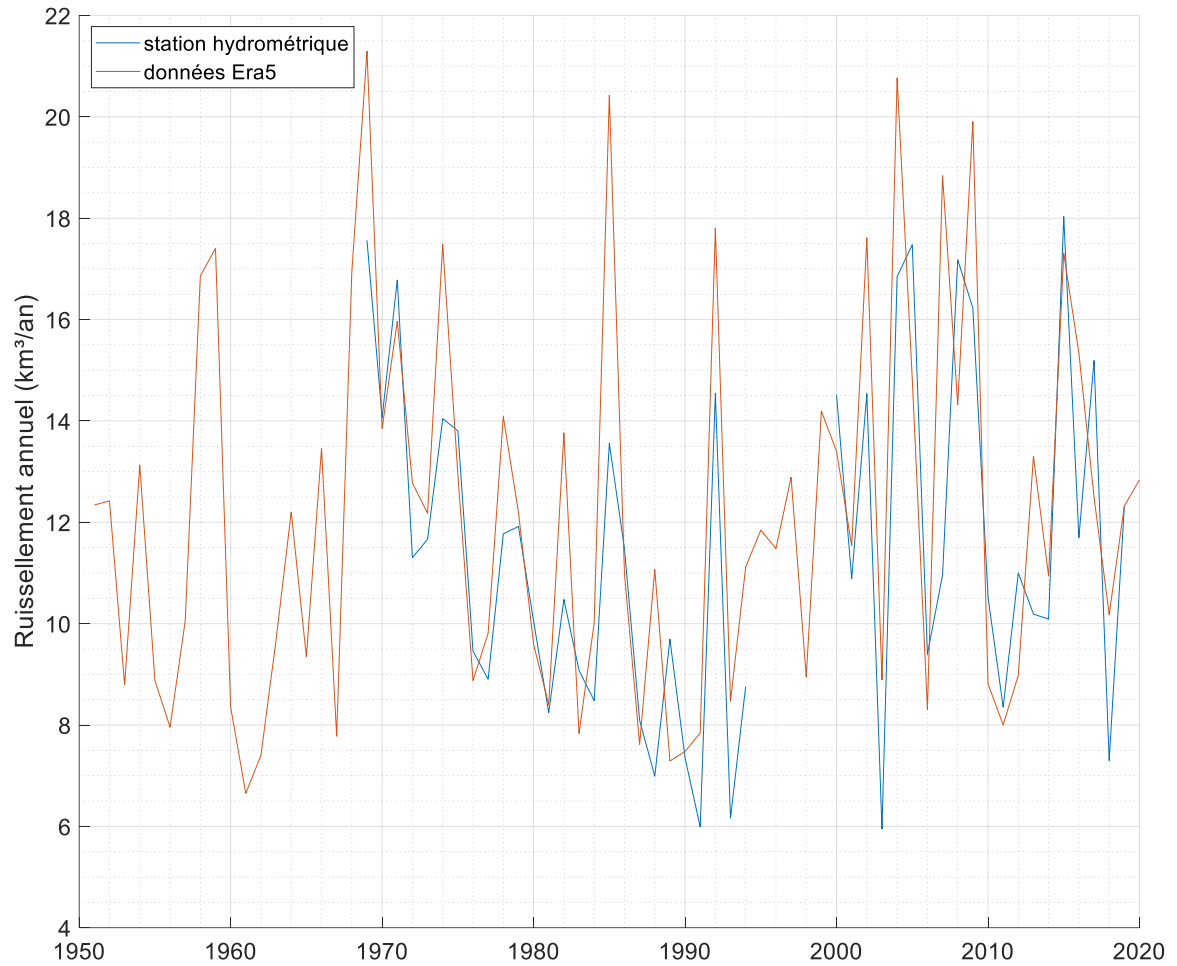


Figure 72. Rivière Attawapiskat, série temporelle du débit mesuré à la station hydrométrique et débit modélisé par ERA5.

