

SynthEau – Générateur de scénarios probabilistes d'apports hydrologiques

par

Jasmin MARINELLI

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE
LA MAÎTRISE EN GÉNIE DE LA CONSTRUCTION
M.Sc.A.

MONTREAL, LE 22 AVRIL 2025

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Jasmin Marinelli, 2025



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY
CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Richard Arsenault, directeur de mémoire
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. François Brissette, codirecteur de mémoire
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Jean-Luc Martel, président du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

Mme Annie Poulin, membre du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 16 AVRIL 2025

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Ce mémoire marque l'aboutissement d'un parcours académique et professionnel qui n'aurait pas été possible sans le soutien et l'encouragement de certaines personnes.

Je tiens à remercier à mon directeur de mémoire, Richard Arsenault, pour son accompagnement tout au long de cette aventure de rédaction. Sa disponibilité, ses conseils et sa capacité à me motiver dans les moments plus difficiles ont été essentiels pour terminer ce travail.

Un immense merci à Pierre-Olivier Caron Périgny, qui a su voir en moi un potentiel. C'est grâce à lui que j'ai osé reprendre les études et que j'ai choisi de travailler sur SynthEau. Son soutien constant, ses encouragements et sa confiance ont joué un rôle clé.

Je remercie également l'École de technologie supérieure (ÉTS) et Hydro-Québec pour le cadre propice à la réalisation de ce mémoire. Travailler sur un projet appliqué et en lien avec des enjeux hydriques réels a été une opportunité pour moi, tant sur le plan scientifique que professionnel.

Je souhaite souligner ma reconnaissance à ma conjointe, ainsi qu'à mes trois enfants. Leur patience et leur soutien m'ont permis de mener ce projet à terme malgré les longues heures consacrées à la rédaction. Je vous aime!

Enfin, je remercie toutes personnes, de près ou de loin, qui ont contribué à cette réalisation, que ce soit par des échanges confrontant ou des discussions inspirantes.

Merci à vous tous !

SynthEau – Générateur de scénarios probabilistes d’apports hydrologiques

Jasmin MARINELLI

RÉSUMÉ

La gestion des ressources hydriques au Québec est essentielle en raison de sa forte dépendance à l’hydroélectricité et des impacts de la variabilité climatique, qu’elle soit d’origine naturelle ou liée aux changements climatiques anthropiques. Actuellement, Hydro-Québec utilise des prévisions hydrologiques d’ensemble (ESP) pour produire des scénarios probabilistes en volume dont les biais limitent l’efficacité opérationnelle lors d’événements extrêmes, tels que les crues printanières. Ce mémoire vise principalement à développer la méthode SynthEau (pour Synthèse de l’Eau), une méthode permettant d’améliorer la précision des prévisions de volumes d’apports et la cohérence temporelle des scénarios probabilistes issus des prévisions hydrologiques d’ensemble. L’objectif est de mieux gérer les écarts de volume lors des événements extrêmes et de comparer SynthEau à la méthode actuellement utilisée (HMAPPORT) pour en mesurer l’efficacité.

La recherche repose sur l’analyse des bassins versants de La Grande et de la Saint-Maurice au Québec. Les données d’apports historiques ainsi que les archives des prévisions hydrologiques d’ensemble ont été utilisées. Deux modèles de transformation ont été comparés : HMAPPORT, la méthode utilisant la médiane temporelle comme base pour redistribuer le volume prévu, et SynthEau, la méthode développée garantissant la cohérence temporelle des quantiles probabilistes des volumes d’apports prévus via une approche cumulée décumulée. L’évaluation est basée sur l’erreur relative moyenne, les biais par rapport aux observations réelles et la fiabilité des scénarios générés.

Le modèle SynthEau présente une réduction des erreurs moyennes de volumes d’apports prévisionnels comparativement à HMAPPORT, sur l’horizon de prévision moyenne de 30 jours pour les scénarios fort (15% de dépassement) et faible (85% de dépassement). Les résultats indiquent une meilleure représentation du volume prévu de SynthEau aux conditions hydrologiques extrêmes, avec des biais généralement inférieurs à 0,5 %. Toutefois, la comparaison des scénarios à médian avec les volumes réels présente des performances similaires entre SynthEau et HMAPPORT, mettant en évidence l’influence déterminante des prévisions hydrologiques d’ensemble elles-mêmes. L’analyse de fiabilité montre une légère sous-estimation des événements extrêmes correspondant au quantile 15 % et une surestimation des scénarios fréquents du quantile 85 % par les deux modèles, car ceux-ci utilisent la même source pour les alimenter.

SynthEau améliore l’estimation du volume prévu des scénarios probabilistes issus des prévisions hydrologiques d’ensemble, permettant d’offrir des bénéfices opérationnels concrets pour la gestion hydrique d’Hydro-Québec. Les biais observés par rapport aux observations sont causés par les prévisions hydrologiques d’ensemble, soulignant l’importance d’améliorer ces prévisions en amont. Des recherches futures pourraient intégrer des méthodes avancées

VIII

d'assimilation des données ou de correction de biais directement dans les prévisions ensemblistes pour renforcer davantage la précision et la fiabilité des scénarios opérationnels.

Mots-clés : prévisions hydrologiques d'ensemble (ESP), scénarios probabilistes de volumes d'apports, processus opérationnel, fiabilité, gestion hydrique

SynthEau – Generator of probabilistic hydrological inflow scenarios

Jasmin MARINELLI

ABSTRACT

Water resource management in Québec is essential due to its strong reliance on hydroelectricity and the impacts of climate variability, whether from natural fluctuations or anthropogenic climate change. Currently, Hydro-Québec uses ensemble streamflow predictions (ESP) to produce probabilistic volume scenarios, but their biases limit operational efficiency during extreme events such as spring floods. This thesis primarily aims to develop the SynthEau method, which enhances the accuracy of inflow volume forecasts and the temporal consistency of probabilistic scenarios derived from ESP. The goal is to better manage volume discrepancies during extreme events and to compare SynthEau with the currently used method (HMAPPORT) to assess its effectiveness.

The research focuses on the analysis of the La Grande and Saint-Maurice River basins in Québec. Historical inflow data and archived ensemble hydrological forecasts were used. Two transformation models were compared: HMAPPORT, which uses the temporal median as a basis for redistributing the predicted volume, and SynthEau, a newly developed method that ensures the temporal consistency of probabilistic inflow volume quantiles through a cumulative-decumulative approach. The evaluation is based on mean relative error, biases against real observations, and scenario reliability.

The SynthEau model shows a reduction in average inflow volume forecast errors compared to HMAPPORT, particularly over a 30-day medium-term forecast horizon for high (15% exceedance) and low (85% exceedance) scenarios. The results indicate that SynthEau provides a better representation of forecasted volumes under extreme hydrological conditions, with biases generally below 0.5%. However, the comparison of median scenarios with actual volumes shows similar performance between SynthEau and HMAPPORT, highlighting the dominant influence of the ensemble streamflow forecasts themselves. Reliability analysis reveals a slight underestimation of extreme events at the 15% quantile and an overestimation of frequent scenarios at the 85% quantile for both models, as they rely on the same input data.

SynthEau improves the estimation of forecasted volumes in probabilistic scenarios derived from ESP, providing tangible operational benefits for Hydro-Québec's water resource management. The observed biases relative to actual inflows are primarily caused by the ESP forecasts, underscoring the importance of improving these forecasts upstream. Future research could integrate advanced data assimilation methods or bias correction directly into ensemble forecasts to further enhance the precision and reliability of operational scenarios.

Keywords: ensemble streamflow predictions (ESP), probabilistic inflow volume scenarios, operational process, reliability, water resource management

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	21
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE.....	23
1.1 Contexte hydrique et importance stratégique au Québec	23
1.2 Impacts des changements climatiques sur les régimes hydrologiques	25
1.3 Enjeux des prévisions hydrologiques d'ensemble (ESP).....	26
1.4 Transformation des prévisions ensemblistes en scénarios probabilistes	28
1.4.1 Utilisation pratique des scénarios probabilistes en volume	28
1.4.2 Approches méthodologiques pour la génération de scénarios probabilistes en volume	29
1.5 Objectifs de la présente étude	31
CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE.....	33
2.1 Sites à l'étude.....	33
2.2 Données utilisées	35
2.2.1 Données météorologiques journalières	36
2.2.2 Archives des prévisions journalières hydrologiques ensemblistes par bassin versant	38
2.2.3 Apports historiques journaliers par bassin versant	41
2.3 Modèle hydrologique HSAMI	42
2.4 Modèles de transformation des prévisions hydrologiques d'ensemble en scénarios probabilistes en volume	42
2.4.1 Modèle HMAPPORT.....	42
2.4.2 Modèle SynthEau.....	45
2.5 Métriques d'évaluation et de vérification de la qualité	48
2.5.1 Calcul des scénarios en volume	48
2.5.2 Calcul des quantiles empiriques.....	49
2.5.3 Calcul du biais.....	49
2.5.4 Génération des diagrammes de fiabilité.....	50
2.6 Implémentation et comparaison des modèles	51
2.6.1 Implémentation des modèles et choix des périodes d'étude	51
2.6.2 Comparaison des modèles.....	53
CHAPITRE 3 RÉSULTATS.....	55
3.1 Introduction.....	55
3.2 Comparaison des performances des erreurs relatives moyennes sur les volumes prévus.....	56
3.2.1 Erreurs relatives moyennes sur les volumes prévus pour le Saint-Maurice.....	56
3.2.2 Erreurs relatives moyennes sur les volumes prévus pour La Grande	59

3.3	Comparaison des erreurs du volume prévu du scénario médian par rapport au volume réel.....	61
3.3.1	Erreurs du volume prévu du scénario médian par rapport au volume réel pour La Grande	61
3.3.2	Erreurs du volume prévu du scénario médian par rapport au volume réel pour le Saint-Maurice	62
3.4	Fiabilité des scénarios probabilistes.....	64
3.4.1	Fiabilité des scénarios pour le système hydrique La Grande.....	65
3.4.2	Fiabilité des scénarios pour le système hydrique de la Saint-Maurice	66
3.5	Interface utilisateur du modèle SynthEau (SynthEau Analyse).....	67
3.6	Synthèse des résultats	68
CHAPITRE 4 DISCUSSION		71
4.1	Performance du modèle SynthEau.....	71
4.2	Comparaison du scénario médian (50 %) avec les volumes observés.....	72
4.3	Analyse de la fiabilité des scénarios probabilistes d'apports.....	73
4.4	Comparaison avec les autres méthodes.....	74
4.5	Synthèse et application opérationnelle de SynthEau	75
4.6	Limitations de l'étude	75
CONCLUSION.....		79
ANNEXE I	RÉSULTAT DES COMPARAISONS DE L'ERREUR MOYENNE DU VOLUME CUMULÉ DES MÉTHODES PAR RAPPORT AU QUANTILE EMPIRIQUE ENSEMBLISTE PAR BASSIN VERSANT	81
ANNEXE II	RÉSULTAT DES COMPARAISONS DE LA FIABILITÉ DES SCÉNARIOS PROBABILISTE PAR BASSIN VERSANT.....	93
ANNEXE III	FIGURES DES APPORTS HISTORIQUES JOURNALIERS 1950-2023 PAR BASSIN VERSANT	105
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES		117

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 2.1 Bassins versants (8) à l'étude du système de la Saint-Maurice	34
Tableau 2.2 Bassins versants (13) à l'étude du système de La Grande.....	34
Tableau 3.1 Synthèse de l'erreur moyenne du volume cumulé par rapport au quantile empirique ensembliste pour les bassins versants de la Saint-Maurice.....	58
Tableau 3.2 Synthèse de l'erreur moyenne du volume cumulé par rapport au quantile empirique ensembliste pour les bassins versants de La Grande ..	60
Tableau 3.3 Comparaison des erreurs du volume prévu du scénario médian par rapport au volume réel	64

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 2.1	Localisation des bassins versants du système hydrique de La Grande et du Saint-Maurice35
Figure 2.2	Système InterpolEau Consultation qui présente les données de précipitation aux stations pour le 10 août 202437
Figure 2.3	Système InterpolEau - Consultation présentant les moyennes aux bassins versants pour le 10 août 202437
Figure 2.4	Diagramme du processus de la prévision météorologique expertisée39
Figure 2.5	Diagramme conceptuel du processus de la prévision des apports expertisée40
Figure 2.6	Nombre de prévisions archivées par bassin versant41
Figure 2.7	Diagramme conceptuel du modèle HMAPPORT44
Figure 2.8	Prévision hydrologique d'ensemble et scénarios HMAPPORT émis le 12 mars 2024 sur 200 jours pour le bassin versant Caniapiscou ...45
Figure 2.9	Diagramme conceptuel du modèle SynthEau47
Figure 2.10	Prévision hydrologique d'ensemble et scénarios probabilistes SynthEau émis le 12 mars 2024 sur 200 jours pour le bassin versant Caniapiscou47
Figure 2.11	Apports historiques journaliers 1950 à 2023 pour le système hydrique de La Grande52
Figure 2.12	Apports historiques journaliers 1950 à 2023 pour le système hydrique de la Saint-Maurice52
Figure 3.1	Erreur moyenne du volume cumulé des méthodes SynthEau et HMAPPORT par rapport au quantile empirique ensembliste pour les bassins versants du la Saint-Maurice57
Figure 3.2	Erreur moyenne du volume cumulé d'apport attendu SynthEau et HMAPPORT pour les bassins versants de La Grande.....59
Figure 3.3	Erreur du volume prévu du scénario médian par rapport au volume réel pour le système hydrique La Grande62

Figure 3.4	Erreur du volume prévu du scénario médian par rapport au volume réel pour le système hydrique de la Saint-Maurice.....	63
Figure 3.5	Fiabilité des scénarios probabilistes pour La Grande	66
Figure 3.6	Fiabilité des scénarios probabilistes pour le Saint-Maurice	67
Figure 3.7	Interface utilisateur SynthEau Analyse.....	68

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ECCC	Environnement et Changement Climatique Canada
ECMWF	European Center for Medium-range Weather Forecasts
EMOS	Ensemble Model Output Statistics
ESP	Ensemble Streamflow Prediction
FIR	Finite Impulse Response
GDPS	Global Deterministic Prediction System
GFS	Global Forecasting System
HMAPPORT	Modèle de transformation des prévisions hydrologiques d'ensemble en scénarios probabilistes en volume
HSAMI	Modèle hydrologique « Hydrological System AMI (ami du système hydrologique) »
HUE	Hindcast-mode Uncertainty Estimation
MELCCFP	Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs
MSP	Ministère de la Sécurité Publique
NAM	Nested Area Model
NOOA	National Oceanic and Atmospheric Administration
RDPS	Regional Deterministic Prediction System
RMCQ	Réseau Météorologique Coopératif du Québec
SynthEau	Synthèse de l'Eau - Modèle de transformation des prévisions hydrologiques d'ensemble en scénario probabiliste en volume

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

hm^3	hectomètre cube
km^2	kilomètre carré
m^3/s	mètre cube par seconde

INTRODUCTION

L'eau est une ressource fondamentale dont l'accessibilité influence directement divers secteurs socio-économiques, particulièrement la production d'énergie hydroélectrique, qui constitue la principale source d'électricité au Québec (Hydro-Québec, 2020). Dans un contexte caractérisé par une variabilité climatique grandissante et une augmentation continue des besoins énergétiques liés à la transition énergétique et à l'électrification croissante des transports et des secteurs industriels (Institut du Québec, 2024), la gestion optimale des ressources hydriques devient un enjeu stratégique majeur.

La gestion hydrique au Québec est particulièrement complexe en raison d'une variabilité saisonnière marquée, notamment lors des crues printanières et des périodes d'étiages estivaux prolongées. Cette réalité accentue les défis liés à la prévision hydrologique et à la gestion opérationnelle des infrastructures hydroélectriques. Or, la méthode actuelle utilisée par Hydro-Québec pour transformer les prévisions hydrologiques d'ensemble (ESP) en scénarios probabilistes présente des limites importantes. Des biais significatifs sur les volumes prévus ont été observés, notamment en conditions extrêmes telles que les crues de printemps, compromettant la fiabilité des prévisions utilisées pour la prise de décision opérationnelle (Marinelli, 2007).

L'objectif général de cette étude est de développer une méthode qui améliore la cohérence temporelle et la précision en volume des scénarios probabilistes issus des prévisions hydrologiques d'ensemble (ESP) par rapport aux méthodes actuellement utilisées dans le processus opérationnel afin d'améliorer l'anticipation des volumes d'eau sur les horizons à court et long terme (15 à 120 jours).

Plus spécifiquement, ce travail vise à développer une méthode capable de mieux gérer les volumes prévus lors d'événements hydrologiques extrêmes, en étudiant des bassins versants représentatifs des réalités québécoises. L'analyse porte également sur la performance de cette méthode dans un contexte opérationnel.

Le mémoire est structuré de manière à répondre graduellement aux objectifs fixés : après une revue de littérature présentant le contexte théorique et les approches existantes, la méthodologie détaillée sera exposée, suivie des résultats obtenus par la nouvelle méthode en comparaison à la méthode actuellement employée. Enfin, une discussion approfondie permettra d'analyser ces résultats avant de conclure sur les contributions principales de l'étude et les perspectives pour des recherches futures.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

1.1 Contexte hydrique et importance stratégique au Québec

Le Québec se distingue par l'abondance et la diversité de ses ressources en eau, qui occupent près de 12 % de son territoire (MELCCFP, 2022). On y retrouve plus d'un million de lacs, de multiples rivières et de grands bassins hydrographiques, dont ceux de la Baie-James, de la Côte-Nord et du fleuve Saint-Laurent. Ce vaste réseau hydrographique soutient un large éventail d'activités socio-économiques, notamment l'approvisionnement en eau potable, l'agriculture, les loisirs nautiques et, surtout, la production d'hydroélectricité.

Historiquement, l'hydroélectricité représente la pierre angulaire du développement énergétique du Québec, fournissant environ 94 % de l'électricité consommée dans la province. Selon le Plan stratégique 2022-2026 d'Hydro-Québec, au moins 100 TWh additionnels d'énergie propre seront nécessaires afin d'atteindre la carboneutralité d'ici 2050 (Hydro-Québec, 2022). La modernisation des infrastructures existantes constitue donc une priorité, sachant que plusieurs centrales hydroélectriques ont été construites il y a plus de cinq décennies. Outre la sécurité et l'efficacité opérationnelle, cette modernisation vise à mieux répondre aux besoins énergétiques croissants et à soutenir la transition vers une économie plus sobre en carbone.

Malgré la richesse apparente des ressources hydriques, la gestion de l'eau au Québec se révèle complexe. En effet, la province connaît une forte variabilité saisonnière des précipitations, tant en quantité qu'en nature (pluie versus neige). Durant l'hiver, les accumulations neigeuses peuvent être substantielles, entraînant au printemps une fonte rapide et un apport d'eau important dans les bassins versants. Cette crue printanière, parfois extrême, a été présente de manière marquante lors des inondations de 2019, qui ont touché plus de 10 000 personnes

réparties dans 184 municipalités alors qu'elles étaient aggravées par des pluies abondantes et la fonte accélérée des neiges (MSP, 2022).

En contrepartie, l'été et le début de l'automne sont souvent caractérisés par des étiages prolongés. Les débits fluviaux peuvent alors chuter de manière significative, affectant la production hydroélectrique et l'approvisionnement en eau potable, ainsi que diverses activités économiques, comme l'agriculture ou le tourisme. Cette réalité est particulièrement marquée dans les grands bassins versants, où les étiages sont moins influencés par des événements pluvieux ponctuels. Dans des régions telles que le Saguenay–Lac-Saint-Jean ou la Côte-Nord, les gestionnaires doivent trouver un équilibre délicat entre le besoin de maintenir des niveaux d'eau suffisants pour répondre à la demande énergétique et la préservation des écosystèmes aquatiques. Cette tâche requiert une coordination étroite entre différents acteurs et l'utilisation d'outils de modélisation capables d'anticiper les fluctuations saisonnières.

À l'inverse, pendant l'été, la baisse marquée du débit des rivières impose une gestion particulièrement attentive pour maintenir la disponibilité de l'eau, essentielle à la production hydroélectrique ainsi qu'à divers autres usages tels que l'agriculture, les activités récréatives et l'approvisionnement en eau potable. Cette situation est particulièrement complexe au Québec, où les gestionnaires doivent constamment équilibrer la production énergétique avec la préservation des niveaux d'eau nécessaires pour respecter les contraintes environnementales.

Cette gestion complexe est accentuée par l'évolution prévue des conditions climatiques. Cette variabilité impose donc une gestion plus complexe des ressources hydriques pour favoriser l'optimisation la production hydroélectrique et la hausse de la demande associée à l'électrification des secteurs industriels et des transports. Cette optimisation est essentielle pour atteindre les objectifs québécois de réduction des émissions de gaz à effet de serre (Hydro-Québec, 2022).

1.2 Impacts des changements climatiques sur les régimes hydrologiques

Les changements climatiques modifient de manière significative les dynamiques hydrologiques à l'échelle du Québec. Les températures en hiver sont plus élevées et la hausse des précipitations liquides contribuent à une fonte plus précoce de la neige, avançant ainsi les crues printanières. De plus, les débits en hiver augmentent en raison de pluies plus fréquentes et plus intenses pendant cette saison, créant des perturbations des apports attendus tout au long de l'année.

Les périodes d'étiage en été ont tendance à se prolonger et à s'intensifier. Ce phénomène augmente la vulnérabilité des bassins versants et peut générer des sécheresses hydrologiques sur de longues périodes, contraignant la gestion des réservoirs, le respect des contraintes écologiques et l'approvisionnement en eau potable. Les projections climatiques indiquent d'autre part une augmentation de la fréquence et de l'intensité des précipitations extrêmes, provoquant des crues en été et en automne plus marquées. Ces crues peuvent être des événements rares ou modérés, en fonction des caractéristiques hydrologiques des régions concernées. Dans certaines régions, une hausse de plus de 25 % de l'ampleur de ces crues est attendue (MELCCFP, 2022).

Par ailleurs, plusieurs secteurs du Québec pourraient subir une réduction importante des débits moyens, particulièrement durant la période estivale, accentuant davantage les problèmes de sécheresse (MELCCFP, 2022). Cette transformation des régimes hydrologiques amène les gestionnaires à revoir l'exploitation des barrages et réservoirs, notamment en révisant les pratiques de gestion des crues et en prévoyant des marges de sécurité plus importantes face aux étiages prolongés. L'intégration de nouveaux outils de prévision hydrologique et la modernisation des infrastructures hydroélectriques, dont une grande partie nécessite une mise à niveau, figurent parmi les priorités établies dans le Plan stratégique d'Hydro-Québec (Hydro-Québec, 2022).

En somme, le contexte hydrologique québécois exige une approche de gestion adaptée pour faire face aux effets déjà présents des changements climatiques. Les défis associés à la variabilité saisonnière, combinés à l'arrivée de phénomènes extrêmes plus fréquents, impliquent une compréhension de ces impacts pour gérer de façon optimale les ressources hydriques québécoises. Dans ce contexte de changements, la prise en compte de l'incertitude est requise et l'utilisation de prévisions hydrologiques ensemblistes devient cruciale, permettant d'anticiper efficacement ces variations hydrologiques et de prendre des décisions éclairées permettant de gérer efficacement le risque (Cloke & Pappenberger, 2009).

1.3 Enjeux des prévisions hydrologiques d'ensemble (ESP)

Les prévisions hydrologiques d'ensemble (ESP) constituent une approche importante dans la gestion du risque en lien avec les prévisions hydrométéorologiques. Cette méthodologie permet la génération de plusieurs membres (scénarios hydrologiques), offrant une multitude de trajectoires susceptibles de se réaliser dans le futur (Cloke & Pappenberger, 2009). Cette diversité de scénarios fournit aux gestionnaires hydriques les moyens d'anticiper de manière plus complète les risques associés à la variabilité climatique ainsi qu'aux phénomènes extrêmes, comme les inondations et les sécheresses (Boucher, Tremblay, Delorme, Perreault, & Anctil, 2012). Dans les contextes opérationnels tels que la gestion des réservoirs, où une prise de décision optimale dépend fortement de la précision et la fiabilité des prévisions d'apport, l'utilisation des ESP contribue positivement à optimiser l'efficacité opérationnelle et économique des systèmes (Arsenault & Côté, 2019).

Toutefois, l'utilisation à opérationnelle des ESP est confrontée à plusieurs défis qui limitent leur plein potentiel d'utilisation pratique. Parmi ces défis, les biais systématiques et la sous-dispersion des ensembles sont habituellement présents. Les biais systématiques, se manifestant par une surestimation ou une sous-estimation régulière des débits observés, constituent une problématique récurrente pouvant conduire à des décisions opérationnelles inadéquates (Arsenault & Côté, 2019). La sous-dispersion correspond à un manque de variabilité des scénarios générés, causant ainsi une mauvaise représentation de l'ensemble des possibilités

réelles, particulièrement lors de situations hydrologiques extrêmes (Troin, Arsenault, Wood, Brissette, & Martel, 2021).

Face aux défis opérationnels en lien avec l'utilisation des ESP, plusieurs approches ont été développées pour améliorer leur efficacité. Ces prévisions présentent souvent des biais significatifs, affectant notamment leur moyenne et leur dispersion, ce qui limite leur utilité pour les gestionnaires hydriques (Arsenault, Brissette, & Martel, 2016a). Des techniques de post-traitement sont nécessaires pour corriger ces biais et réaligner les prévisions avec les observations, permettant d'augmenter leur fiabilité. Les méthodes les plus utilisées sont le pré-traitement statistique des ensembles météorologiques, le post-traitement statistique appliqué au niveau des sorties du modèle hydrologique, l'assimilation de données d'observation et la modification des variables d'états.

Le pré-traitement statistique des ensembles météorologiques peut s'effectuer en utilisant le « quantile mapping » (correction par quantiles), permettant de réaligner la climatologie des prévisions avec celle des observations. Cette méthode, simple d'application, corrige principalement les biais inconditionnels, mais demeure limitée pour les biais conditionnels (Verkade, Brown, Reggiani, & Weerts, 2013). D'autres approches telles que les statistiques de sorties d'ensembles de modèles (Ensemble Model Output Statistics; EMOS) permettent également une correction efficace des biais conditionnels en ajustant la moyenne et la dispersion des ensembles, permettant d'augmenter la fiabilité globale (Courbariaux, Barbillion, & Perreault, 2019). Ces méthodes sont applicables tant aux prévisions météorologiques alimentant le modèle hydrologique qu'aux sorties de celui-ci.

La correction directement au niveau du modèle hydrologique, via l'assimilation de données, permet une amélioration directe des conditions initiales du modèle en intégrant des observations à jour. Cette approche réduit l'incertitude initiale et améliore la précision des prévisions, en particulier à court terme (Thibault, Anctil, & Ramos, 2017). La méthode « Hindcast-mode Uncertainty Estimation (HUE) », quant à elle, corrige spécifiquement la sous-dispersion des ESP en introduisant une variabilité réaliste directement dans les conditions initiales du modèle hydrologique, comme l'équivalent en eau du manteau neigeux (Arsenault,

Brissette, & Martel, 2016a). Cette méthode permet une intégration des incertitudes tout en maintenant une cohérence essentielle entre conditions initiales et prévisions finales.

Un autre défi important lié à la complexité des prévisions ESP concerne la grande quantité d'informations qu'elles contiennent. Cette abondance d'informations, combinée à la diversité des scénarios possibles, peut rendre leur interprétation et leur intégration opérationnelle particulièrement difficiles pour les gestionnaires hydriques (Demeritt, Nobert,, Cloke, & Pappenberger, 2010). Ainsi, la capacité à traduire ces informations complexes en décisions concrètes demeure un enjeu majeur pour assurer une utilisation efficace des prévisions ESP dans les processus opérationnels.

Dans ce contexte, la transformation des ESP en scénarios probabilistes devient particulièrement pertinente. Cette transformation permet de simplifier l'interprétation des ensembles en fournissant des probabilités claires associées à des scénarios hydrologiques spécifiques, facilitant ainsi une prise de décision plus efficace et permettant de favoriser le temps de calcul lors du processus d'optimisation de la production.

1.4 Transformation des prévisions ensemblistes en scénarios probabilistes

1.4.1 Utilisation pratique des scénarios probabilistes en volume

La prévision hydrologique d'ensemble (ESP) produit plusieurs trajectoires équiprobables, plutôt qu'une seule prévision déterministe. Cet ensemble fournit une distribution probabiliste des volumes anticipés, souvent exprimée en probabilités de dépassement. Le défi opérationnel consiste à transformer ces prévisions d'ensemble en scénarios probabilistes en volume afin d'obtenir un hydrogramme représentatif. Concrètement, il s'agit de construire une série temporelle de débits dont le volume total sur la période ciblée correspond à un quantile précis de la distribution issue de la prévision d'ensemble (par exemple, scénario sec avec une probabilité de dépassement 85 % ou un scénario médian à 50 %). Ces scénarios facilitent l'interprétation opérationnelle des prévisions hydrologiques et permettent de tester rapidement des hypothèses à l'aide d'une seule série temporelle. Cette transformation répond principalement au besoin opérationnel des gestionnaires hydriques et utilisateurs non experts

d'interpréter efficacement les prévisions complexes générées par les ESP. Bien que les prévisions d'ensemble permettent de présenter l'incertitude, la quantité importante de données produites complique leur exploitation directe. Les scénarios probabilistes résument ces informations en un nombre restreint de membres représentatifs, favorisant la prise de décision. Les avantages opérationnels sont importants : réduction du temps de calcul nécessaire pour les modèles d'optimisation de production hydroélectrique, meilleure lisibilité des incertitudes et des risques, communication facilitée auprès des décideurs non experts et identification rapide des scénarios critiques pour la gestion hydrique.

Dans le contexte opérationnel d'Hydro-Québec, les gestionnaires hydriques privilégient typiquement les scénarios probabilistes correspondant aux quantiles forts, médians et faibles (15 %, 50 %, 85 %). Le scénario à 15 % représente un scénario « fort », associé à une faible probabilité de dépassement (volumes élevés), tandis que le scénario à 85 % représente un scénario « faible », indiquant des volumes anticipés moindres. Ces scénarios offrent un portrait équilibré des incertitudes, permettant une meilleure anticipation opérationnelle des événements extrêmes. Ces seuils sont utilisés depuis plus de 25 ans chez Hydro-Québec, car ils répondent aux exigences du processus opérationnel qui est basé sur une architecture patrimoniale. Leur sélection constitue un aspect important du processus opérationnel : « la sélection des scénarios probabilistes typiques (15 %, 50 %, 85 %) est un élément clé du système de prévision des apports utilisé par Hydro-Québec » (Mathieu, 2010). Enfin, dans la planification de la production hydroélectrique, la précision des volumes prévus est essentielle pour une gestion optimale des réservoirs. Toute erreur significative pourrait entraîner des pertes économiques, des risques opérationnels ou des impacts environnementaux négatifs. La prochaine section présente les approches méthodologiques disponibles pour réaliser cette transformation de manière fiable et opérationnelle.

1.4.2 Approches méthodologiques pour la génération de scénarios probabilistes en volume

Plusieurs essais ont préalablement été réalisés à l'interne pour résoudre les problématiques en lien avec la transformation des prévisions d'ensemble en scénarios probabilistes en volume.

Parmi les approches testées, certaines reposent sur des classements ou des traitements statistiques spécifiques des membres de prévisions, tandis que d'autres mettent en avant une reconstruction temporelle de l'hydrogramme pour assurer une cohérence d'ensemble.

Parmi ces approches, la méthode du « membre représentatif » repose sur un classement des membres de la prévision hydrologique d'ensemble selon leur volume cumulé total sur la période désirée. Le scénario choisi correspond directement au membre dont le volume total atteint le volume du quantile ciblé. Cette approche opérationnelle est simple et rapide à appliquer, tout en préservant intégralement la cohérence temporelle naturelle des scénarios initiaux. Toutefois, elle présente une flexibilité limitée, ne permettant pas la génération de scénarios intermédiaires au niveau temporel.

La méthode « Hydrogramme quantile point par point » consiste à déterminer indépendamment pour chaque pas de temps le débit correspondant au quantile désiré parmi l'ensemble des membres de prévision. Ainsi, l'hydrogramme final est construit en reliant ces points quantiles temporels successifs. Bien que cette approche garantisse un respect précis du quantile ciblé à chaque instant, elle présente un manque de cohérence globale, puisque chaque pas de temps est traité indépendamment, sans tenir compte de la continuité hydrologique naturelle.

La méthode « fréquentielle conditionnée » utilise directement la distribution des membres de la prévision hydrologique d'ensemble. Après avoir déterminé le volume ciblé, une pondération temporelle proportionnelle à la médiane temporelle des membres proches du quantile est effectuée. L'hydrogramme représentatif est ensuite reconstruit par interpolation temporelle pondérée entre ces membres. Cette approche permet de générer une série temporelle synthétique qui respecte une probabilité en volume en fin d'horizon.

En complément de ces méthodes, des approches telles que HMAPPORT et SynthEau présentent une similarité conceptuelle et méthodologique avec celles présentées. Ces méthodes seront détaillées plus spécifiquement dans la section 2.4.

1.5 Objectifs de la présente étude

L'objectif principal de ce mémoire est de développer, analyser et valider une nouvelle méthode nommée SynthEau, conçue pour synthétiser les prévisions hydrologiques d'ensemble et garantir une précision des quantiles probabilistes en volume. L'efficacité de SynthEau sera évaluée comparativement à la méthode HMAPPORT, qui est actuellement utilisée par Hydro-Québec dans le processus opérationnel de la planification de la production. Une analyse approfondie permettra ainsi d'évaluer le potentiel de SynthEau à améliorer significativement les scénarios probabilistes de volumes d'apports, offrant ainsi des bénéfices concrets à la planification hydrologique.

Cette étude permettra de répondre à d'autres questions de recherche: tout d'abord, comment SynthEau améliore-t-elle la précision des prévisions probabilistes de volume d'eau sur des périodes allant de 15 à 120 jours? Ensuite, quelle est l'efficacité comparative de SynthEau par rapport à HMAPPORT en matière de gestion des écarts de volume, notamment dans les bassins versants du Saint-Maurice et de La Grande? Finalement, quels bénéfices potentiels SynthEau peut-il apporter dans un contexte de gestion opérationnelle chez Hydro-Québec?

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE

Cette section présente les étapes ayant mené au développement de SynthEau ainsi que les démarches effectuées pour sa validation. La méthode SynthEau a pour objectif principal de générer des quantiles probabilistes de volumes d'apports en fonction des besoins de l'expert. Par exemple, si un gestionnaire hydrique demande un scénario avec une probabilité de dépassement de 50 % en volume sur un horizon donné, il faudrait être en mesure de le fournir en utilisant seulement la prévision hydrologique d'ensemble. Ces scénarios probabilistes en volume sont habituellement utilisés sur différents horizons, mais chaque scénario est généré sur un horizon fixe contraint par le processus opérationnel. Il est donc important de respecter le volume de la distribution des prévisions hydrologiques d'ensemble à tous les pas de temps, car ceux-ci peuvent être utilisés sur différents horizons. Ce chapitre présente le site à l'étude, les données utilisées et détaille les modèles utilisés et développés dans le cadre de cette étude.

2.1 Sites à l'étude

L'étude a été réalisée sur plusieurs bassins versants situés dans la province de Québec et qui sont gérés par Hydro-Québec, tels que les bassins versants de la rivière Saint-Maurice et du système hydrique La Grande. Ces bassins couvrent un vaste territoire allant du sud au nord du Québec, ce qui permet de représenter une diversité de régimes hydrologiques. Ils reflètent les conditions hydrologiques typiques de la province, caractérisées par une grande variabilité des précipitations et des débits selon les saisons, avec des périodes de crue au printemps et des étiages en été et en hiver. Ces sites ont été choisis pour représenter divers contextes hydrologiques et des défis opérationnels liés à la production d'énergie hydroélectrique. Les bassins versants sélectionnés incluent Taureau, La Tuque, Trenche, Beaumont, Manouane ABC et Gouin pour le système hydrique de la Saint-Maurice, ainsi que plusieurs autres dans le système de La Grande, tels que Eastmain 1 et La Grande 3. Les bassins sélectionnés ont été choisis en fonction de leur emplacement et de la nécessité d'avoir au moins 10 années de

données de disponibles. La liste des bassins sélectionnés est présentée dans le Tableau 2.1 pour le système hydrique de la Saint-Maurice et dans le Tableau 2.2.

Tableau 2.1 Bassins versants (8) à l'étude du système de la Saint-Maurice

Nom	Longitude (°)	Latitude (°)	Superficie (km²)
Taureau	-74,05	46,82	4054
La Tuque	-72,54	47,87	3499
Trenche	-73,05	48,36	3022
Beaumont	-73,50	47,37	2910
Manouane ABC	-74,17	47,47	3054
Gouin	-74,84	48,46	9477
Mékinac	-72,58	47,14	880
Grand-Mère	-73,05	47,09	5128

Tableau 2.2 Bassins versants (13) à l'étude du système de La Grande

Nom	Longitude (°)	Latitude (°)	Superficie (km²)
Eastmain 1	-72,92	52,26	25945
Lac Opinaca	-75,40	52,61	14460
La Grande 3	-73,77	53,34	28613
La Grande 2 et Lac Sakami	-76,37	53,56	31281
La Grande 1	-77,88	53,78	2141
La Grande 4	-71,31	53,55	28560
Caniapiscou	-68,71	53,76	37488
Laforge 1	-71,69	54,26	7483
Laforge 2	-70,66	54,60	1663
Rupert bief amont	-74,93	51,71	1984
Rupert bief aval	-75,14	51,96	895
Lac Mesgouez	-74,27	51,29	10299
Lac Mistassini	-72,83	51,19	18280

Une carte montrant la localisation des bassins versants est présentée à la Figure 2.1. Cette carte illustre le réseau hydrographique dense et complexe de la région de la Saint-Maurice et de La Grande Rivière. Chaque bassin versant est délimité à l'aide d'un polygone et son nom est affiché au centre. Le tracé en rouge des frontières de chaque système hydrique offre une visualisation de leur emplacement, permettant de visualiser les regroupements des différents

sites à l'étude. Le système hydrique de La Grande Rivière, situé au nord, est principalement composé de bassins régularisables, tandis que celui de la Saint-Maurice comprend majoritairement des bassins au fil de l'eau.



Figure 2.1 Localisation des bassins versants du système hydrique de La Grande et du Saint-Maurice

2.2 Données utilisées

Cette étude nécessite des données de divers types. Cette section présente les trois grandes catégories de données requises ainsi que le traitement appliqué pour les utiliser.

2.2.1 Données météorologiques journalières

Les données historiques de températures minimales et maximales, des précipitations sous forme de pluie et de neige ainsi que de l'équivalent en eau de la neige sont utilisées pour alimenter les modèles hydrologiques qui génèrent à leur tour des prévisions hydrologiques. Celles-ci sont observées aux stations météorologiques d'Hydro-Québec et ses partenaires du Réseau Météorologique Coopératif du Québec (RMCQ), sont interpolées spatialement en grille géoréférencée et ensuite moyennées pour chaque bassin versant. Cette archive débute en 1950 sur un pas de temps journalier et elle est continue dans le temps pour tous les bassins versants. Ces données sont utilisées pour calibrer le modèle HSAMI; décrit à la section 2.3 et par la suite pour générer les prévisions hydrologiques ensemblistes journalièrement lors du processus opérationnel de la planification de la production. La Figure 2.2 présente le système InterpolEau Consultation qui permet d'afficher les données météorologiques aux stations dans un système d'information géoréférencé. La Figure 2.3 montre la transposition de la grille météo aux bassins versants.