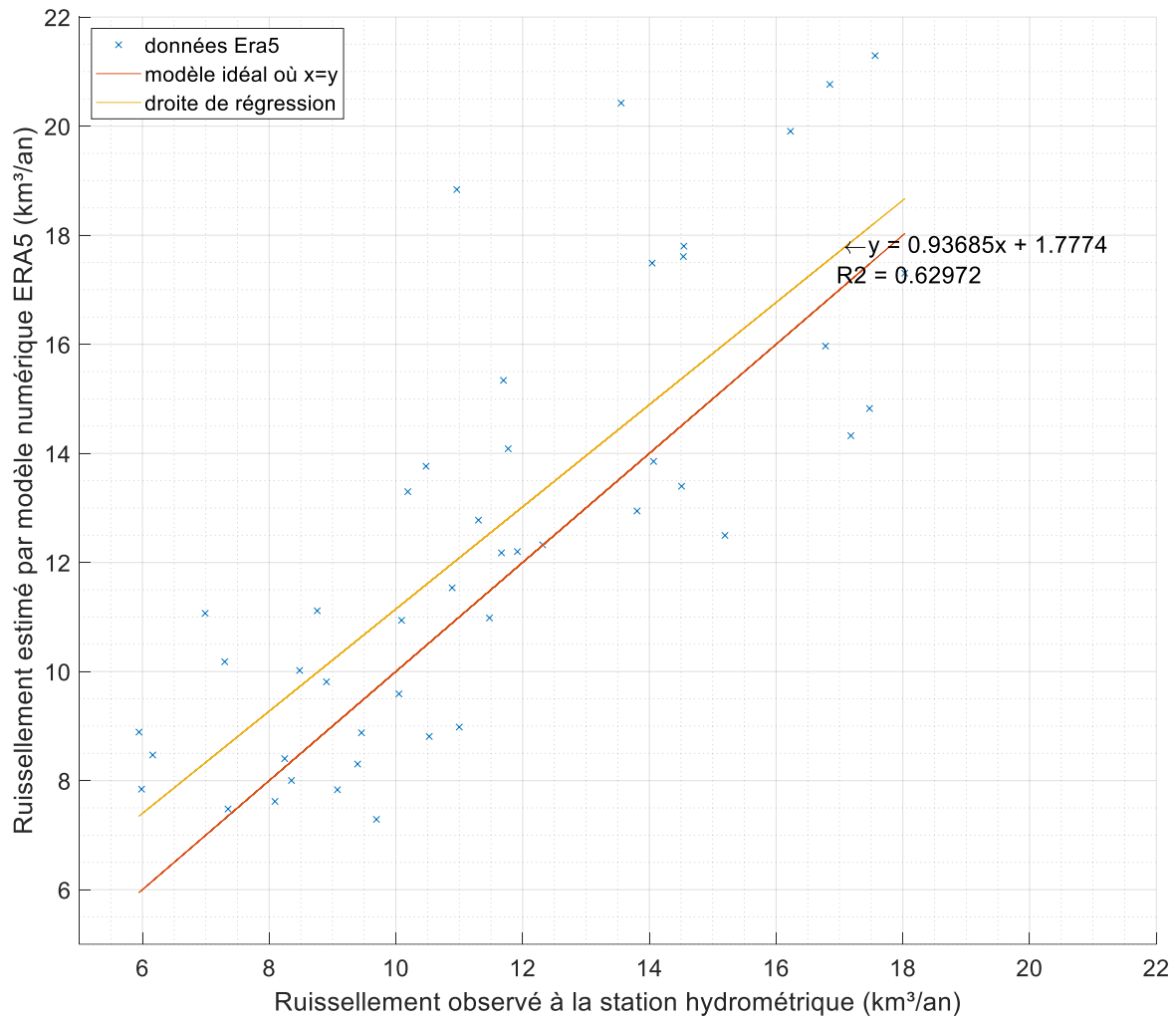


Figure 73. Rivière Attawapiskat, débit annuel modélisé par ERA5 en fonction du débit observé à la station hydrométrique.