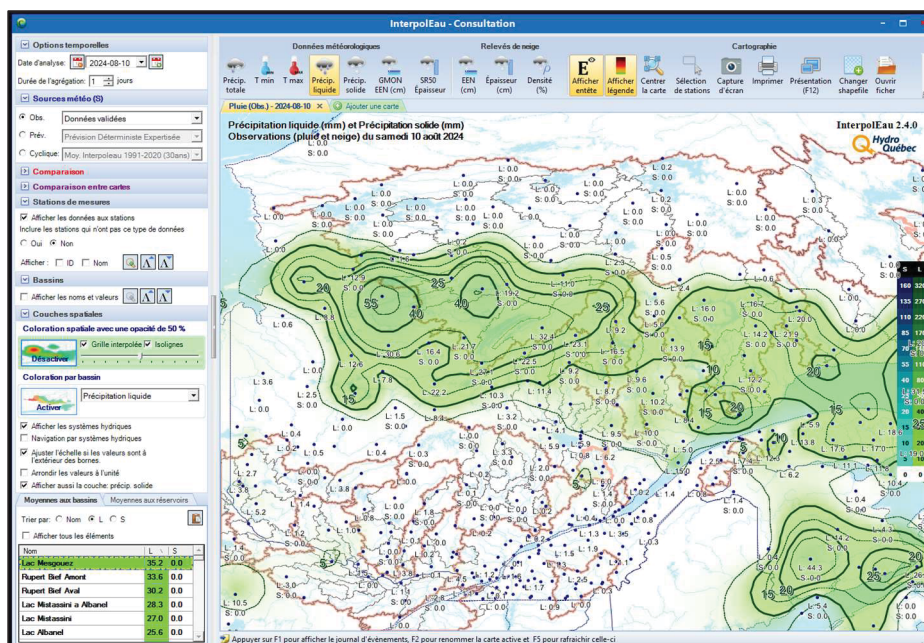


Figure 2.2 Système InterpolEau Consultation qui présente les données de précipitation aux stations pour le 10 août 2024

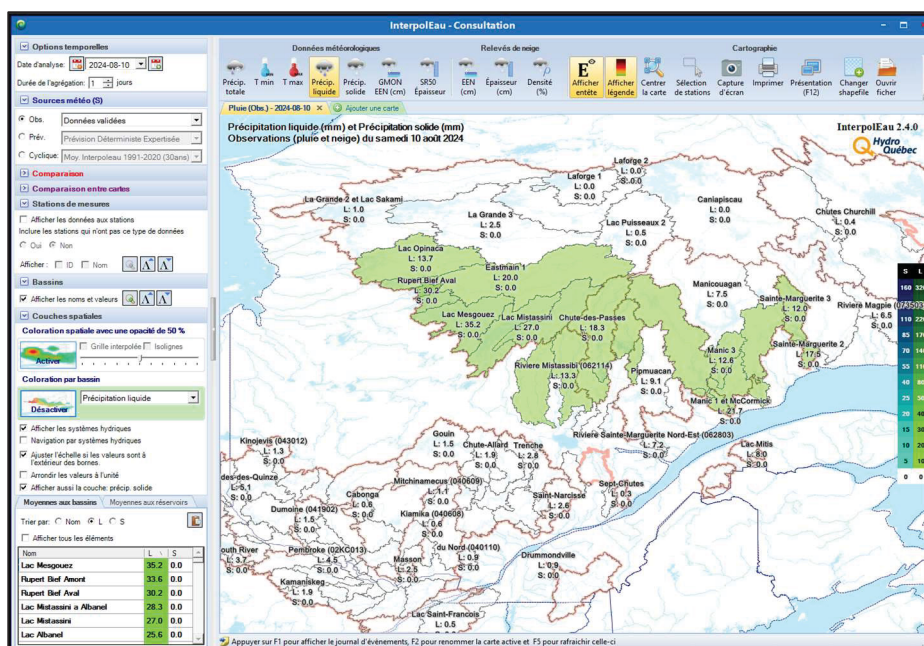


Figure 2.3 Système InterpolEau - Consultation présentant les moyennes aux bassins versants pour le 10 août 2024

2.2.2 Archives des prévisions journalières hydrologiques ensemblistes par bassin versant

Les prévisions hydrologiques d'ensemble ont été téléchargées à partir de l'archive de prévisions d'Hydro-Québec. Celles-ci ont été initialement générées à partir du modèle HSAMI développé par Fortin (1999), alimenté par des données météorologiques historiques ainsi que des prévisions météorologiques journalières déterministes expertisées, issues de plusieurs modèles de prévisions météorologiques. Le processus opérationnel permettant la génération d'une prévision météo expertisée, par un expert, a évolué avec le temps. À ce jour, les modèles de prévision météorologiques déterministes régional (RDPS) et global (GDPS) d'Environnement et Changement Climatique Canada (ECCC), ainsi que ceux du National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), notamment le « Nested Area Model » (NAM) et le « Global Forecasting System » (GFS), sont utilisés. Ces modèles sont exploités par l'expert et « habillés » à l'aide d'un post-traitement statistique basé sur les prévisions météorologiques d'ensemble du modèle du « European Center for Medium-Range Weather Forecasts » (ECMWF), afin de générer trois scénarios météorologiques prévus (15 %, 50 % et 85 %). Ce post-traitement permet de transposer statistiquement la variabilité de la distribution de l'ensemble sur le scénario expertisé pour générer un scénario fort et faible. Pour compléter son expertise, l'expert recommande un horizon de confiance en nombre de jours permettant d'alimenter le modelé hydrologique en début de prévision. La Figure 2.4 présente de diagramme conceptuel du processus opérationnel permettant de produire une prévision météorologique d'ensemble expertisée.

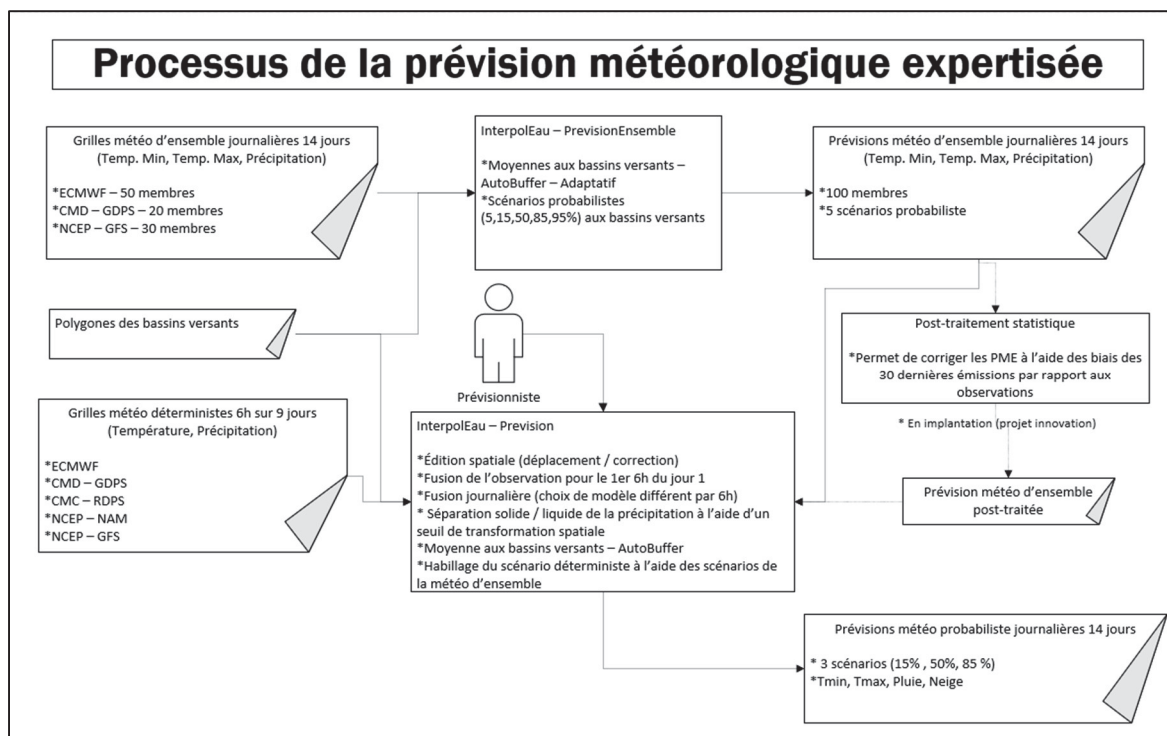


Figure 2.4 Diagramme du processus de la prévision météorologique expertisée

Avec ces intrants, le modèle hydrologique est en mesure de produire une prévision hydrologique d'ensemble ayant trois fois le nombre d'années d'historique de membres. À titre d'exemple, dans le processus opérationnel, une prévision effectuée en 2024 est formée d'un ensemble de 222 membres. Cet ensemble est créé en simulant chacun des trois scénarios météorologiques expertisés et prolongé temporellement en utilisant les données météorologiques historiques de 1950 à 2023, soit 74 années. Le tout sur un horizon fixe de 200 jours, permettant de couvrir les différents besoins temporels. La Figure 2.5 présente le diagramme conceptuel du processus de la prévision d'apport expertisée.

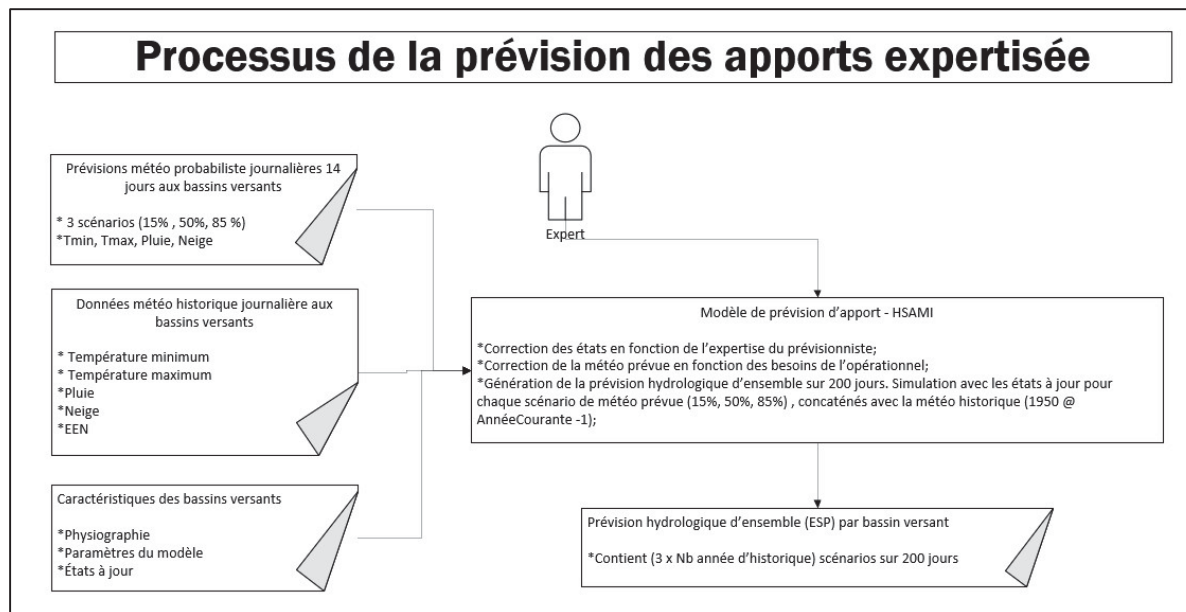


Figure 2.5 Diagramme conceptuel du processus de la prévision des apports expertisée

La Figure 2.6 illustre la distribution du nombre de prévisions hydrologiques d'ensemble disponibles dans l'archive pour les bassins versants des systèmes La Grande et Saint-Maurice (2005-2023). Elle permet de visualiser la quantité de prévisions disponibles pour chaque bassin versant, en fonction du système hydrique auquel ils appartiennent. Les bassins du système Saint-Maurice présentent un nombre moyen de prévisions plus élevé (6404) et plus homogène que ceux du système La Grande (4735). Cette différence s'explique en partie par la fréquence de mise à jour opérationnelle. Les prévisions pour les bassins versants au fil de l'eau de la Saint-Maurice nécessitent habituellement une fréquence de mise à jour plus élevée, car ces bassins sont plus réactifs aux événements météorologiques.

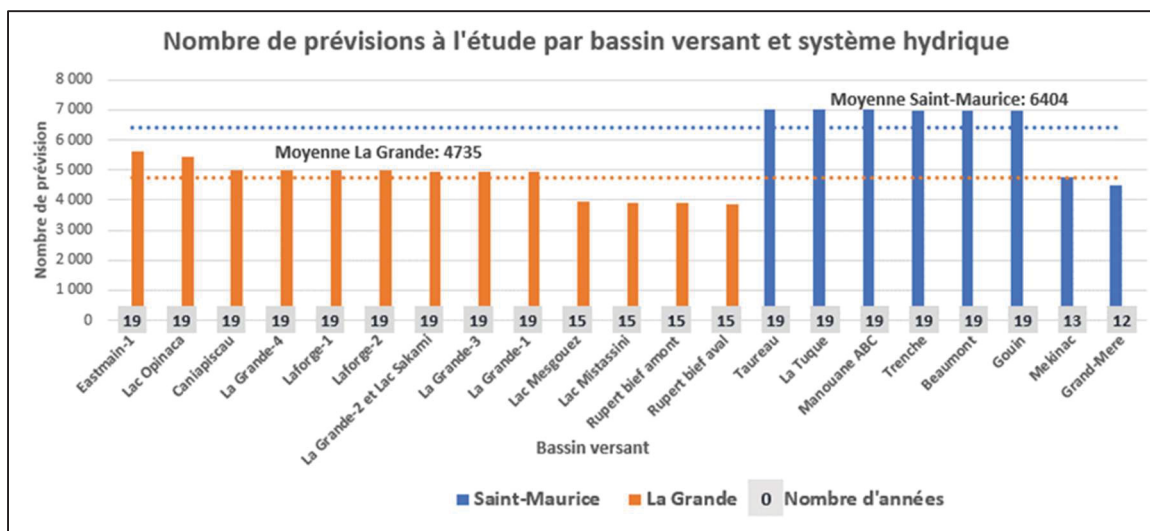


Figure 2.6 Nombre de prévisions archivées par bassin versant

2.2.3 Apports historiques journaliers par bassin versant

Les apports observés aux bassins versants sont nécessaires dans plusieurs contextes. Ces données sont spécifiques à chaque bassin versant et sont utilisées pour calibrer le modèle HSAMI. Elles sont aussi requises pour prolonger les prévisions hydrologiques produites par HSAMI au-delà de l'horizon de prévision basé sur la météorologie assurant ainsi une estimation des conditions hydrologiques sur le long terme en se basant sur la climatologie hydrologique. Enfin, elles seront seulement utilisées pour valider le biais et la fiabilité des scénarios probabilistes. Pour l'ensemble des bassins versants du parc de production, Hydro-Québec possède une archive complète des débits historiques journaliers, couvrant la période du 1er janvier 1950 à aujourd'hui. Ces apports historiques ont été reconstitués et harmonisés par des experts à l'aide de plusieurs méthodes : en utilisant des stations hydrométriques, des méthodes de régionalisation, des simulations à l'aide d'un modèle hydrologique ou simplement à l'aide du bilan hydrique. Ainsi, Hydro-Québec dispose d'une série d'apports historiques journaliers couvrant 75 ans pour l'ensemble des bassins versants.

2.3 Modèle hydrologique HSAMI

Le modèle hydrologique HSAMI, développé par Hydro-Québec, est un modèle conceptuel météo-apport basé sur un système de réservoirs linéaires, conçu pour simuler les débits naturels vers un réservoir ou à l'exutoire d'un bassin versant (Fortin, 1999). Il utilise des données météorologiques telles que la pluie, la neige, les températures minimales et maximales, et l'ensoleillement pour prévoir les apports hydriques. Ce modèle opère sur une base discrète, intégrant des impulsions filtrées par des hydrogrammes unitaires pour simuler les écoulements à court et moyen terme.

Initialement programmé en PL/1 et utilisé sur un mainframe IBM, HSAMI a évolué pour inclure une version en C++ et une version MATLAB. Ces différentes versions sont utilisées dans plusieurs processus, facilitant l'expérimentation et l'utilisation à l'opérationnel.

Le modèle se décompose en trois réservoirs principaux qui simulent les flux hydriques : un réservoir de surface, un réservoir intermédiaire, et un réservoir de zone saturée. La fonte de la neige est modélisée via une méthode degré-jour, avec prise en compte du gel et dégel du sol, ainsi que de la précipitation directe au réservoir (Fortin, 1999).

2.4 Modèles de transformation des prévisions hydrologiques d'ensemble en scénarios probabilistes en volume

Cette section présente le modèle actuellement utilisé opérationnellement chez Hydro-Québec (HMAPPORT) pour transformer les prévisions hydrologiques d'ensemble en scénarios probabilistes en volume. Il présente aussi la méthode développée (SynthEau) pour corriger les lacunes de la méthode existante.

2.4.1 Modèle HMAPPORT

HMAPPORT est un modèle statistique conçu pour transformer des prévisions hydrologiques d'ensemble en scénarios probabilistes. Utilisé comme référence, il sera comparé de manière

approfondie avec SynthEau afin d'évaluer la précision, la robustesse et la cohérence des volumes prévus par chacune des méthodes. Cette comparaison vise à identifier les différences de performance, à mettre en évidence le biais et à proposer des améliorations pour une utilisation optimale en contexte opérationnel. Le processus de HMAPPORT repose sur plusieurs étapes successives de traitement des données. Comme illustré à la Figure 2.7, les prévisions hydrologiques d'ensemble présentées à la section 2.2.2 constituent l'intrant principal du modèle. De plus, on doit également spécifier les quantiles souhaités ainsi que l'horizon de prévision. Faute de documentation officielle décrivant ce modèle, sa compréhension repose seulement sur l'analyse du code source et d'expérimentations pratiques accompagnées d'experts dans le domaine d'affaires.

La première étape consiste à calculer la médiane des apports prévus pour chaque pas de temps à partir de la prévision d'ensemble. Cette médiane sert de valeur centrale pour l'ensemble du traitement. Un filtrage numérique de type « Finite Impulse Response » (FIR), est ensuite appliqué afin d'éliminer les anomalies et lisser la médiane. Ce filtre numérique est basé sur une convolution pondérée avec un vecteur symétrique de 10 coefficients, permettant d'atténuer les hautes fréquences (Ambardar, 2003). Afin de préserver la pointe de crue, la valeur maximale avant filtrage est conservée et repositionnée sur l'hydrogramme médian filtré.

L'hydrogramme synthétique obtenu après filtrage sert de référence pour redistribuer les volumes probabilistes souhaités. Le modèle cumule ensuite les apports prévus de chaque membre de l'ensemble jusqu'à l'horizon spécifié afin de constituer un échantillon de volumes cumulés. Cet échantillon est ensuite ajusté à l'aide d'une distribution de Pearson Type III, une approche adaptée à la modélisation des événements extrêmes en hydrologie, tels que les crues et les périodes de faibles débits. Cette distribution permet de mieux représenter la variabilité asymétrique des apports hydrologiques (Bobée & Robitaille, 1977).

Le volume total estimé est redistribué temporellement autour de l'hydrogramme synthétique préalablement déterminé, assurant ainsi une représentation temporelle moyenne des apports tout en respectant le volume global prévu à la fin de la période. De plus, pour affiner la

précision des scénarios probabilistes à court terme, HMAPPORT remplace les 20 premiers pas de temps par des prévisions empiriques issues de la distribution initiale des prévisions hydrologiques d'ensemble.

Toutefois, l'utilisation de l'hydrogramme médian employée par HMAPPORT produit uniquement une dynamique temporelle moyenne et peu importe le volume prévu. Les scénarios probabilistes auront donc la même forme que la médiane. Cette méthode ne permet pas de représenter fidèlement l'évolution réelle des débits au cours du temps et se limitant essentiellement au respect du volume total prévu en fin de prévision. À titre d'exemple, la Figure 2.8 présente la prévision hydrologique d'ensemble (ton de gris) et les scénarios probabilistes à un volume de dépassement 15% (rouge), 50 % (bleu) et 85% (vert), émis le 12 mars 2024 sur 200 jours pour le bassin versant Caniapiscou.

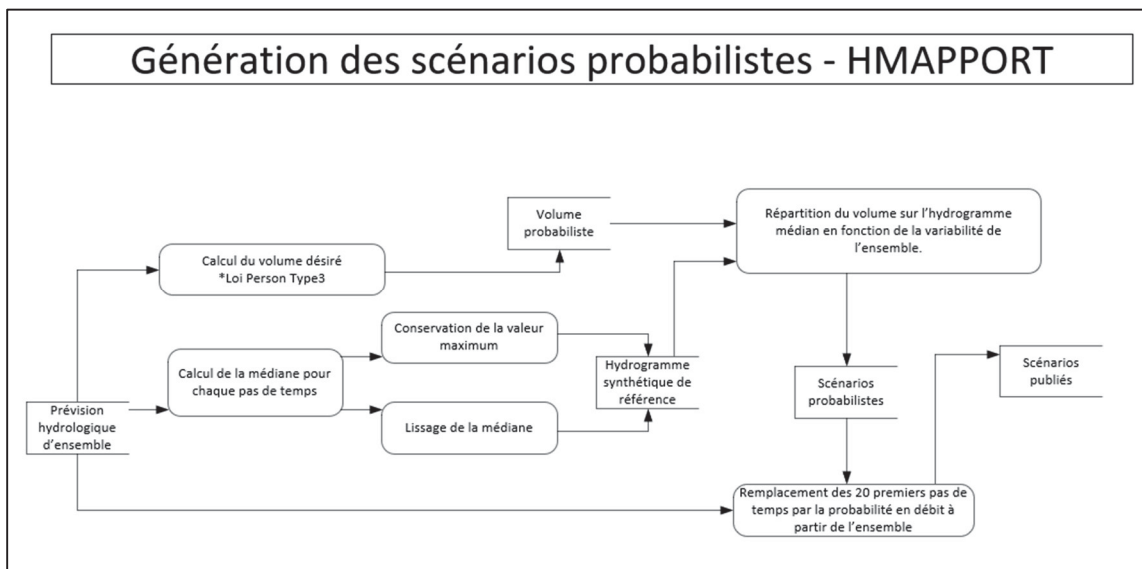


Figure 2.7 Diagramme conceptuel du modèle HMAPPORT

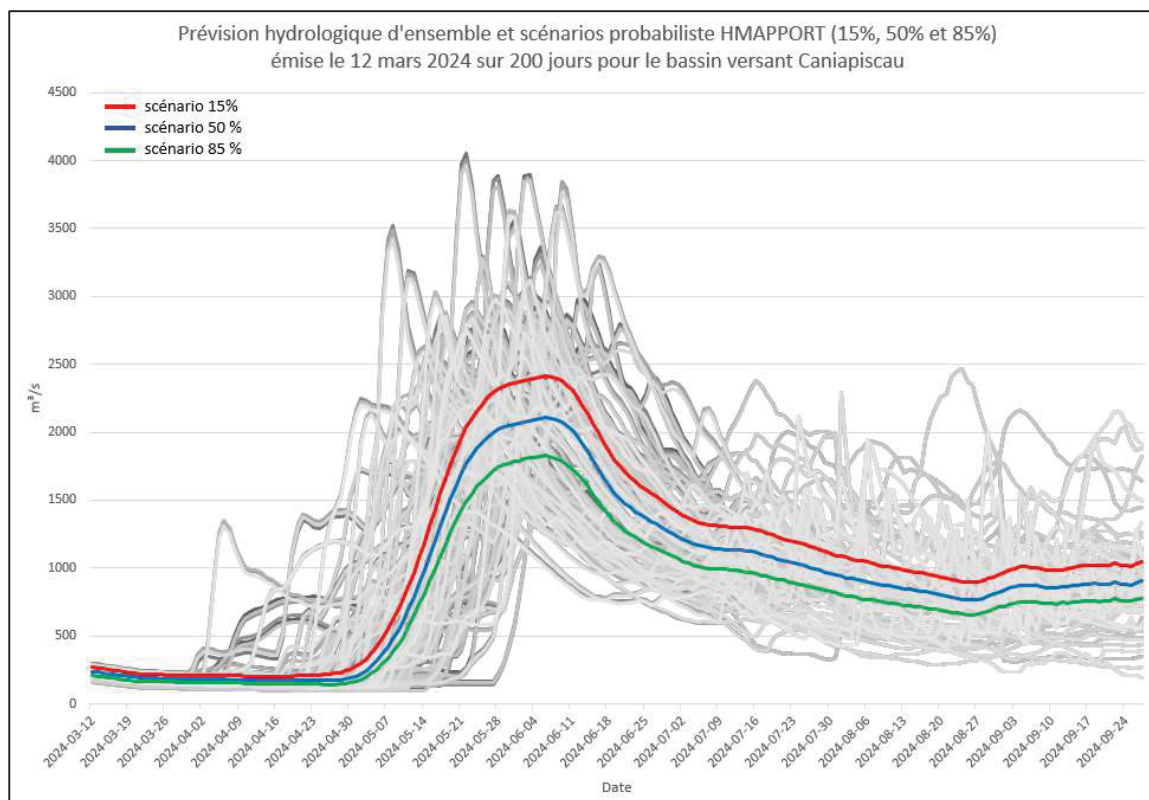


Figure 2.8 Prévision hydrologique d'ensemble et scénarios HMAPPORT émis le 12 mars 2024 sur 200 jours pour le bassin versant Caniapiscou

2.4.2 Modèle SynthEau

SynthEau est un modèle développé dans cette étude pour transformer les prévisions hydrologiques d'ensemble en scénarios probabilistes en volume, tout en garantissant la conservation du volume hydrique à chaque pas de temps de l'horizon considéré, corrigeant une limitation de HMAPPORT. Ce modèle se distingue par sa capacité à préserver la cohérence temporelle en volume des prévisions en tout pas de temps et non pas seulement jusqu'à la fin de l'horizon, assurant ainsi une représentation plus fidèle des dynamiques hydrologiques. Cette approche permet d'améliorer la prise de décision en gestion hydrique, notamment dans les contextes d'incertitude liés aux variations climatiques et aux périodes de crue.

Le processus de SynthEau est illustré à la Figure 2.9 et repose sur plusieurs étapes méthodiques de traitement des données. Comme pour HMAPPORT, les prévisions ensemblistes

hydrologiques servent d'intrant principal du modèle. De plus, on doit également spécifier les quantiles souhaités ainsi que l'horizon de prévision.

La première étape du processus consiste à cumuler chaque membre de l'ensemble en volume, générant ainsi des séries en volume cumulé qui représentent l'accumulation des apports hydrologiques au fil du temps. À partir de ces séries cumulées, une distribution de Pearson Type III est utilisée pour extraire les quantiles spécifiques à chaque pas de temps, permettant de garantir une estimation probabiliste en volume en tout point.

Une fois les quantiles extraits, ces séries probabilistes cumulées sont décumulées afin de retrouver des valeurs instantanées, en débit, pour chaque pas de temps. Ce processus est essentiel pour produire des scénarios probabilistes réalistes, représentant différentes trajectoires possibles des apports hydrologiques. Des valeurs négatives peuvent apparaître à cette étape en raison d'imprécisions numériques ou de faibles variations entre deux pas de temps consécutifs dans la série cumulée. Une validation supplémentaire est effectuée pour s'assurer que toutes les valeurs générées sont cohérentes sur le plan hydrologique : les valeurs négatives sont détectées et éliminées, car elles n'ont pas de sens physique dans ce contexte. Enfin, on utilise la même méthode de filtrage que celle employée dans est utilisé dans HMAPPORT et présentée à la section 2.4.1 pour lisser le résultat, afin d'éliminer le bruit introduit lors de l'étape de décumul. À titre d'exemple, la Figure 2.10 présente la prévision hydrologique d'ensemble (ton de gris) et les scénarios probabilistes à un volume de dépassement 15% (rouge), 50 % (bleu) et 85% (vert), émis le 12 mars 2024 sur 200 jours pour le bassin versant Caniapiscou.

L'approche adoptée par SynthEau permet ainsi une meilleure prise en compte des incertitudes et offre une fiabilité accrue dans le cadre opérationnel de la gestion hydrique.

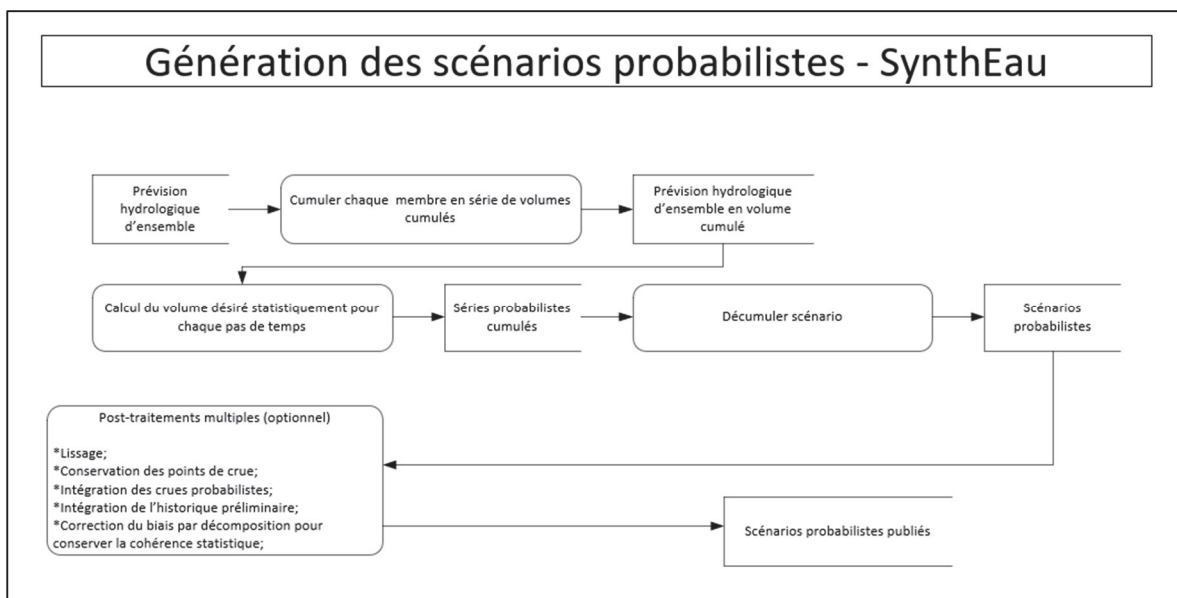


Figure 2.9 Diagramme conceptuel du modèle SynthEau

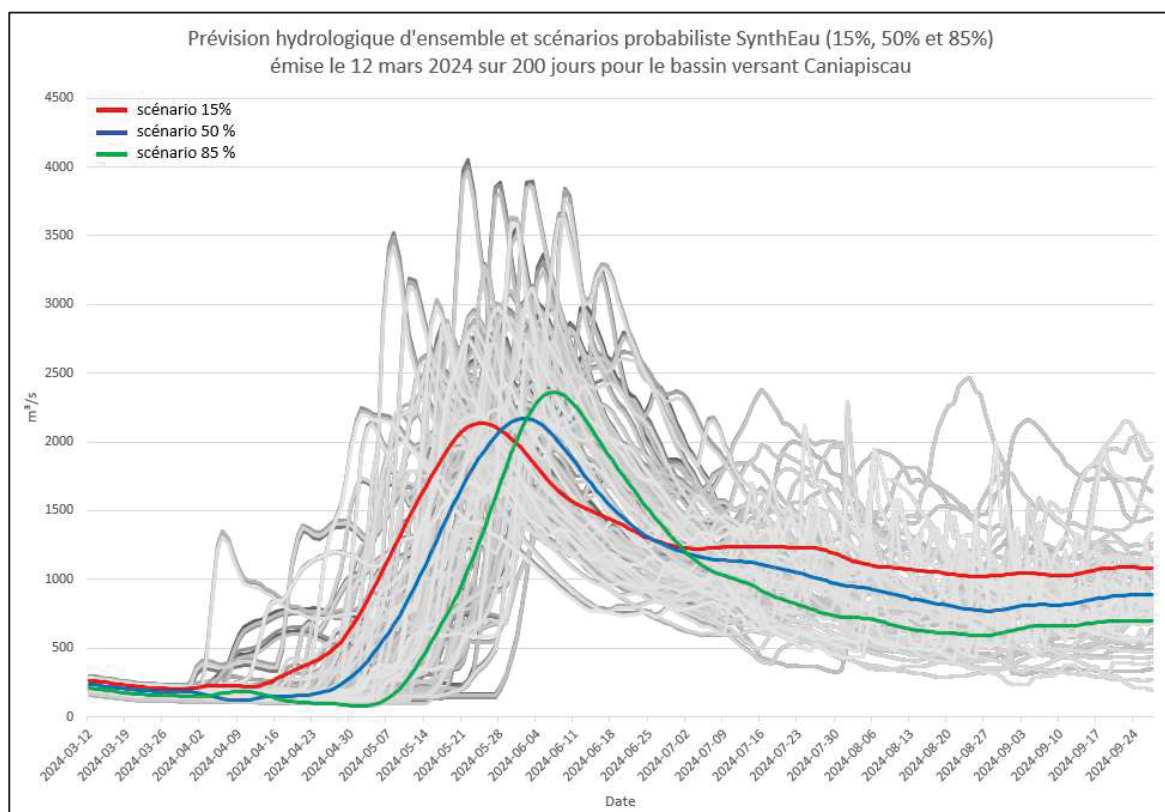


Figure 2.10 Prévision hydrologique d'ensemble et scénarios probabilistes SynthEau émis le 12 mars 2024 sur 200 jours pour le bassin versant Caniapiscau

2.5 Métriques d'évaluation et de vérification de la qualité

Pour évaluer la qualité des scénarios probabilistes générés par SynthEau, l'approche suivante a été utilisée : pour toutes les prévisions réalisées entre 2005 et 2023 durant la période de crue, les scénarios représentant les volumes aux seuils de 15 %, 50 % et 85 % de probabilité de dépassement ont été générés à la fois avec SynthEau et HMAPPORT sur un horizon de 200 jours pour simuler le même comportement que le processus opérationnel. Pour des horizons intermédiaires de 15, 30, 60 et 120 jours, le volume cumulé a été extrait et comparé aux volumes empiriques de la distribution ensembliste. Cette méthode a permis d'analyser en profondeur la précision des volumes prévus, en mettant en évidence la capacité des deux approches à représenter fidèlement la variabilité hydrologique à différents horizons. Cette analyse a été essentielle pour identifier les biais potentiels et comprendre comment chaque méthode se comporte dans des conditions variées, notamment lors des périodes de crue, où les dynamiques hydrologiques peuvent différer considérablement.

L'évaluation de la qualité des scénarios probabilistes est une composante cruciale pour garantir des décisions éclairées en matière de gestion des ressources en eau. Les prévisions hydrologiques doivent non seulement être précises, mais aussi refléter la variabilité naturelle de l'environnement afin de permettre une gestion proactive et efficace. C'est pourquoi il a été nécessaire de comparer SynthEau à HMAPPORT sur une large période historique et sur différents horizons temporels. Cette comparaison vise à déterminer quelle méthode offre les meilleures garanties en termes de fiabilité des prévisions, tout en s'assurant que les incertitudes sont correctement intégrées dans les scénarios générés.

Les métriques utilisées pour cette évaluation sont présentées dans les sous-sections suivantes.

2.5.1 Calcul des scénarios en volume

Les scénarios probabilistes à 15 %, 50 %, et 85 % ont été générés à partir des prévisions hydrologiques ensemblistes sur un horizon fixe de 200 jours et évalués sur différents horizons

(15, 30, 60 et 120 jours). Cette étape garantit que les scénarios représentent correctement la distribution des prévisions en termes de volumes sur plusieurs horizons. L'objectif est de s'assurer que la méthode capture non seulement les valeurs centrales, mais aussi les variations potentielles, afin que les scénarios reflètent toute l'étendue des possibilités hydrologiques pour chaque horizon temporel étudié. Cela permet aux gestionnaires d'avoir une vision précise des scénarios les plus probables, mais aussi des scénarios extrêmes qui pourraient survenir.

2.5.2 Calcul des quantiles empiriques

Cette étape consiste à extraire le volume empirique des prévisions hydrologiques d'ensemble pour les quantiles et les horizons étudiés. Cette métrique permet de comparer les volumes générés par SynthEau et HMAPPORT aux volumes empiriques, afin de mesurer la précision des méthodes. L'idée est de vérifier si les volumes intermédiaires simulés correspondent bien à ce qui pourrait être attendu statistiquement, dans la prévision hydrologique d'ensemble qui est utilisé comme intrant. Cela est particulièrement important pour évaluer si la méthode permet de bien répartir le volume intermédiaire des scénarios générés.

2.5.3 Calcul du biais

Consiste à mesurer la tendance systématique des prévisions à surestimer ou sous-estimer les volumes d'eau. Le biais est un indicateur pour vérifier l'absence de distorsions entre les scénarios probabilistes et les volumes prévus par la distribution ensembliste. De plus, un calcul du biais a également été effectué par rapport aux observations réelles, présentées à la section 2.2.3, afin de mesurer la tendance des prévisions à s'écarter des volumes observés sur le terrain. Cela permet d'identifier les éventuels ajustements nécessaires pour améliorer les modèles de prévision, en tenant compte des différences entre les prévisions théoriques et la réalité observée. Le biais peut également être étudié pour différents types de bassins versants afin de voir si certaines caractéristiques influencent la précision des prévisions de manière systématique.

2.5.4 Génération des diagrammes de fiabilité

Ces diagrammes illustrent les écarts entre les volumes prévus et les quantiles probabilistes attendus (15 %, 50 %, 85 %) pour les différents horizons étudiés. Ils fournissent une visualisation claire de la fiabilité et de la cohérence des scénarios probabilistes, permettant d'évaluer la performance des méthodes en situation opérationnelle. Les diagrammes de fiabilité sont particulièrement utiles pour détecter visuellement des biais et comprendre la dynamique de la méthode en situation réelle. Par exemple, si les prévisions tendent à systématiquement surestimer les volumes dans certaines situations, cela apparaîtra clairement dans ces diagrammes, permettant ainsi aux gestionnaires de prendre des mesures correctives en amont.

Ces métriques ont été choisies parce qu'elles offrent une évaluation complète de la précision et de la fiabilité des scénarios probabilistes, tant en termes de représentation des volumes que de préservation de la variabilité hydrologique. Le processus méthodique d'évaluation par étapes garantit une comparaison entre SynthEau et HMAPPORT, mettant de l'avant les forces et les faiblesses de chaque méthode à différents horizons temporels. En effectuant des comparaisons sur une grande variété de situations hydrologiques, il est possible d'identifier les conditions dans lesquelles chaque méthode excelle ou, au contraire, présente des limitations. Cette approche globale vise non seulement à quantifier les performances, mais aussi à comprendre en profondeur les mécanismes sous-jacents à chaque modèle de prévision.

Ainsi, l'évaluation par métriques multiples permet de s'assurer que les prévisions hydrologiques probabilistes sont conformes aux prévisions hydrologiques d'ensemble, ce qui est essentiel pour la gestion efficace des ressources en eau. La capacité des modèles à maintenir une précision élevée sur des horizons longs et à refléter correctement la variabilité naturelle est essentielle pour la planification et la prise de décision en matière de gestion des bassins versants. En identifiant les biais et en évaluant la fiabilité à l'aide de diagrammes et de comparaisons avec des observations réelles, il est possible d'améliorer continuellement les méthodes et de garantir une meilleure performance dans un cadre opérationnel.

2.6 Implémentation et comparaison des modèles

2.6.1 Implémentation des modèles et choix des périodes d'étude

L'implémentation des modèles SynthEau et HMAPPORT repose sur l'utilisation de prévisions hydrologiques d'ensemble couvrant une période d'au moins dix ans pour chaque bassin versant étudié, comme détaillé à la Figure 2.6. Chaque prévision ensembliste est composée de plusieurs membres, représentant différentes trajectoires possibles du débit futur en fonction des incertitudes météorologiques tel que présenté dans la section 2.2.2.

Afin d'évaluer de manière représentative la capacité des modèles à générer des scénarios probabilistes pertinents, les simulations ont été réalisées sur un horizon fixe de 200 jours, tel qu'à l'opération et analysées sur différents sous-horizons de prévision, allant de 15 à 120 jours. Les prévisions à moyen terme, couvrant 15 à 30 jours, sont particulièrement utiles pour la gestion opérationnelle au fil de l'eau, tandis que les prévisions à plus long terme, atteignant 120 jours, facilitent une planification plus stratégique, notamment pour la gestion des réservoirs et des variations saisonnières. Une même prévision ensembliste a été utilisée pour générer ces différents scénarios afin d'assurer une cohérence dans l'analyse des résultats à travers les différentes échelles de temps.

La sélection des périodes d'étude a été déterminée en fonction des moments où la gestion des volumes d'eau est la plus complexe. L'identification de ces fenêtres temporelles repose sur une analyse des tendances historiques des crues, réalisée en agrégeant les débits des bassins versants d'un même système hydrique. Cette démarche permet de repérer les périodes où les variations des écoulements sont les plus marquées et où l'impact des prévisions sur la prise de décision est le plus significatif.

La Figure 2.11 et la Figure 2.12 présentent ces tendances et permettent d'illustrer la variabilité des débits sur les périodes critiques. Cette analyse a conduit à la sélection de fenêtres temporelles distinctes pour chaque système hydrique. Pour La Grande Rivière, les prévisions émises entre le 1^{er} avril et le 30 juin ont été retenues, car cette période est marquée par des

fluctuations hydrologiques importantes qui influencent directement les décisions de gestion des crues. La Figure 2.11 met en évidence ces variations en illustrant les apports historiques journaliers depuis l'année 1950. Pour le système hydrique de la Saint-Maurice, la période du 1^{er} mars au 31 mai a été sélectionnée, car elle correspond à une augmentation rapide des débits annonçant le début des crues printanières. La Figure 2.12 présente l'évolution des crues moyennes historiques ainsi que la répartition des pointes annuelles observées. Pour obtenir le même portrait par bassin versant, il est possible de consulter les figures présentées comme celles aux systèmes hydriques en ANNEXE III.

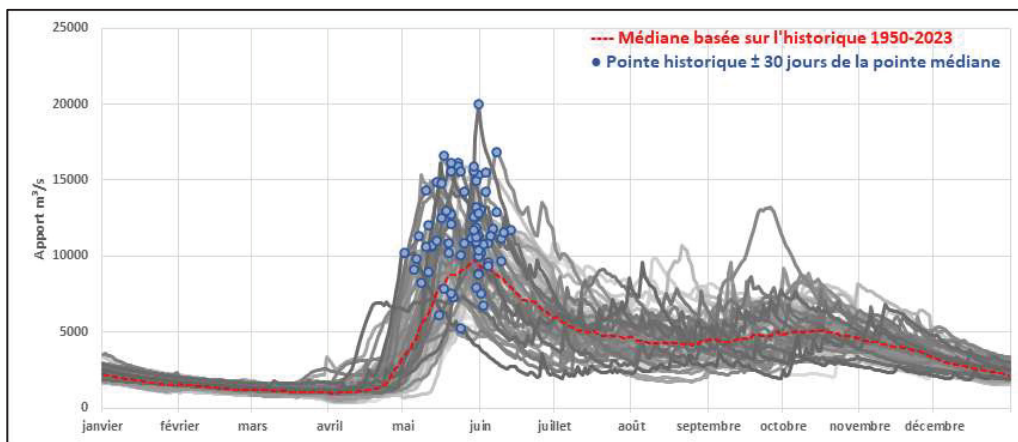


Figure 2.11 Apports historiques journaliers 1950 à 2023 pour le système hydrique de La Grande

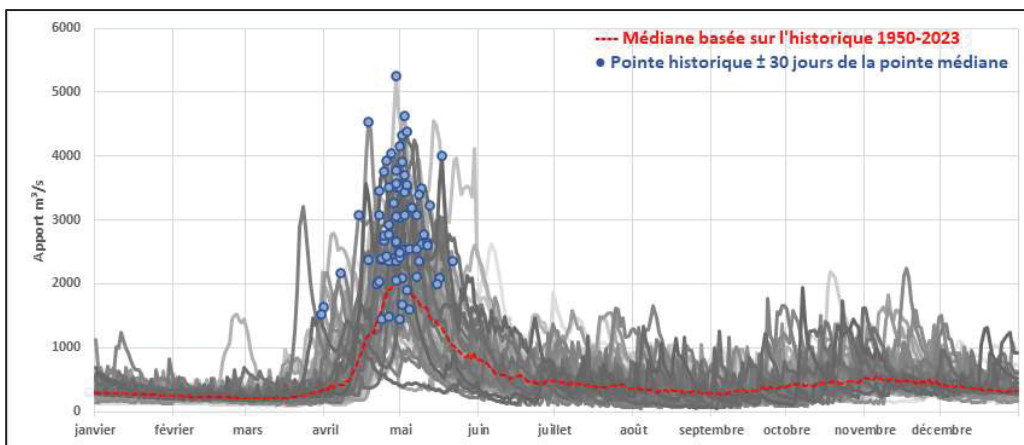


Figure 2.12 Apports historiques journaliers 1950 à 2023 pour le système hydrique de la Saint-Maurice

2.6.2 Comparaison des modèles

L'évaluation de SynthEau et HMAPPORT repose sur la méthodologie décrite à la section 2.5, qui présente les différentes métriques utilisées pour analyser la qualité des scénarios probabilistes générés. Ces métriques permettent d'examiner la fidélité des volumes prévus aux distributions ensemblistes et de quantifier les biais susceptibles d'affecter la précision des prévisions.