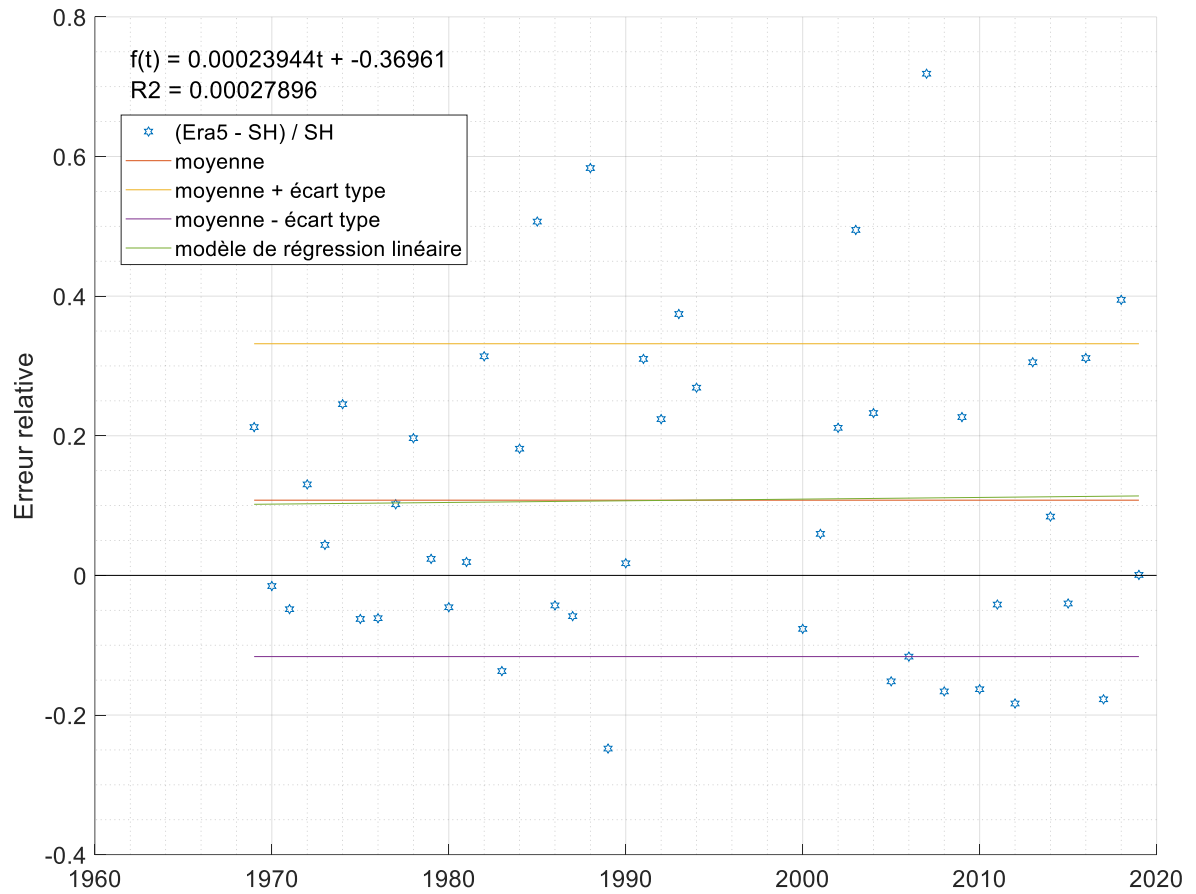


Figure 74. Rivière Attawapiskat, erreurs relatives sur les données ERA5 par rapport à la station hydrométrique.