Le modèle SynthEau a été développé dans le but de corriger certaines limitations identifiées dans HMAPPORT, tout en conservant l'utilisation de la loi de Pearson Type III pour l'extraction des quantiles de volume. Cette distribution statistique, largement utilisée en hydrologie, a démontré son efficacité dans la représentation des apports hydrologiques et a donc été conservée dans l'implémentation de SynthEau afin de garantir une continuité méthodologique avec les approches existantes dans le processus opérationnel.

L'une des principales différences entre ces deux modèles réside dans la répartition des volumes prévus au fil du temps. HMAPPORT présente une incohérence dans la manière dont les volumes cumulés sont distribués à travers l'horizon de prévision. Cette discordance est particulièrement visible en période de crue, où la variabilité accrue des prévisions ensemblistes peut engendrer des écarts significatifs entre le volume cumulé en fin d'horizon et sa répartition au début du scénario probabiliste. Ces écarts introduisent des biais susceptibles d'affecter la précision des scénarios probabilistes générés, rendant leur interprétation plus difficile en contexte opérationnel.

SynthEau a été conçu pour remédier à cette problématique en s'assurant que la répartition des volumes respecte fidèlement les volumes cumulés à chaque pas de temps. Contrairement à HMAPPORT, qui applique une redistribution des volumes basée sur un hydrogramme médian, SynthEau utilise une approche par accumulation des membres de l'ensemble afin de générer des séries en volume. Une fois ces séries cumulées obtenues, une distribution de Pearson Type III est appliquée pour extraire les quantiles de volume souhaités. Par la suite, une procédure de

décumulation permet de retrouver des valeurs instantanées, garantissant ainsi une cohérence temporelle et une meilleure correspondance entre les prévisions ensemblistes et les scénarios probabilistes produits.

CHAPITRE 3

RÉSULTATS

3.1 Introduction

Ce chapitre présente une analyse comparative des performances des modèles SynthEau et HMAPPORT selon trois aspects distincts : l'erreur relative moyenne sur les volumes prévus, la comparaison des erreurs des scénarios médians par rapport aux volumes observés, et la fiabilité des scénarios probabilistes.

L'objectif est d'évaluer la précision des volumes prévus, de quantifier l'impact des biais dans les prévisions et de mesurer la robustesse des scénarios générés pour différents bassins versants. Par ailleurs, il est essentiel de préciser que l'évaluation de la méthode SynthEau repose sur une hypothèse fondamentale selon laquelle la prévision ensembliste est supposée parfaite, sans correction ni ajustement des prévisions brutes. L'objectif de cette étude n'est donc pas d'établir une comparaison directe entre les scénarios probabilistes et les observations réelles, mais plutôt de vérifier si le volume prévu dans le scénario probabiliste respecte la distribution imposée par la prévision hydrologique d'ensemble afin de minimiser les impacts dans l'intégration au processus opérationnel.

La validation repose ainsi sur plusieurs vérifications. Il s'agit d'évaluer si les volumes prévus respectent bien les quantiles probabilistes de la prévision hydrologique d'ensemble, garantissant que chaque scénario conserve fidèlement l'information contenue dans la distribution des prévisions. De plus, ces volumes doivent rester cohérents à chaque pas de temps et suivre la dynamique volumétrique des prévisions hydrologiques d'ensemble, sans introduire de biais structurel.

Dans cette optique, la notion de période d'entraînement et de période de test ne s'applique pas de manière traditionnelle. En effet, SynthEau n'est pas un modèle d'apprentissage basé sur les

observations passées, mais plutôt une méthode permettant de transformer la distribution probabiliste d'entrée en scénarios hydrologiques cohérents.

3.2 Comparaison des performances des erreurs relatives moyennes sur les volumes prévus

3.2.1 Erreurs relatives moyennes sur les volumes prévus pour le Saint-Maurice

La Figure 3.1 présente le pourcentage d'erreur moyen du volume cumulé des méthodes SynthEau et HMAPPORT par rapport au quantile empirique de la distribution ensembliste, sur plusieurs horizons de prévision (15, 30, 60 et 120 jours) et pour les quantiles (15 %, 50 % et 85 %). Les figures détaillées pour chaque bassin versant sont disponibles en ANNEXE I.

Dans la partie gauche du graphique, il est possible d'observer les erreurs associées à SynthEau. Quels que soient l'horizon de prévision et le quantile, les erreurs restent relativement faibles et proches de zéro, indiquant une bonne correspondance entre les volumes prévus et le quantile empirique ensembliste.

En revanche, la partie droite du graphique montre que HMAPPORT présente des erreurs globalement plus élevées. Notamment, à l'horizon de 30 jours, l'erreur pour le quantile 85 % dépasse 10 %, traduisant une surestimation des volumes à cette échéance. De plus, des erreurs significatives apparaissent pour le quantile 15 %, démontrant un biais important et une incertitude accrue dans les prévisions.

L'analyse détaillée des distributions d'erreur présentée dans le Tableau 3.1 indique que HMAPPORT tend à surestimer les volumes prévus dans les situations extrêmes (fort ou faible), tandis que SynthEau maintient une précision plus constante, indépendamment du quantile analysé.

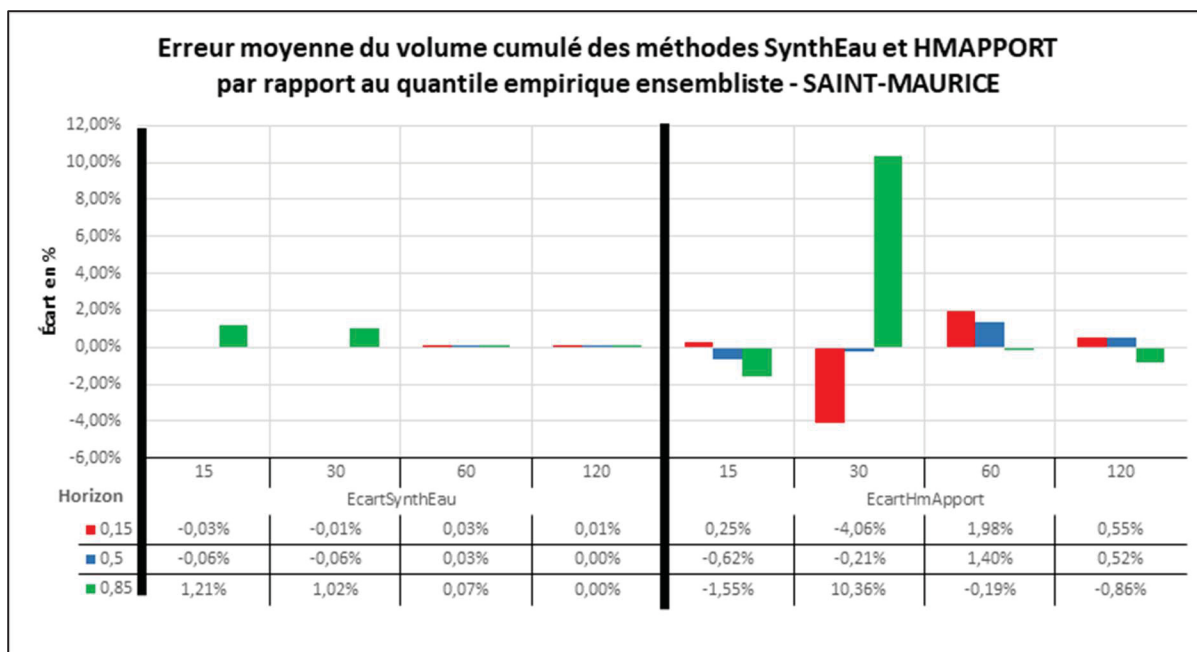


Figure 3.1 Erreur moyenne du volume cumulé des méthodes SynthEau et HMAPPORT par rapport au quantile empirique ensembliste pour les bassins versants du la Saint-Maurice

Tableau 3.1 Synthèse de l'erreur moyenne du volume cumulé par rapport au quantile empirique ensembliste pour les bassins versants de la Saint-Maurice

	SynthEau				HMAPPORT			
Horizon:	15	30	60	120	15	30	60	120
Scénario 15 %	-0,03%	-0,01%	0,03%	0,01%	0,25%	-4,06%	1,98%	0,55%
Beaumont	0,07%	0,03%	0,02%	0,01%	0,08%	-3,70%	1,44%	0,50%
Gouin	-0,23%	-0,09%	0,01%	0,00%	1,12%	-4,92%	0,58%	-0,14%
Grand-Mère	-0,17%	-0,05%	0,00%	-0,02%	0,47%	-3,71%	2,41%	-0,74%
La Tuque	0,07%	0,04%	0,03%	0,01%	0,82%	-2,52%	2,80%	1,00%
Manouane ABC	-0,01%	0,01%	0,04%	0,01%	-0,48%	-5,44%	1,29%	1,64%
Mekinac	0,05%	0,01%	0,02%	0,00%	1,60%	0,29%	3,97%	-0,30%
Taureau	0,03%	0,00%	0,04%	0,01%	-1,25%	-5,41%	2,55%	1,07%
Trenche	-0,12%	-0,01%	0,03%	0,01%	0,19%	-5,58%	1,55%	0,59%
Scénario 50 %	-0,06%	-0,06%	0,03%	0,00%	-0,62%	-0,21%	1,40%	0,52%
Beaumont	0,00%	-0,02%	0,03%	0,00%	-0,63%	-0,59%	1,48%	0,64%
Gouin	-0,18%	-0,12%	0,00%	-0,01%	0,03%	1,14%	1,47%	0,33%
Grand-Mère	-0,11%	-0,05%	0,02%	-0,01%	-0,64%	0,76%	3,26%	1,42%
La Tuque	0,00%	0,00%	0,04%	0,01%	-0,89%	-0,96%	0,81%	0,30%
Manouane ABC	-0,01%	-0,07%	0,06%	0,01%	-0,54%	-0,92%	0,70%	0,15%
Mekinac	-0,06%	-0,03%	0,02%	-0,01%	-1,72%	-0,01%	1,87%	1,57%
Taureau	-0,03%	-0,08%	0,04%	0,00%	-0,06%	-0,71%	0,93%	-0,29%
Trenche	-0,14%	-0,06%	0,04%	0,01%	-0,85%	0,05%	1,51%	0,69%
Scénario 85 %	1,21%	1,02%	0,07%	0,00%	-1,55%	10,36%	-0,19%	-0,86%
Beaumont	1,62%	0,59%	0,07%	0,00%	-0,24%	7,51%	-0,13%	-0,73%
Gouin	0,47%	-0,03%	0,03%	0,00%	-2,68%	9,07%	2,36%	0,31%
Grand-Mère	-0,43%	-3,32%	0,05%	-0,01%	-2,41%	10,97%	-0,23%	-0,61%
La Tuque	0,85%	0,18%	0,06%	0,01%	-1,56%	4,58%	-2,34%	-1,68%
Manouane ABC	5,39%	5,83%	0,13%	0,01%	1,31%	21,43%	-0,97%	-1,67%
Mekinac	0,43%	0,51%	0,02%	-0,01%	-3,14%	6,97%	-1,50%	-1,66%
Taureau	1,33%	1,41%	0,10%	0,00%	-1,52%	10,62%	0,41%	-0,43%
Trenche	-0,85%	1,24%	0,08%	0,01%	-2,99%	10,86%	0,48%	-0,56%

3.2.2 Erreurs relatives moyennes sur les volumes prévus pour La Grande

La Figure 3.2 présente les erreurs relatives moyennes pour le système hydrique de La Grande. De manière similaire à la Saint-Maurice, SynthEau affiche des erreurs faibles et stables, avec des écarts majoritairement inférieurs à 0,5 %. HMAPPORT, quant à lui, présente des erreurs plus marquées, notamment à l'horizon de 30 jours, avec une erreur de plus de 6 % pour le quantile 85 %. SynthEau démontre une performance plus régulière et une précision accrue par rapport à HMAPPORT, qui affiche des erreurs plus importantes et une variabilité marquée sur certains horizons et quantiles.

Un examen des erreurs absolues permet de constater que les performances de HMAPPORT sont particulièrement sensibles aux conditions hydrologiques exceptionnelles, où les erreurs augmentent significativement. SynthEau, en revanche, présente une meilleure résistance aux extrêmes, ce qui suggère une robustesse accrue dans des conditions d'incertitude élevée. Le détail des résultats par bassin versant est présenté dans le Tableau 3.2.

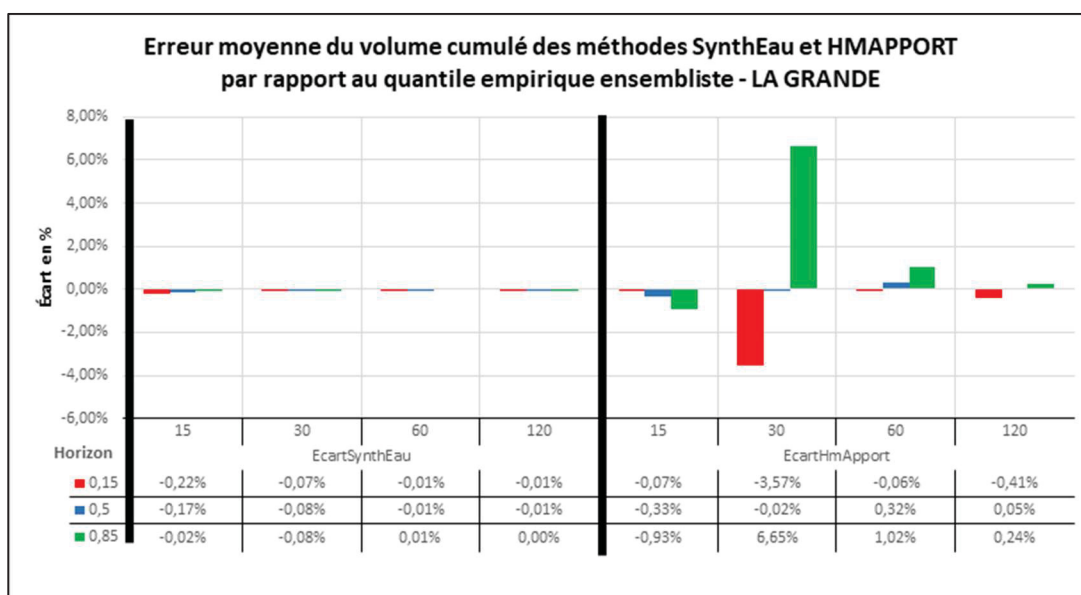


Figure 3.2 Erreur moyenne du volume cumulé d'apport attendu SynthEau et HMAPPORT pour les bassins versants de La Grande

Tableau 3.2 Synthèse de l'erreur moyenne du volume cumulé par rapport au quantile empirique ensembliste pour les bassins versants de La Grande

Horizon:	SynthEau				HMAPPORT			
	15	30	60	120	15	30	60	120
Scénario 15 %	-0,22%	-0,07%	-0,01%	-0,01%	-0,07%	-3,57%	-0,06%	-0,41%
Caniapiscou	-0,29%	-0,09%	0,00%	0,00%	-1,03%	-7,57%	-0,34%	-0,16%
Eastmain-1	-0,23%	-0,04%	-0,01%	0,00%	0,41%	-2,24%	1,06%	-0,47%
La Grande-1	-0,36%	-0,12%	-0,02%	-0,01%	-1,30%	-6,90%	-2,88%	-0,22%
La Grande-2 et Lac Sakami	-0,19%	-0,07%	-0,02%	-0,01%	-0,66%	-2,85%	1,49%	0,75%
La Grande-3	-0,17%	-0,04%	-0,01%	0,00%	0,27%	-2,32%	1,05%	-0,30%
La Grande-4	-0,13%	-0,03%	0,00%	0,00%	0,42%	-2,06%	1,05%	-0,34%
Lac Mesgouez	-0,13%	-0,02%	0,00%	0,00%	0,29%	-1,67%	-0,05%	-0,85%
Lac Mistassini	-0,18%	-0,04%	-0,01%	-0,01%	0,26%	-2,95%	0,07%	0,46%
Lac Opinaca	-0,21%	-0,06%	-0,02%	-0,01%	0,30%	-3,00%	0,75%	-0,22%
Laforge-1	-0,27%	-0,11%	-0,03%	-0,01%	-0,68%	-4,85%	-0,52%	-0,60%
Laforge-2	-0,27%	-0,11%	-0,03%	-0,01%	-0,68%	-4,85%	-0,52%	-0,60%
Rupert bief amont	-0,23%	-0,10%	-0,02%	-0,01%	1,27%	-1,65%	-1,47%	-2,12%
Rupert bief aval	-0,21%	-0,07%	-0,02%	-0,02%	0,72%	-2,48%	-1,22%	-1,05%
Scénario 50 %	-0,17%	-0,08%	-0,01%	-0,01%	-0,33%	-0,02%	0,32%	0,05%
Caniapiscou	-0,25%	-0,12%	0,00%	0,00%	-0,68%	-1,90%	-0,38%	0,14%
Eastmain-1	-0,20%	-0,05%	0,00%	0,00%	-0,50%	0,61%	0,86%	0,02%
La Grande-1	-0,26%	-0,13%	0,00%	-0,01%	-0,66%	0,04%	0,26%	0,42%
La Grande-2 et Lac Sakami	-0,14%	-0,08%	-0,01%	-0,01%	-0,20%	-0,15%	0,18%	0,12%
La Grande-3	-0,14%	-0,06%	0,00%	0,00%	-0,45%	0,21%	0,29%	0,29%
La Grande-4	-0,07%	-0,04%	0,01%	0,00%	-0,13%	0,00%	0,11%	-0,20%
Lac Mesgouez	-0,13%	-0,03%	0,00%	0,00%	-0,45%	0,08%	0,10%	-0,02%
Lac Mistassini	-0,16%	-0,05%	0,00%	0,00%	-0,55%	-0,25%	0,19%	0,21%
Lac Opinaca	-0,16%	-0,06%	-0,01%	-0,01%	-0,63%	0,17%	1,15%	-0,10%
Laforge-1	-0,20%	-0,12%	-0,02%	-0,01%	-0,02%	-0,08%	0,25%	0,13%
Laforge-2	-0,20%	-0,12%	-0,02%	-0,01%	-0,02%	-0,08%	0,25%	0,13%
Rupert bief amont	-0,15%	-0,07%	-0,01%	-0,01%	0,00%	0,96%	0,78%	-0,52%
Rupert bief aval	-0,16%	-0,07%	-0,01%	-0,01%	0,08%	0,24%	-0,08%	-0,07%
Scénario 85 %	-0,02%	-0,08%	0,01%	0,00%	-0,93%	6,65%	1,02%	0,24%
Caniapiscou	-0,13%	-0,18%	0,00%	0,00%	-0,13%	11,60%	1,30%	-0,30%
Eastmain-1	0,00%	-0,05%	0,01%	0,00%	-0,60%	7,25%	0,61%	0,46%
La Grande-1	0,80%	0,00%	0,04%	0,00%	-0,70%	10,53%	2,32%	0,02%
La Grande-2 et Lac Sakami	-0,11%	-0,11%	0,00%	-0,01%	-1,13%	4,24%	-2,25%	-1,56%
La Grande-3	-0,08%	-0,08%	0,01%	0,00%	-0,72%	6,54%	0,47%	0,91%
La Grande-4	-0,02%	-0,05%	0,01%	0,00%	-0,98%	3,49%	0,09%	-0,04%
Lac Mesgouez	-0,13%	-0,04%	0,01%	0,00%	-0,84%	4,81%	0,92%	1,15%
Lac Mistassini	-0,11%	-0,06%	0,01%	0,00%	-0,98%	5,81%	1,16%	0,31%
Lac Opinaca	-0,09%	-0,09%	0,00%	0,00%	-0,80%	7,68%	0,79%	-0,41%
Laforge-1	-0,14%	-0,13%	-0,01%	0,00%	-0,64%	8,07%	2,89%	1,02%
Laforge-2	-0,14%	-0,13%	-0,01%	0,00%	-0,64%	8,07%	2,89%	1,02%
Rupert bief amont	-0,02%	-0,02%	0,01%	0,00%	-2,37%	2,93%	2,13%	0,53%
Rupert bief aval	-0,10%	-0,06%	0,00%	-0,01%	-2,21%	3,07%	-0,03%	0,38%

3.3 Comparaison des erreurs du volume prévu du scénario médian par rapport au volume réel

Cette section présente les résultats des erreurs entre les volumes prévus par les scénarios médians de SynthEau et HMAPPORT par rapport aux volumes observés. Le scénario 50 % a été sélectionné, car il est plus juste de le comparer avec les observations, représentant la valeur médiane des prévisions, ce qui permet de mieux refléter la tendance centrale des données et de minimiser l'influence des extrêmes. Ces résultats, présentés dans le Tableau 3.3 couvrent différents horizons de prévision, notamment 15, 30, 60, et 120 jours, et concernent les systèmes hydriques de La Grande et de la Saint-Maurice, tel que détaillé dans les prochaines sections.