Ekwan

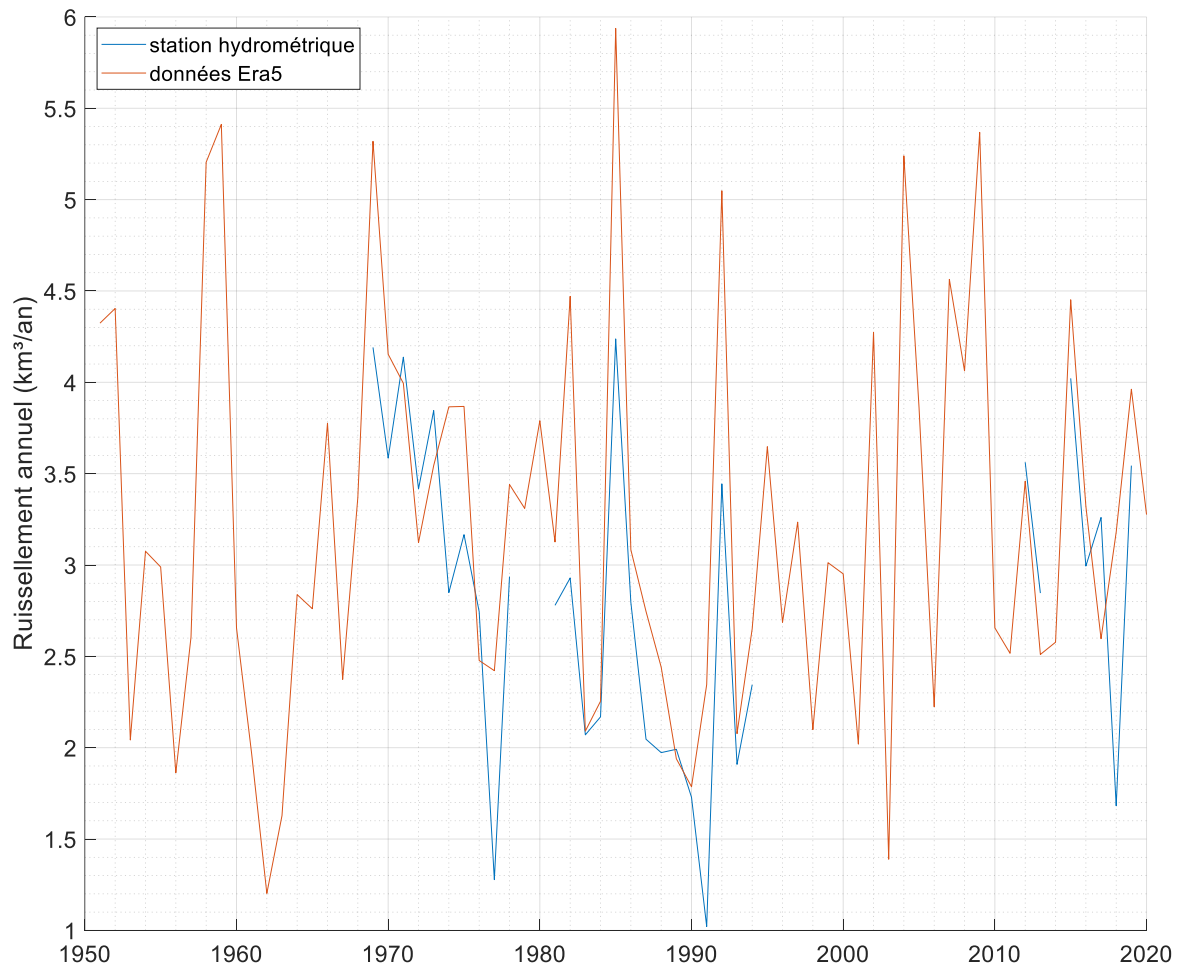


Figure 75. Rivière Ekwan, série temporelle du débit mesuré à la station hydrométrique et débit modélisé par ERA5.

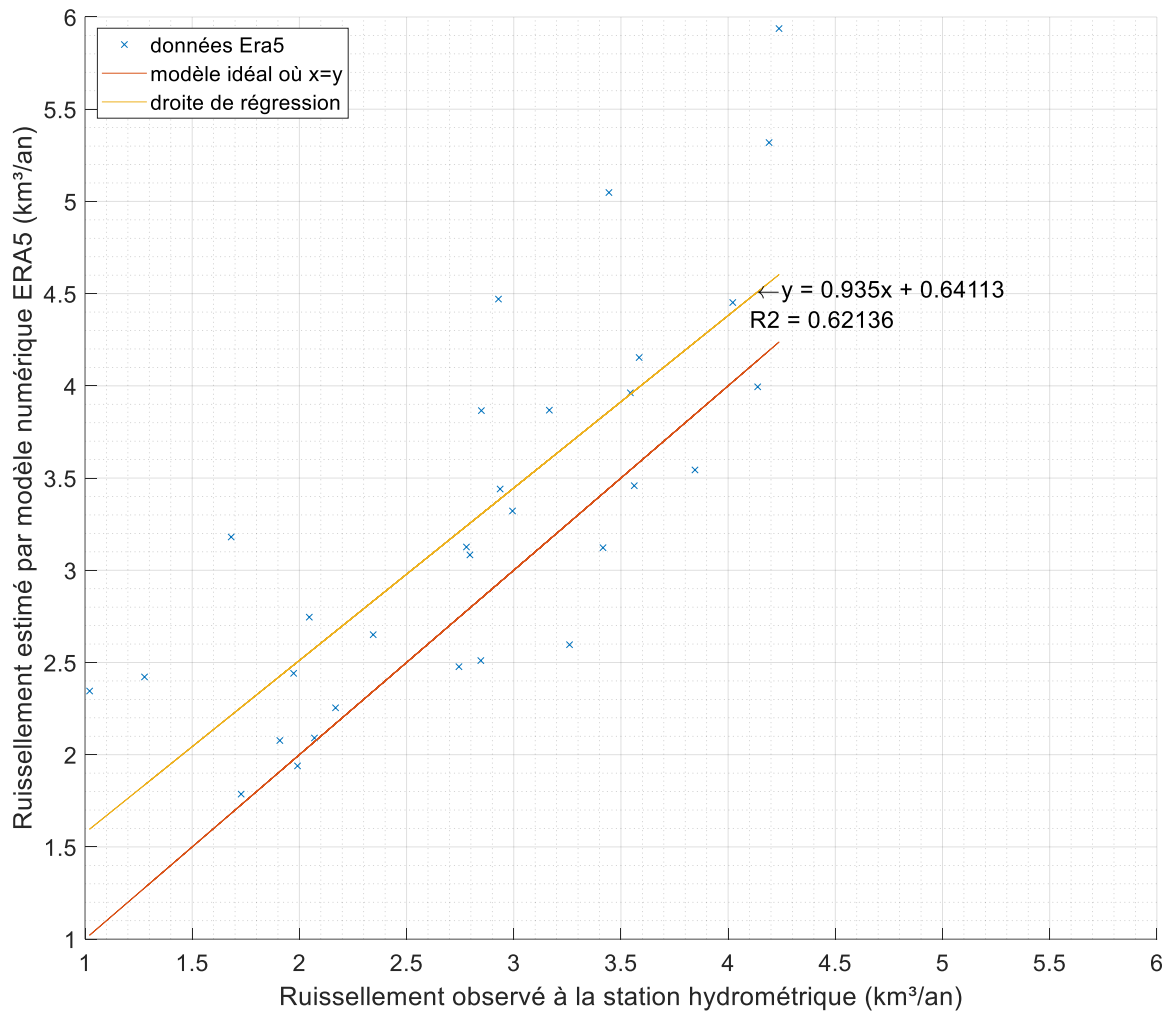


Figure 76. Rivière Ekwan, débit annuel modélisé par ERA5 en fonction du débit observé à la station hydrométrique.