3.3.1 Erreurs du volume prévu du scénario médian par rapport au volume réel pour La Grande

Selon la Figure 3.3, SynthEau et HMAPPORT présentent des performances pratiquement identiques sur l'ensemble des horizons étudiés. Par exemple, pour La Grande-1, les erreurs pour les horizons de 60 jours et 120 jours montrent des valeurs similaires, avec une surestimation des volumes de 54.4 % et 55.3 % pour SynthEau, et de 55.6 % et 56.0 % pour HMAPPORT respectivement. Ces résultats indiquent que l'influence principale sur les erreurs provient des prévisions ensemblistes elles-mêmes, et non des différences entre les deux méthodes.

Sur l'ensemble du système hydrique de La Grande, les différences entre SynthEau et HMAPPORT sont minimales, ce qui permet de conclure que les deux méthodes sont alignées en termes de performance. Cette similitude est positive, car les deux modèles utilisent la même source de données de prévision, confirmant ainsi la cohérence des résultats.

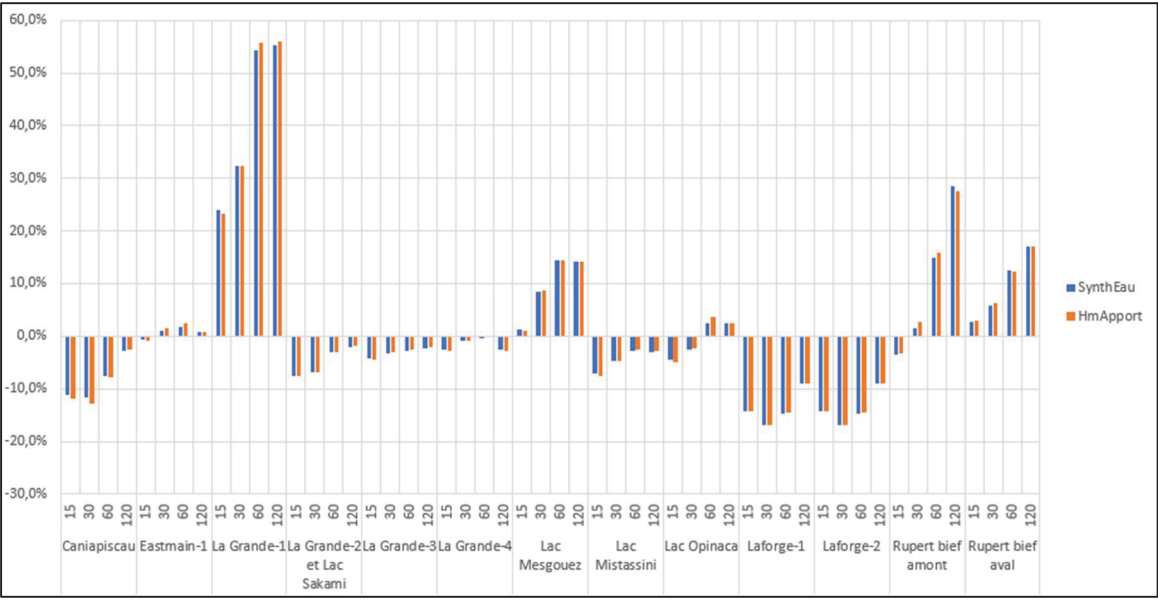


Figure 3.3 Erreur du volume prévu du scénario médian par rapport au volume réel pour le système hydrique La Grande

3.3.2 Erreurs du volume prévu du scénario médian par rapport au volume réel pour le Saint-Maurice

Selon la Figure 3.4, les erreurs de volume pour le système Saint-Maurice montrent également une convergence entre les deux méthodes. Par exemple, pour Beaumont et Gouin, les erreurs de prévision restent similaires pour les horizons courts, avec des différences négligeables. Pour l'horizon de 120 jours, les erreurs de SynthEau (7.8 %) et de HMAPPORT (8.4 %) convergent vers des performances quasi identiques, ce qui souligne que les deux méthodes sont influencées de manière comparable par la qualité des prévisions hydrologique d'ensemble.

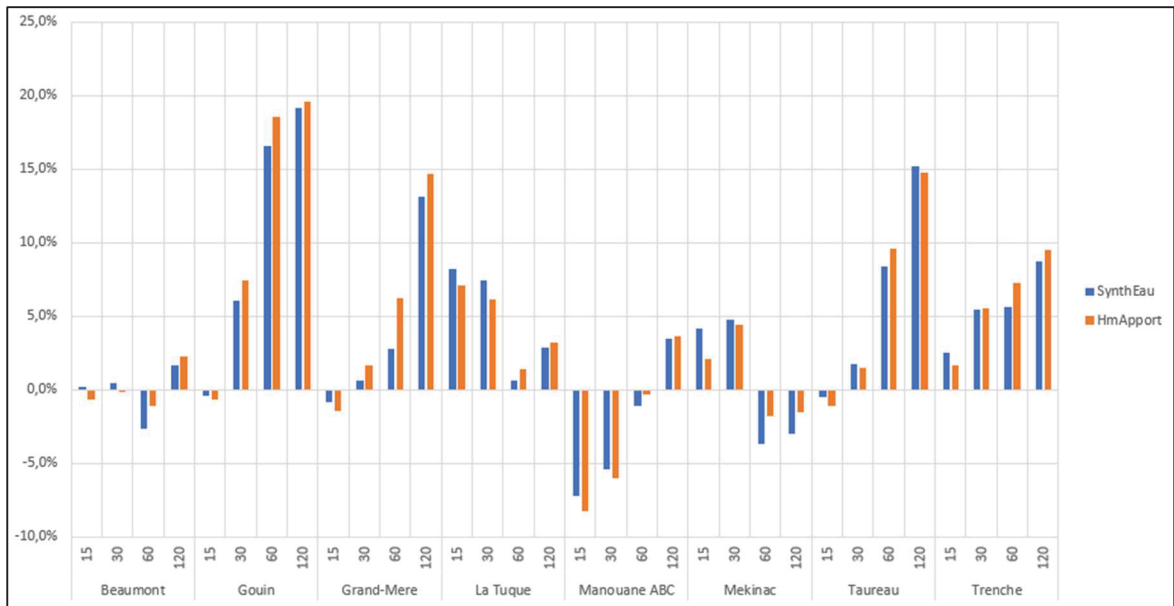


Figure 3.4 Erreur du volume prévu du scénario médian par rapport au volume réel pour le système hydrique de la Saint-Maurice

Tableau 3.3 Comparaison des erreurs du volume prévu du scénario médian
par rapport au volume réel

	SynthEau				HMAPPORT			
Horizon (jours):	15	30	60	120	15	30	60	120
LA GRANDE	-3,3%	-1,4%	3,7%	6,1%	-3,6%	-1,3%	4,1%	6,1%
Caniapiscau	-11,2%	-11,5%	-7,6%	-2,7%	-11,8%	-12,9%	-7,8%	-2,6%
Eastmain-1	-0,7%	1,0%	1,7%	0,7%	-1,0%	1,6%	2,6%	0,7%
La Grande-1	24,1%	32,4%	54,4%	55,3%	23,2%	32,4%	55,6%	56,0%
La Grande-2 et Lac Sakami	-7,5%	-6,8%	-3,1%	-2,0%	-7,6%	-6,8%	-2,9%	-1,9%
La Grande-3	-4,1%	-3,2%	-2,8%	-2,3%	-4,5%	-3,0%	-2,5%	-2,0%
La Grande-4	-2,6%	-0,8%	-0,4%	-2,7%	-2,7%	-0,8%	-0,3%	-2,9%
Lac Mesgouez	1,4%	8,5%	14,4%	14,2%	1,0%	8,6%	14,4%	14,1%
Lac Mistassini	-7,2%	-4,6%	-2,9%	-3,1%	-7,6%	-4,8%	-2,7%	-2,9%
Lac Opinaca	-4,5%	-2,6%	2,5%	2,5%	-4,9%	-2,2%	3,6%	2,4%
Laforge-1	-14,3%	-17,0%	-14,8%	-9,1%	-14,2%	-16,8%	-14,5%	-8,9%
Laforge-2	-14,3%	-17,0%	-14,8%	-9,1%	-14,2%	-16,8%	-14,5%	-8,9%
Rupert bief amont	-3,6%	1,4%	14,9%	28,4%	-3,4%	2,6%	15,8%	27,7%
Rupert bief aval	2,7%	5,9%	12,4%	17,0%	3,1%	6,2%	12,3%	17,0%
SAINT-AURICE	0,7%	2,6%	3,6%	7,8%	-0,2%	2,5%	5,2%	8,4%
Beaumont	0,2%	0,5%	-2,7%	1,6%	-0,6%	-0,2%	-1,1%	2,3%
Gouin	-0,4%	6,1%	16,6%	19,2%	-0,7%	7,4%	18,5%	19,6%
Grand-Mere	-0,9%	0,6%	2,8%	13,1%	-1,5%	1,6%	6,2%	14,7%
La Tuque	8,2%	7,4%	0,6%	2,8%	7,0%	6,2%	1,4%	3,2%
Manouane ABC	-7,2%	-5,4%	-1,1%	3,5%	-8,2%	-6,0%	-0,3%	3,6%
Mekinac	4,1%	4,7%	-3,7%	-3,0%	2,1%	4,4%	-1,8%	-1,5%
Taureau	-0,5%	1,8%	8,4%	15,2%	-1,1%	1,5%	9,6%	14,7%
Trenche	2,5%	5,5%	5,6%	8,7%	1,6%	5,5%	7,2%	9,5%

3.4 Fiabilité des scénarios probabilistes

Cette section présente les résultats de l'analyse de la fiabilité des scénarios probabilistes à 15%, 50%, et 85% pour les méthodes SynthEau et HMAPPORT, couvrant différents horizons de prévision (15, 30, 60, et 120 jours). Les graphiques de fiabilité montrent le pourcentage d'occurrences correspondant à chaque quantile prévu, permettant d'évaluer si les scénarios générés reflètent la fréquence attendue. En ANNEXE II, la liste des figures par bassin versant est présentée.

3.4.1 Fiabilité des scénarios pour le système hydrique La Grande

La Figure 3.5, qui présente les diagrammes de fiabilité pour le système hydrique de La Grande, montre que les scénarios à 15%, 50%, et 85% présentent des divergences par rapport aux fréquences attendues. Pour le scénario à 15% (en rouge), les deux méthodes montrent des occurrences comprises entre 25% et 35%, indiquant une surestimation de l'occurrence des événements extrêmes. Cette tendance est observée de manière similaire pour SynthEau et HMAPPORT, sans différence marquée entre les méthodes, ce qui suggère que l'influence de la prévision ensembliste est le facteur déterminant.

Pour le scénario à 50% (en bleu), les deux méthodes montrent des occurrences proches de 50% sur les horizons courts (15 et 30 jours), mais une légère diminution est notée sur les horizons plus longs (60 et 120 jours), avec des valeurs autour de 54% à 56%. Cela reflète une difficulté à maintenir la fiabilité médiane sur des horizons plus éloignés, en raison de l'incertitude accrue des prévisions.

Le scénario à 85% (en vert) montre une fiabilité plus proche de la valeur attendue, avec des occurrences comprises entre 78 % et 83 % pour SynthEau et HMAPPORT. Les deux méthodes présentent des résultats similaires, ce qui indique une bonne représentation des événements les plus fréquents, bien que des variations légères apparaissent sur certains horizons.

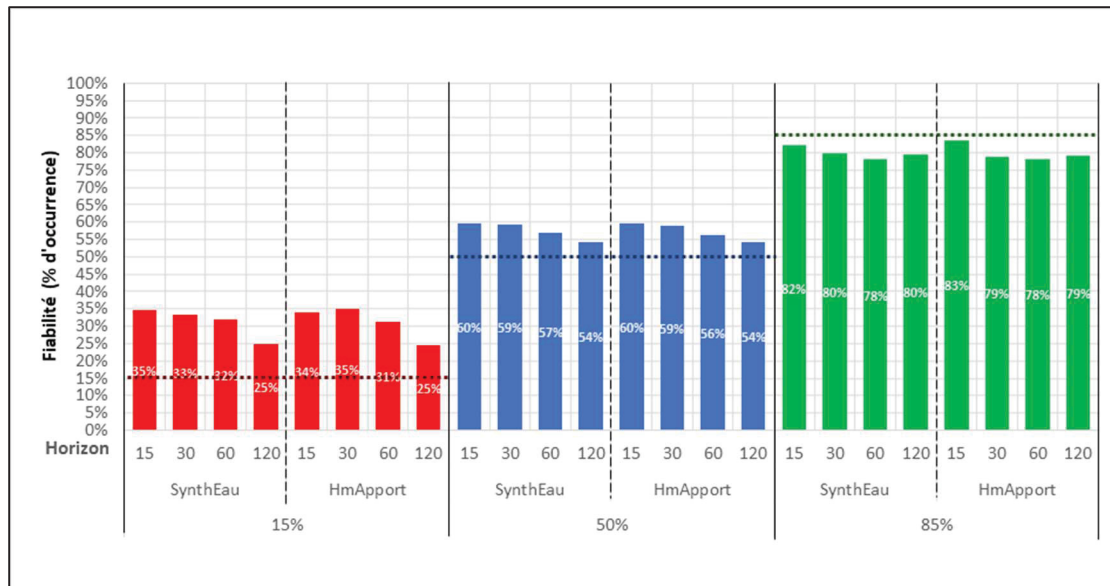


Figure 3.5 Fiabilité des scénarios probabilistes pour La Grande

3.4.2 Fiabilité des scénarios pour le système hydrique de la Saint-Maurice

Pour le système hydrique de Saint-Maurice, présenté dans la Figure 3.6, les tendances sont similaires à celles observées pour La Grande. Le scénario à 15 % présente des occurrences supérieures à la valeur attendue, se situant entre 18 % et 22 % pour les deux méthodes. Cela traduit une surestimation des événements rares, probablement due à une sous-estimation des incertitudes à court terme.

Pour le scénario à 50 %, les deux méthodes montrent des occurrences globalement proches de la valeur attendue, mais des écarts apparaissent sur les horizons longs, indiquant une baisse de fiabilité similaire à celle de La Grande. Les valeurs oscillent entre 48 % et 53 %, montrant une légère sous-représentation de la médiane.

Le scénario à 85 % est le plus fiable des trois, avec des occurrences variant de 74 % à 84 %. Ces résultats indiquent que les deux méthodes sont capables de représenter correctement les scénarios les plus probables, mais des différences mineures subsistent pour les horizons les plus longs.

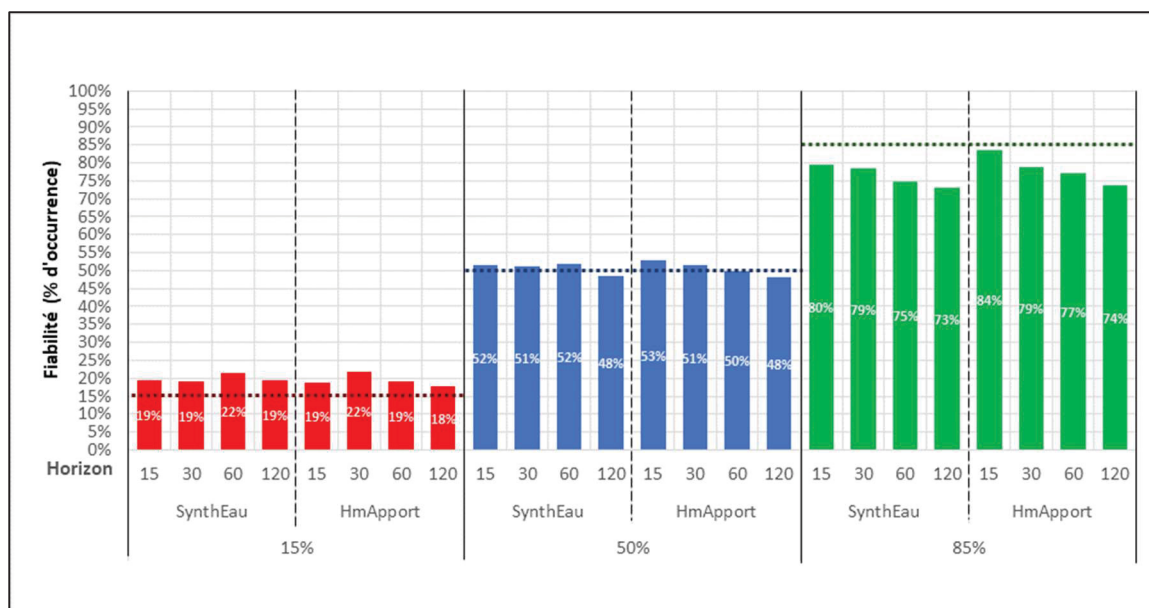


Figure 3.6 Fiabilité des scénarios probabilistes pour le Saint-Maurice

3.5 Interface utilisateur du modèle SynthEau (SynthEau Analyse)

Une interface graphique a été développée pour simplifier l'utilisation de SynthEau par les prévisionnistes d'apport ainsi que pour les gestionnaires hydriques. Cette interface permet de tester le modèle SynthEau et de le comparer visuellement avec HMAPPORT en utilisant les prévisions ensemblistes produites à l'opérationnel. De plus, l'interface utilisateur permet de calculer automatiquement des statistiques telles que la probabilité temporelle du début des crues. Les retours des utilisateurs ont été largement positifs, notamment en ce qui concerne la clarté et la rapidité d'accès aux informations critiques. La Figure 3.7 présente une capture d'écran de l'interface, illustrant ses fonctionnalités.

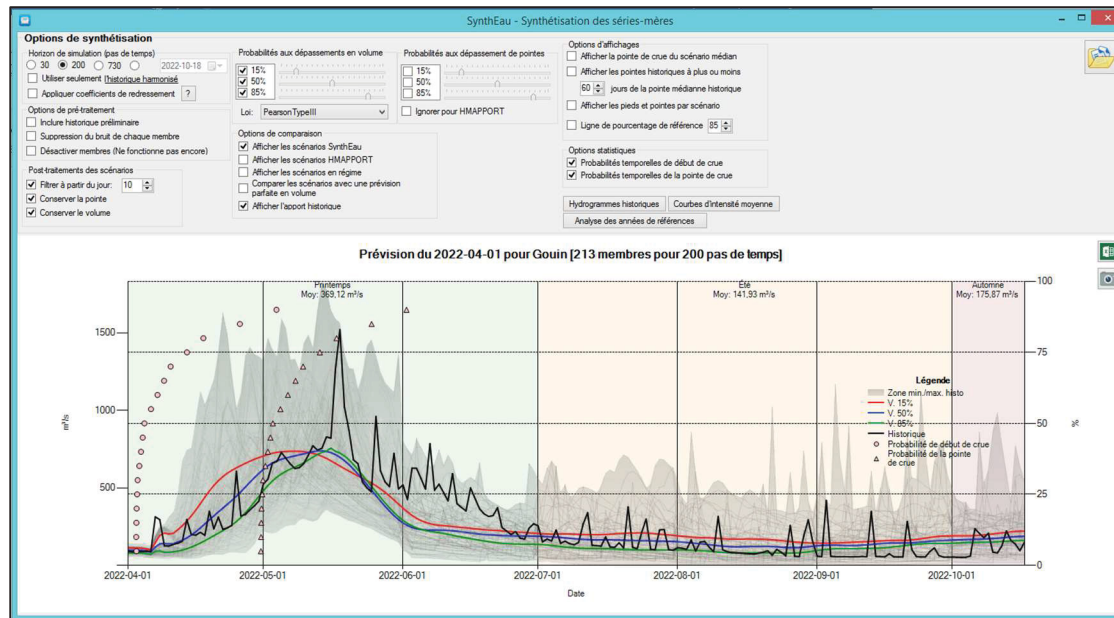


Figure 3.7 Interface utilisateur SynthEau Analyse

3.6 Synthèse des résultats

L'analyse des erreurs relatives moyennes a mis en évidence des différences significatives entre les méthodes SynthEau et HMAPPORT en fonction des horizons de prévision et des quantiles étudiés (sections 3.2.1 et 3.2.2). SynthEau affiche des erreurs plus faibles et plus stables, notamment pour l'horizon de 30 jours et le quantile 85 %, où HMAPPORT présente des écarts marqués.

L'étude des erreurs du scénario à 50 % par rapport aux volumes réels (sections 3.3.1 et 3.3.2) indique que les deux méthodes montrent des performances similaires sur certains horizons, bien que des variations existent selon les bassins versants et les périodes analysées. Les écarts les plus importants apparaissent sur les horizons plus longs, où la précision des prévisions ensemblistes a un impact plus marqué.

Enfin, l'évaluation de la fiabilité des scénarios probabilistes (sections 3.4.1 et 3.4.2) révèle que les scénarios à 85 % présentent une tendance à surestimer, tandis que les scénarios à 15 % tendent à sous-estimer la probabilité des événements extrêmes. Cette tendance est similaire

pour les deux méthodes, ce qui suggère une influence dominante de la qualité des prévisions ensemblistes.

Ces résultats constituent une base pour la discussion qui suivra dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 4

DISCUSSION

L'objectif principal de cette étude était de développer et valider une nouvelle méthode, SynthEau, permettant une meilleure gestion des scénarios probabilistes issus des prévisions hydrologiques d'ensemble (ESP). L'hypothèse est qu'une meilleure caractérisation statistique et temporelle des scénarios probabilistes d'apport permet une amélioration de la prise de décision opérationnelle en contexte d'incertitude hydrologique, permettant des bénéfices en termes d'optimisation et de sécurité opérationnelle. Cette discussion permet d'analyser les résultats obtenus en examinant les performances de SynthEau par rapport à HMAPPORT, la méthode actuellement utilisée à Hydro-Québec, ainsi qu'aux autres approches décrites dans la section 1.4.2.

4.1 Performance du modèle SynthEau

Les résultats obtenus présentés dans le Tableau 3.1 montrent clairement que SynthEau présente une performance supérieure en matière de précision des volumes prévus comparativement à HMAPPORT, particulièrement pour les scénarios probabilistes extrêmes (15% et 85%). En effet, SynthEau parvient à maintenir des erreurs moyennes inférieures à celles observées pour HMAPPORT, avec des erreurs généralement sous 0,5%. Cette différence provient principalement de la méthodologie employée par SynthEau qui, contrairement à HMAPPORT, garantit la cohérence temporelle à chaque pas de temps en utilisant une approche cumulée-décumulée. La contrainte opérationnelle imposant un horizon fixe de 200 jours pour couvrir l'ensemble des besoins temporels oblige HMAPPORT à produire le scénario sur ce même horizon, ce qui rend les sous-horizons non conformes aux volumes attendus. C'est pour cette raison qu'aucun écart n'apparaît pour le scénario médian (50%). HMAPPORT utilise uniquement la médiane temporelle des prévisions pour redistribuer un volume moyen, s'approchant du volume prévu malgré la répartition temporelle utilisée.

Un point important est la capacité de SynthEau à réduire les biais temporels constatés avec HMAPPORT. Alors qu'HMAPPORT utilise une redistribution temporelle basée uniquement sur la médiane des prévisions, il ne peut reproduire fidèlement les dynamiques hydrologiques réelles puisque tous les scénarios générés présentent une même forme et un même moment où il y aura le débit maximal, comme montre la Figure 2.8. Cela explique également pourquoi aucune différence significative n'apparaît pour le scénario médian. HMAPPORT utilise précisément la médiane pour répartir un volume moyen, garantissant ainsi que le volume total est respecté, quelle que soit la méthode de répartition temporelle utilisée. Cependant, il est important de préciser que cette forme constante des scénarios médians n'est aucunement réaliste et ne reflète pas les dynamiques hydrologiques réelles observées sur le terrain. En revanche, SynthEau incorpore directement la distribution probabiliste issue de la prévision ensembliste, offrant ainsi une forme plus variable de l'hydrogramme. Cette variabilité influence la dynamique temporelle des événements extrêmes, notamment en ce qui concerne le début de la crue et le moment d'apparition de la pointe dans un contexte opérationnel, comme montre la Figure 2.10. Mais encore une fois, cette variabilité hydrologique n'est pas réelle.

4.2 Comparaison du scénario médian (50 %) avec les volumes observés

Lorsque le scénario médian (50 %) est comparé directement aux volumes observés pour la même période, les performances de SynthEau et de HMAPPORT deviennent très similaires. Cette similitude démontre que les deux méthodes véhiculent essentiellement la même information issue des prévisions hydrologiques d'ensemble. Aucun patron clair ne se dégage quant à la localisation du bassin versant ou à l'horizon temporel analysé, comme présenté dans le Tableau 3.3. Des écarts considérables sont présents pour certains bassins versants. Par exemple, pour La Grande-1, une surestimation moyenne de plus de 50 % sur un horizon de 120 jours a été observée. Bien que ce résultat puisse sembler élevé, il est à noter que les débits observés dans ce bassin sont relativement faibles et très bruités, particulièrement lors des événements extrêmes. Pour obtenir des résultats plus représentatifs, la totalité des prévisions disponibles, indépendamment de la période de l'année, aurait dû être considérée. Ce constat met en évidence une limitation majeure des deux méthodes. Leur performance dépend de la

qualité des prévisions hydrologiques d'ensemble initiales. De plus, il est important de préciser que le modèle hydrologique sous-jacent a été calibré pour être performant tout au long de l'année et n'a pas été spécifiquement optimisé pour les événements extrêmes. Ainsi, malgré les améliorations méthodologiques apportées par SynthEau, la précision finale des scénarios probabilistes demeure largement influencée par la qualité des prévisions hydrologiques d'ensemble.

4.3 Analyse de la fiabilité des scénarios probabilistes d'apports

L'évaluation de la fiabilité des scénarios probabilistes liée à la capacité des prévisions hydrologiques d'ensemble (ESP) à représenter la variabilité des apports futurs. Un facteur clé influençant cette fiabilité est le processus de calage des modèles hydrologiques. En pratique, le calage vise principalement à optimiser la performance moyenne, ce qui entraîne souvent une surestimation des débits en période d'étiage et une sous-estimation des pointes de crue (Arsenault, Latraverse, & Duchesne, 2016b).

Ce biais systématique est causé par un ajustement des paramètres du modèle qui favorise une réduction de l'erreur globale, sans préserver l'exactitude des extrêmes hydrologiques. Cette tendance a été observée dans plusieurs études de validation des modèles hydrologiques, notamment dans le cadre de l'optimisation des prévisions ESP pour la gestion des réservoirs hydroélectriques (Arsenault & Côté, 2019). Donc, les scénarios probabilistes dérivés des prévisions hydrologiques reflètent ces distorsions, ce qui peut affecter la prise de décision opérationnelle.

Les résultats obtenus avec SynthEau et HMAPPORT confirment cette problématique. L'analyse de fiabilité, présentée aux Figures 3.5 et 3.6, montre que les scénarios à 15 % présentent des occurrences systématiquement supérieures à la probabilité attendue, causant une surestimation des volumes dans les cas extrêmes. À l'inverse, les scénarios à 85 % tendent à être sous-estimés. Ces observations sont cohérentes avec celles rapportées par Troin et al. (2021), qui ont identifié des tendances similaires dans l'évaluation des ensembles hydrologiques.

En contexte opérationnel, ces biais ont un impact direct sur la gestion des réservoirs et la planification des débits turbinés. Une sous-estimation chronique des apports peut conduire à une gestion inadéquate des volumes disponibles, augmentant les risques de déversement au niveau des réservoirs. À l’opposé, une surestimation récurrente pourrait limiter l’optimisation de la production en raison d’une mauvaise anticipation des volumes d’apports réels. Une correction des biais, impliquant une meilleure calibration du modèle hydrologique et une prise en compte de l’incertitude par assimilation des données, permettrait de renforcer l’efficacité de la gestion opérationnelle des ressources en eau. En effet, plusieurs études, dont celle de Shi et al. (2008), montrent que le calage du modèle hydrologique joue un rôle clé dans l’amélioration de la fiabilité des prévisions de débit, spécifiquement dans le cadre des prévisions hydrologiques d’ensemble (ESP). Cette étape permet de réduire les erreurs systématiques et d’ajuster les prévisions aux conditions réelles, permettant une meilleure prise de décision pour la gestion des ressources en eau.

4.4 Comparaison avec les autres méthodes

SynthEau se rapproche de la méthode dite « point par point », mais agit sur des volumes cumulés plutôt que des débits instantanés, améliorant ainsi la cohérence temporelle globale des scénarios probabilistes produits. À l’inverse, la méthode « fréquentielle conditionnée » présente des similarités avec HMAPPORT, mais elle est encore plus limitée, puisqu’elle ne bénéficie pas d’un ajustement statistique pour déterminer le volume d’apport prévu.

En termes de représentation temporelle, ni SynthEau ni HMAPPORT ne reproduisent parfaitement les dynamiques temporelles observées. Cependant, SynthEau se démarque par sa capacité à introduire une variabilité dans les hydrogrammes produits, reflétant les perturbations observées dans la dynamique des événements extrêmes (par exemple, le début des crues ou le moment précis de la pointe de débit). Cette caractéristique améliore concrètement la prise de décision opérationnelle en contexte hydrique.

Pour la méthode du « membre représentatif », elle partage avec HMAPPORT le respect du volume du volume d'apport prévu uniquement en fin d'horizon. En revanche, sa dynamique temporelle est réaliste puisqu'elle conserve entièrement la forme temporelle d'une prévision historique réelle. Cette méthode est occasionnellement utilisée par certains gestionnaires hydriques pour tester des hypothèses opérationnelles sur des scénarios similaires à la réalité.

4.5 Synthèse et application opérationnelle de SynthEau

En résumé, SynthEau répond aux objectifs initiaux fixés dans ce mémoire. Ce modèle améliore la précision et la cohérence temporelle des scénarios probabilistes par rapport à ceux produits par HMAPPORT. Malgré ces améliorations, certaines limitations sont dues à la qualité des prévisions hydrologiques d'ensemble. Donc, il est essentiel de continuer à améliorer ces prévisions pour maximiser l'efficacité opérationnelle de la méthode.

Pour son utilisation à l'opérationnel, SynthEau est déjà intégré au processus décisionnel d'Hydro-Québec depuis 2019 comme intrant alternatif dans le processus d'optimisation des ressources hydriques. En pratique, les gestionnaires hydriques disposent du choix entre les scénarios produits par SynthEau et ceux de HMAPPORT selon les contextes. Cette intégration opérationnelle confirme la pertinence et l'utilité de SynthEau pour améliorer la précision des volumes prévus, permettant une gestion proactive et optimisée des ressources en eau. SynthEau constitue désormais un outil opérationnel reconnu, offrant des bénéfices concrets en matière de sécurité opérationnelle et d'optimisation économique face aux incertitudes hydrologiques. Par exemple, l'utilisation de scénarios plus cohérents en volume permet de mieux anticiper les crues printanières ou les périodes d'étiage, réduisant les risques de manœuvres imprévues et limitant les pertes économiques liées à des stratégies de production non optimales.

4.6 Limitations de l'étude

L'évaluation de la méthode SynthEau présente certaines limitations qu'il est important de considérer afin d'interpréter correctement les résultats obtenus et d'identifier les axes d'amélioration futurs.

Tout d'abord, la comparaison des performances a été effectuée seulement sur les deux modèles présentés à la section 2.4, SynthEau et HMAPPORT. Aucune autre méthode de transformation des prévisions hydrologiques d'ensemble en hydrogramme probabiliste n'a été testée. Une comparaison avec d'autres approches aurait été pertinente, mais il existe très peu de publications sur ce sujet. La tendance scientifique actuelle semble prioriser les approches ensemblistes, mettant l'accent sur l'amélioration des prévisions hydrologiques d'ensemble plutôt que sur le développement de méthodes de transformation en scénarios probabilistes d'apports.

Par ailleurs, bien que SynthEau permette une représentation plus cohérente des volumes cumulés à chaque pas de temps, l'hydrogramme généré demeure une approximation fictive et ne reflète pas les dynamiques hydrologiques réelles observées. La forme de l'hydrogramme produit par HMAPPORT correspond à la médiane des membres de l'ensemble prévisionnel, tandis que SynthEau génère un hydrogramme en fonction de la variabilité du volume cumulé issu de la distribution ensembliste. Cette limitation est partagée avec HMAPPORT et est en grande partie due à l'absence d'un mécanisme permettant de contraindre l'évolution temporelle des débits selon des critères physiques ou hydrologiques.

Une autre contrainte liée à la représentation temporelle est le moment d'occurrence du débit maximal, la « pointe de crue ». Pour HMAPPORT, la position de la pointe est directement déterminée par la valeur maximale de la médiane des membres de l'ensemble prévisionnel. Donc, quel que soit le quantile demandé, la crue maximale est toujours située au même moment. Ce comportement n'est pas présent dans SynthEau, car il n'utilise pas de référence fixe, comme la médiane de l'ensemble. Donc, l'emplacement de la pointe dans SynthEau pourrait néanmoins être mieux représentée, car elle dépend de la variabilité des volumes cumulés issus de la distribution ensembliste.

De plus, la validation de SynthEau a été effectuée uniquement sur une période de l'année correspondant à la crue printanière. Aucune analyse n'a pas été réalisée pour d'autres périodes, comme les étiages estivaux ou les crues automnales. L'application de SynthEau à d'autres contextes saisonniers permettrait d'évaluer sa robustesse face à divers régimes hydrologiques.

Toutefois, la problématique liée au respect du volume d'apport prévu par HMAPPORT avait déjà été identifiée par Marinelli (2007), et les gestionnaires hydriques en sont conscients depuis. Les observations à l'opérationnel réalisées depuis cette époque indiquent que ce comportement est beaucoup moins marqué lorsque la variabilité de l'ensemble prévisionnel est faible et que les événements extrêmes sont rares. C'est pour cette raison que l'étude a limité l'analyse à cette période spécifique.

Enfin, bien que SynthEau réduise certains biais temporels et apporte une meilleure cohérence du volume prévu, les biais présents dans les prévisions hydrologiques d'ensemble persistent dans les résultats finaux. La sous-dispersion des prévisions ensemblistes n'est pas corrigée par SynthEau, ce qui signifie que l'incertitude des prévisions pourrait être sous-estimée dans certains contextes. Une intégration future de méthodes de correction des biais ou d'assimilation de données hydrologiques pourrait contribuer à améliorer la précision et la fiabilité des prévisions probabilistes.

Ces limitations doivent être prises en compte lors de l'utilisation de SynthEau pour la prise de décision opérationnelle, et elles ouvrent la voie à de futures améliorations visant à accroître la performance de la méthode.

CONCLUSION

Ce mémoire présente la méthode SynthEau, un modèle de transformation des prévisions hydrologiques d'ensemble en scénarios probabilistes de volumes d'apports. SynthEau garantit la cohérence temporelle des volumes cumulés à chaque pas de temps, offrant une représentation des dynamiques hydrologiques différente et répondant à la contrainte opérationnelle d'émettre une seule prévision couvrant tous les besoins en termes de longueur de prévision par rapport à HMAPPORT. Par sa conception, SynthEau permet de mieux respecter la distribution probabiliste des volumes prévus tout en maintenant une flexibilité opérationnelle adaptée aux besoins des gestionnaires hydriques. L'analyse comparative entre SynthEau et HMAPPORT révèle plusieurs différences. HMAPPORT applique une redistribution temporelle des volumes basée sur la médiane de l'ensemble, tandis que SynthEau adopte une approche cumulée-décumulée, offrant des scénarios ayant des profils différents en fonction du volume prévu. Les résultats montrent clairement que SynthEau réduit les erreurs moyennes des volumes prévus pour les scénarios à 15% et 85% de dépassement, ce qui permet de garantir le volume prévu peu importe le quantile demandé.

L'évaluation du scénario médian par rapport aux observations ainsi que la fiabilité des trois scénarios étudiés (15%, 50% et 85%) pour les deux modèles testés révèlent des résultats très similaires. Cette observation met en évidence le fait que la fiabilité des prévisions dépend en grande partie de la qualité des prévisions hydrologiques d'ensemble plutôt que de la méthode de transformation en scénarios probabilistes.

Des améliorations potentielles pourraient être envisagées pour renforcer l'efficacité de SynthEau. L'intégration de méthodes de correction des biais en amont, une utilisation de l'assimilation des données et l'ajout de pré- et post-traitements statistiques pourraient accroître la précision des scénarios probabilistes. De plus, l'ajout d'une approche combinant probabilité de volumes d'apports et intensité de pointe serait intéressant. D'ailleurs, des expérimentations ont été menées après le développement de SynthEau afin d'introduire une probabilité d'intensité

combinée à celle du volume, dans le cadre du développement de « SynthEauPointe ». Cette approche ouvrirait la voie pour anticiper les événements extrêmes.

En conclusion, les résultats obtenus confirment que SynthEau atteint l'objectif initial de cette étude. Il améliore la répartition des volumes prévus tout au long du scénario prévu conformément à la prévision hydrologique d'ensemble qui en découle. Son intégration à l'opérationnel chez Hydro-Québec depuis 2022 démontre son potentiel à améliorer la gestion hydrique en contexte d'incertitude. Dans un cadre où l'anticipation des crues devient de plus en plus critique, l'adoption de SynthEau par rapport à HMAPPORT apparaît comme un choix idéal dans ce contexte pour une meilleure gestion des ressources en eau.

ANNEXE I

RÉSULTAT DES COMPARAISONS DE L'ERREUR MOYENNE DU VOLUME CUMULÉ DES MÉTHODES PAR RAPPORT AU QUANTILE EMPIRIQUE ENSEMBLISTE PAR BASSIN VERSANT