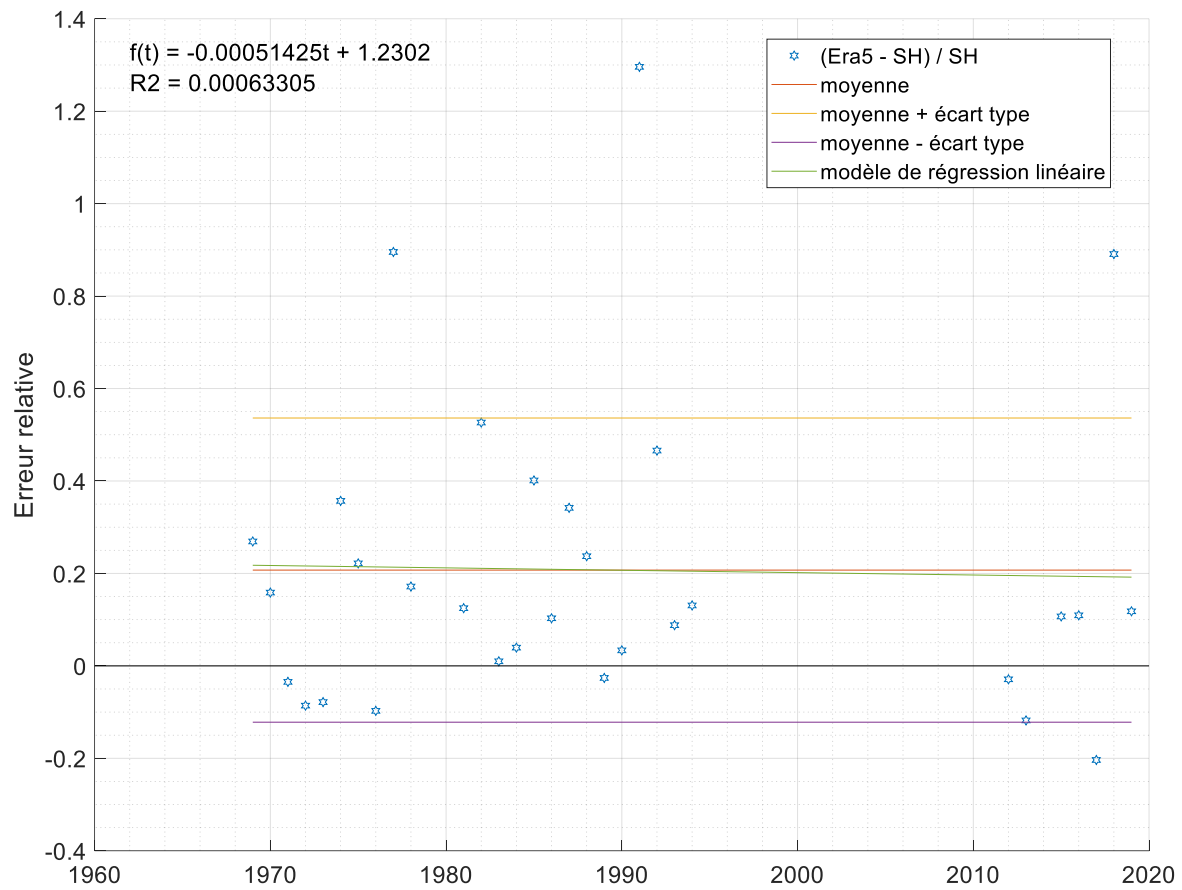


Figure 77. Rivière Ekwan, erreurs relatives sur les données ERA5 par rapport à la station hydrométrique.

Winisk

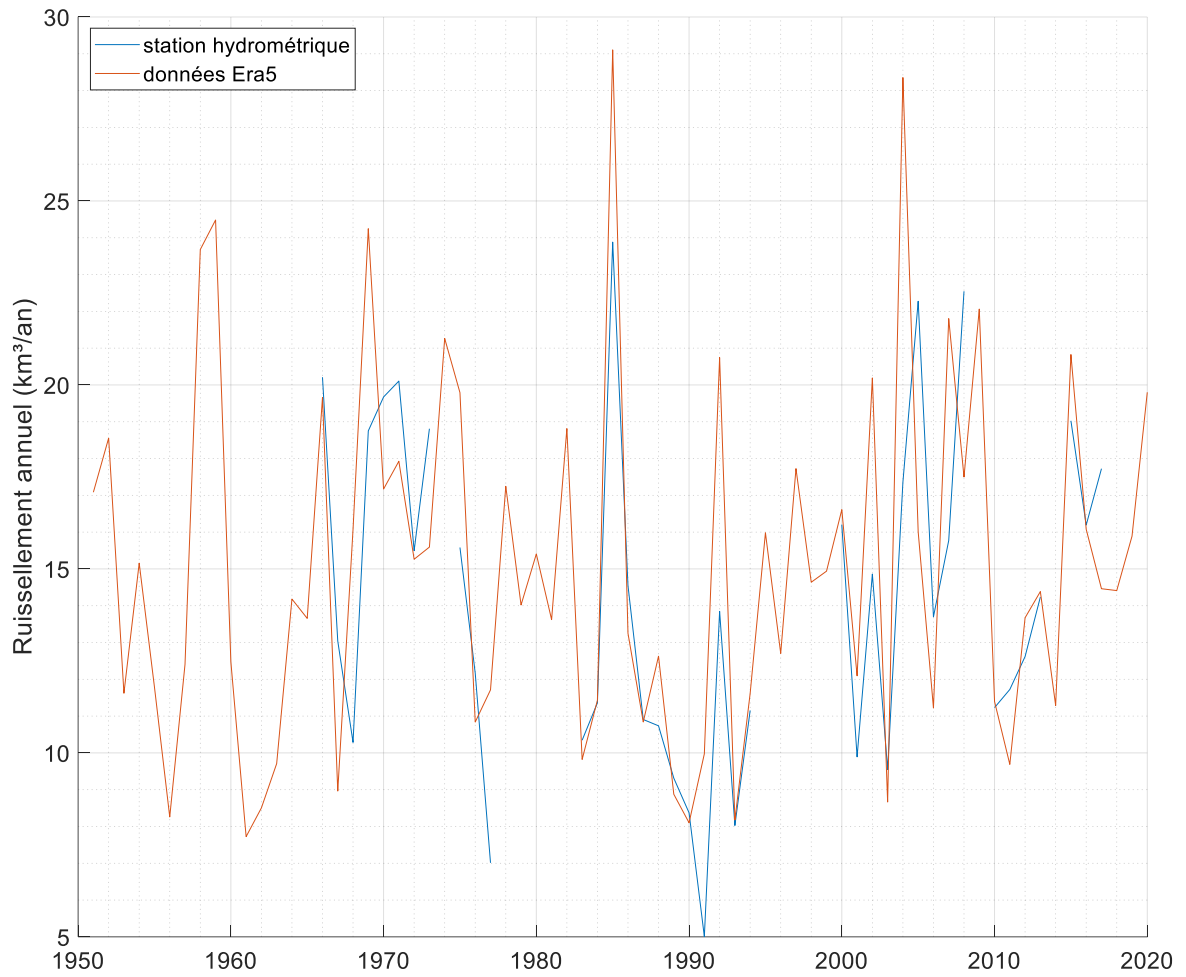


Figure 78. Rivière Winisk, série temporelle du débit mesuré à la station hydrométrique et débit modélisé par ERA5.

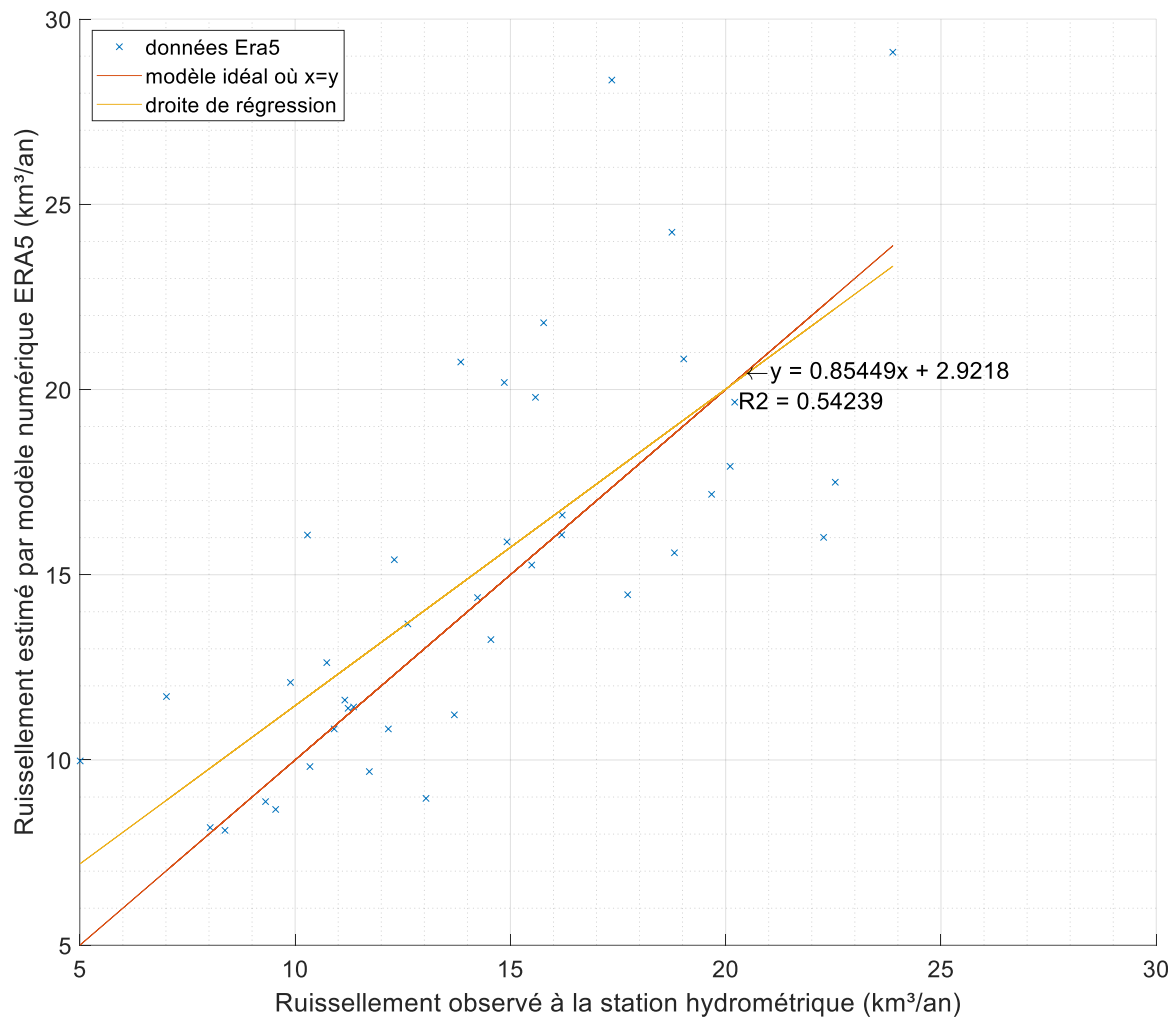


Figure 79. Rivière Winisk, débit annuel modélisé par ERA5 en fonction du débit observé à la station hydrométrique.

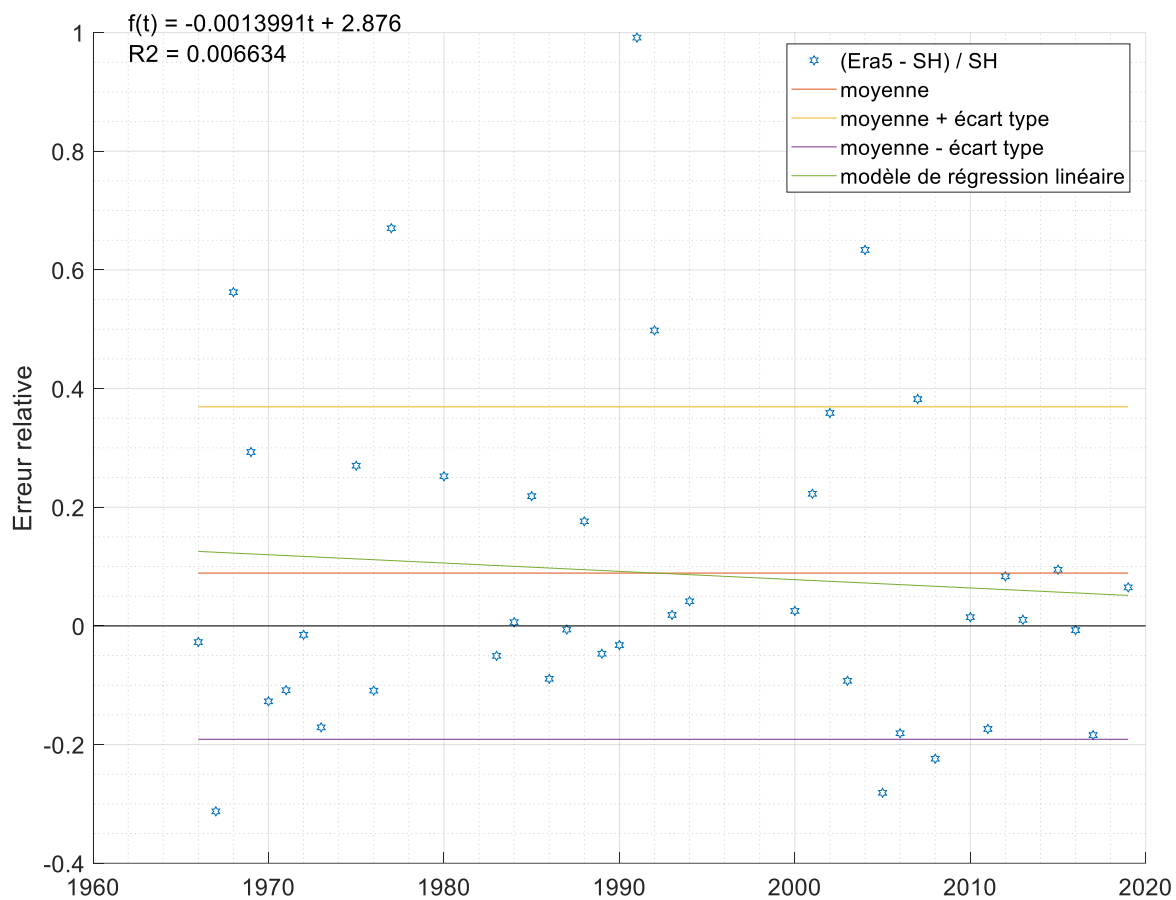


Figure 80. Rivière Winisk, erreurs relatives sur les données ERA5 par rapport à la station hydrométrique.

ANNEXE II
COMPARATIF EST VS OUEST INCLUANT LES DÉRIVATIONS

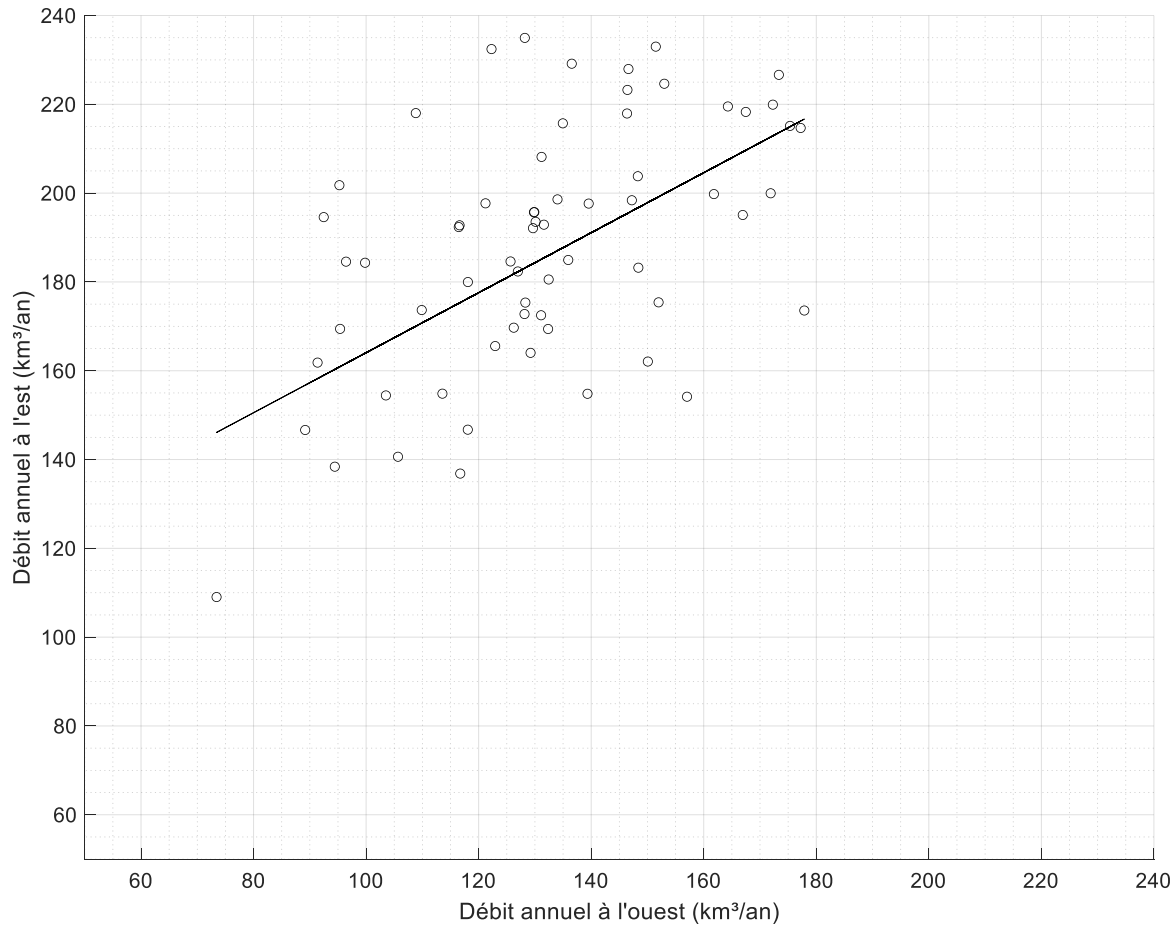


Figure 81. Pour chaque année hydrologique entre 1951 et 2020 inclusivement, débits annuels de ruissellement de l'est (secteurs 2 et 3) en fonction des débits annuels de ruissellement de l'ouest (secteurs 4 et 5) en incluant l'effet des dérivations de bassin versant. La formule de la régression linéaire est : Débit de l'est = $0.7161 * \text{Débit de l'ouest} + 96.4969$. Le R^2 est de 0.336 ($p < 0.01$).