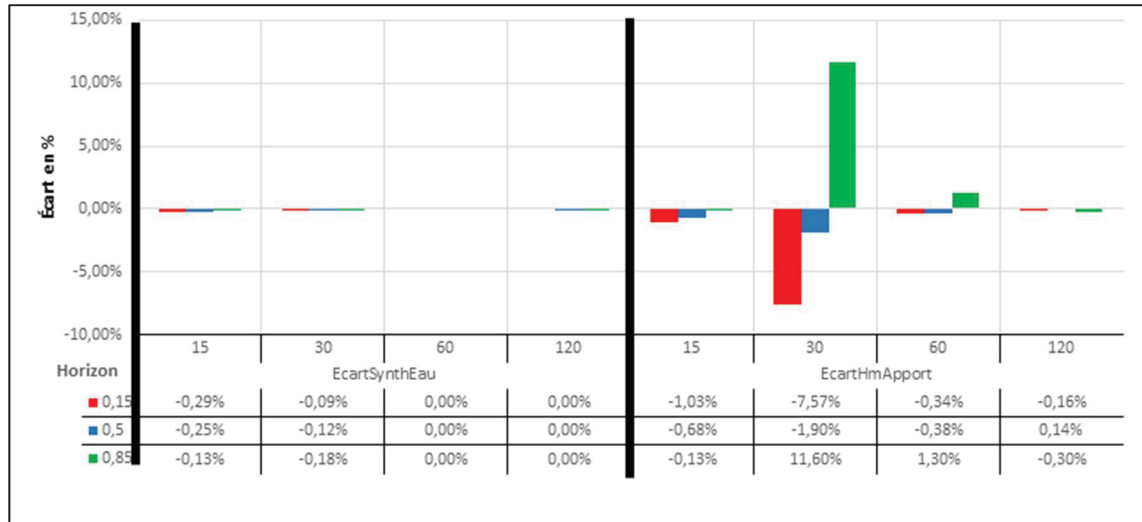


Figure-A I 1 Erreur moyenne du volume cumulé pour le bassin versant Caniapiscou

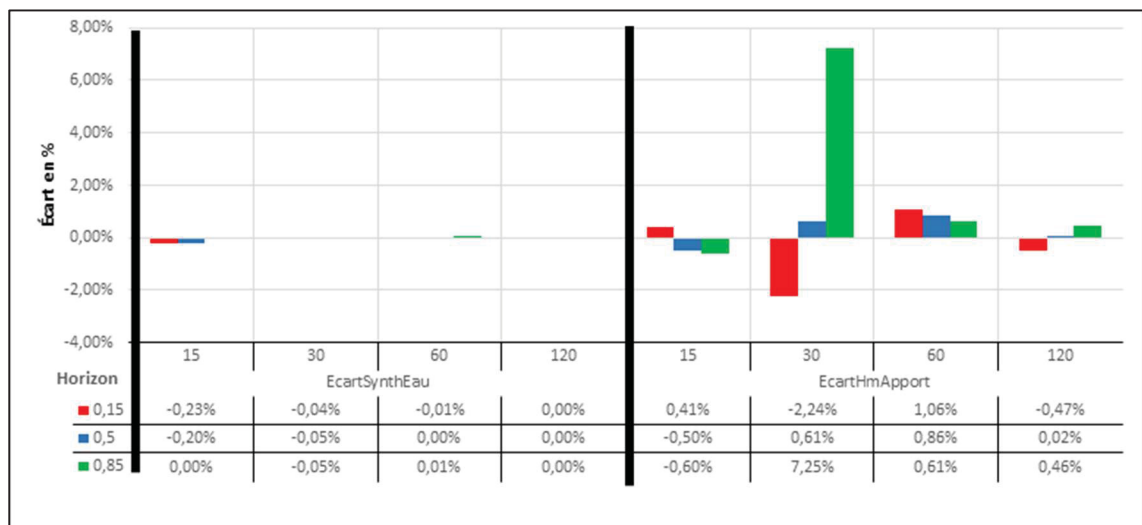


Figure-A I 2 Erreur moyenne du volume cumulé pour le bassin versant Eastmain-1

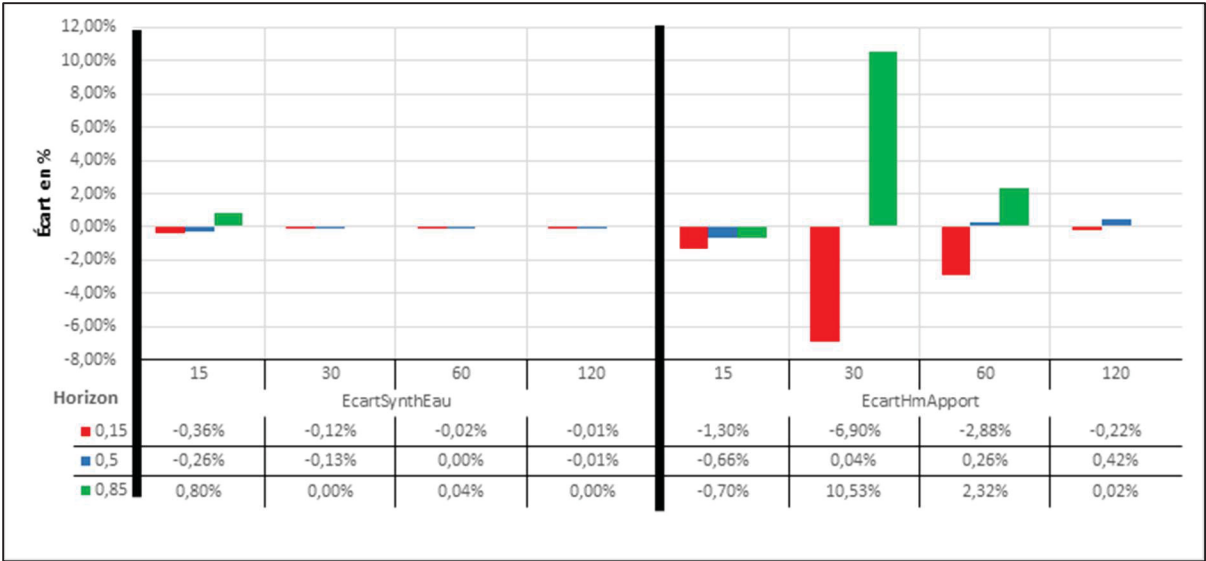


Figure-A I 3 Erreur moyenne du volume cumulé pour le bassin versant La Grande 1

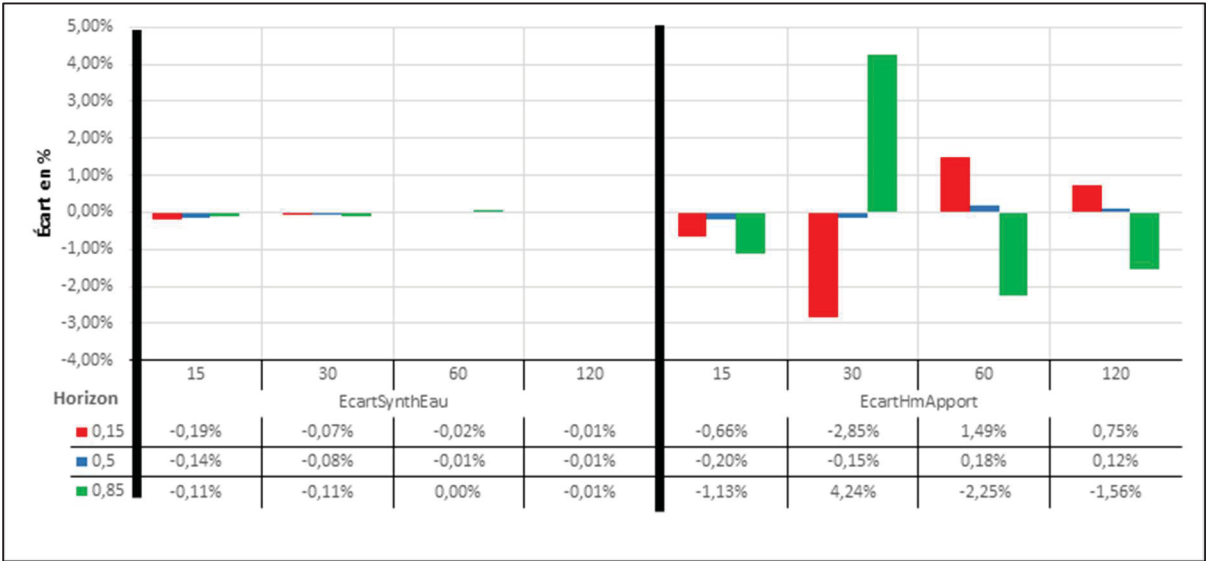


Figure-A I 4 Erreur moyenne du volume cumulé pour le bassin versant La Grande 2 et Lac Sakami

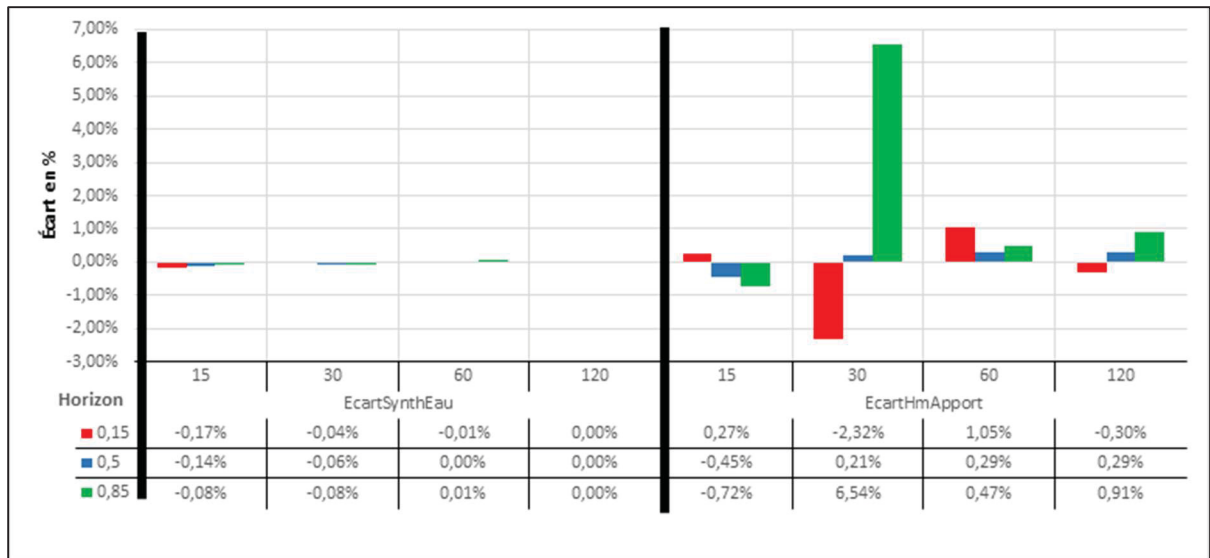


Figure-A I 5 Erreur moyenne du volume cumulé pour le bassin versant La Grande 3

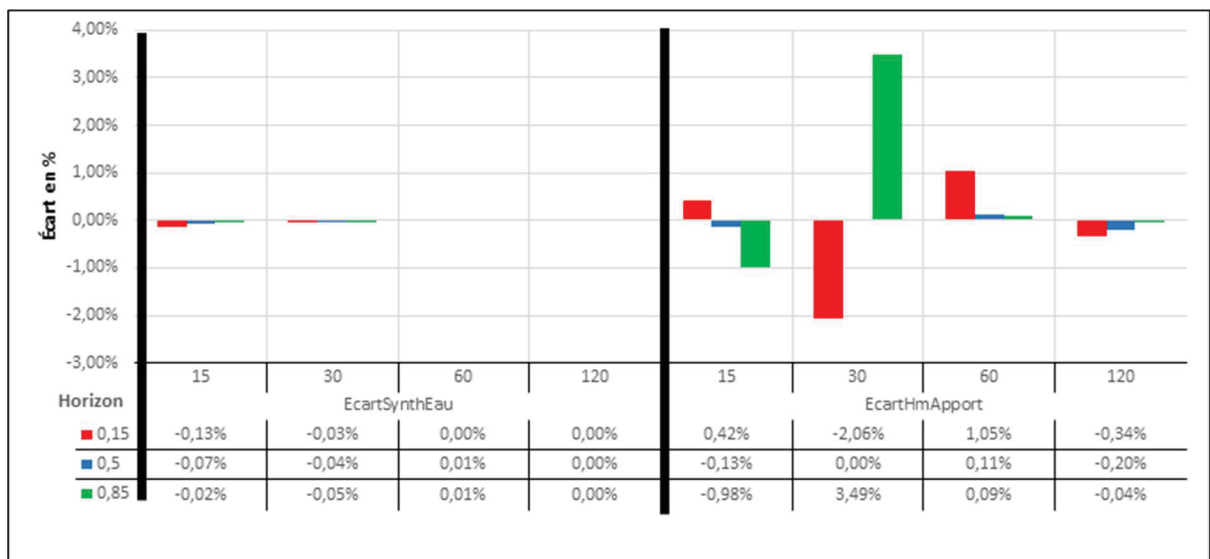


Figure-A I 6 Erreur moyenne du volume cumulé pour le bassin versant La Grande 4

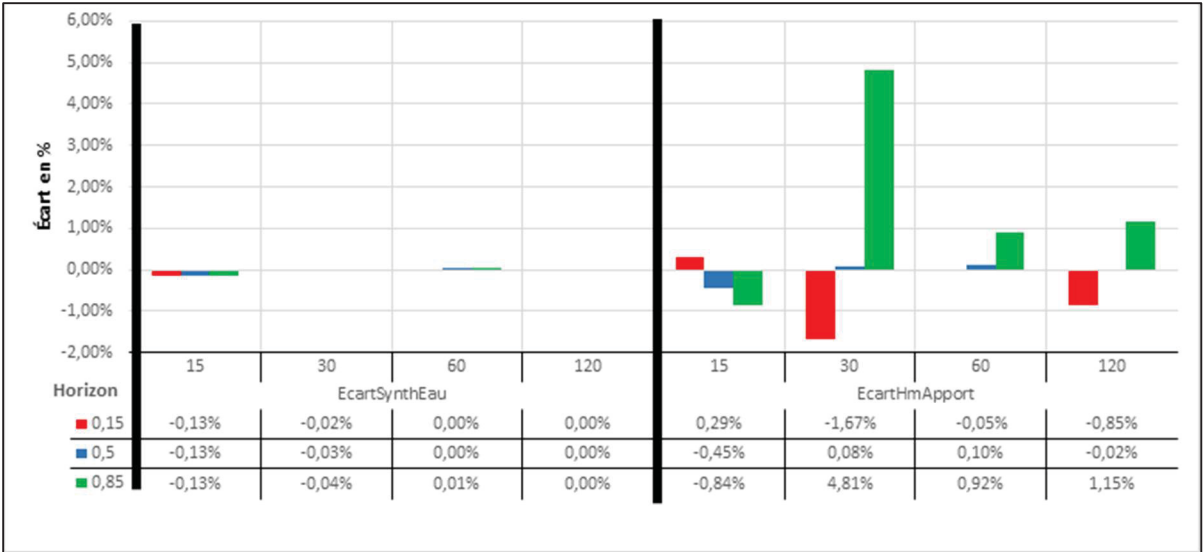


Figure-A I 7 Erreur moyenne du volume cumulé pour le bassin versant Lac Mesgouez

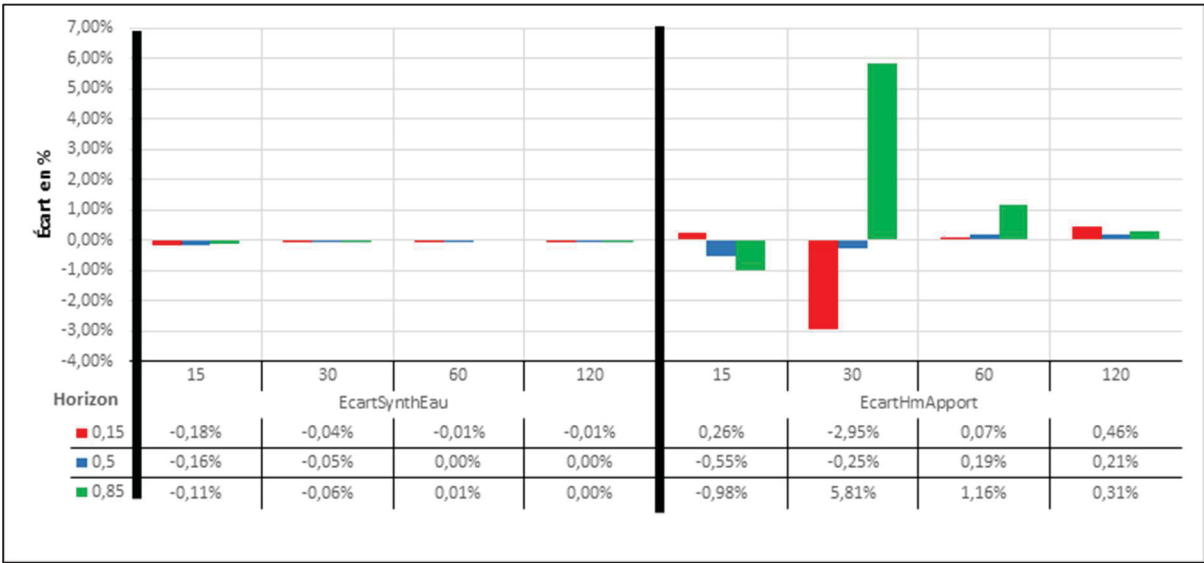


Figure-A I 8 Erreur moyenne du volume cumulé pour le bassin versant Lac Mistassini

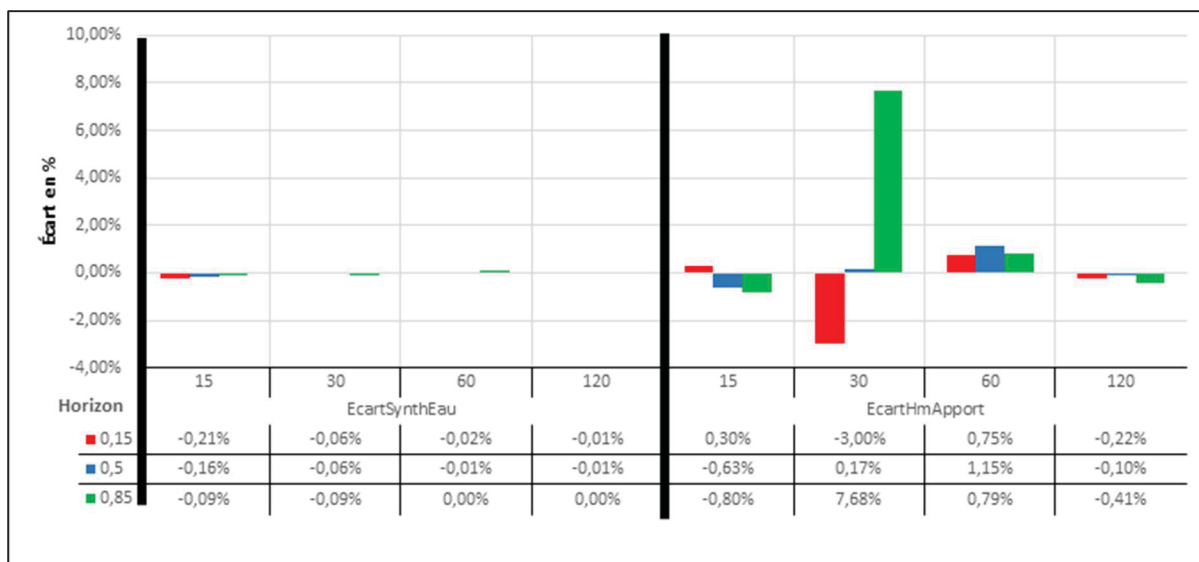


Figure-A I 9 Erreur moyenne du volume cumulé pour le bassin versant Lac Opinaca

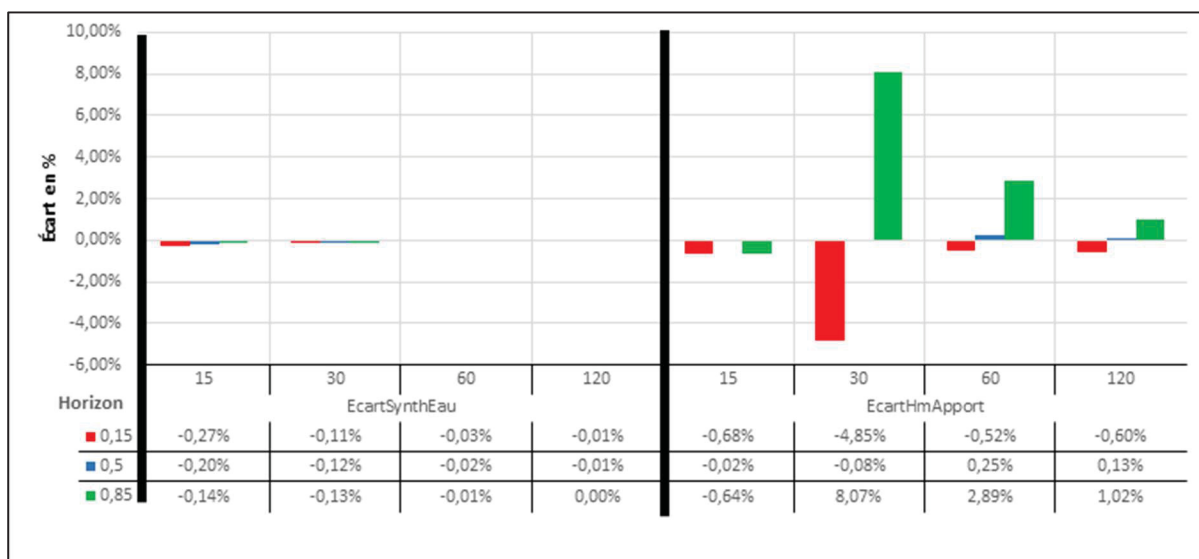


Figure-A I 10 Erreur moyenne du volume cumulé pour le bassin versant La Forge 1

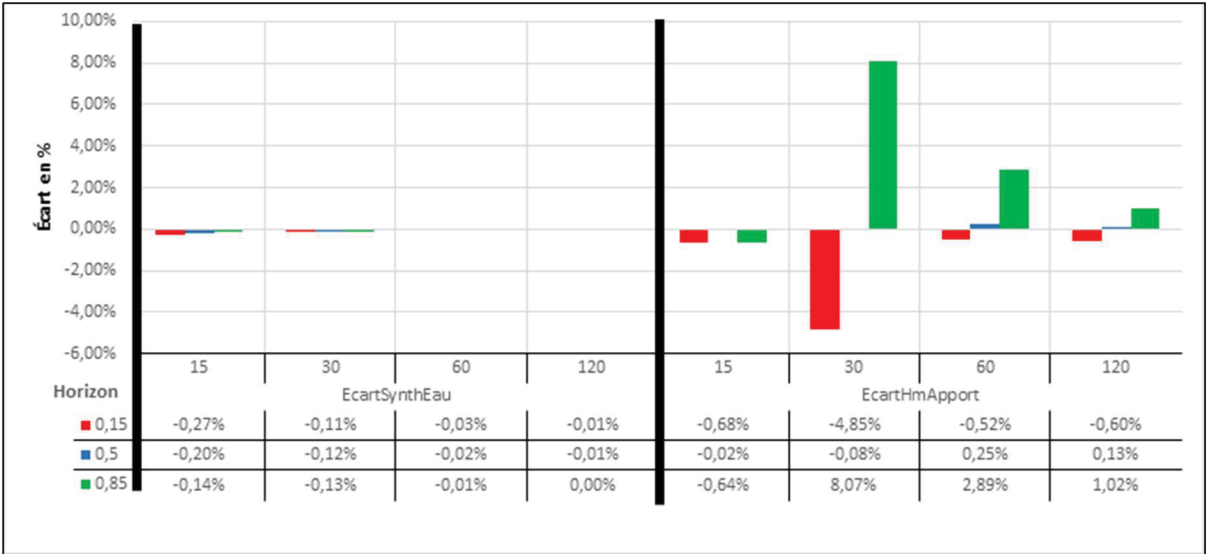


Figure-A I 11 Erreur moyenne du volume cumulé pour le bassin versant La Forge 2

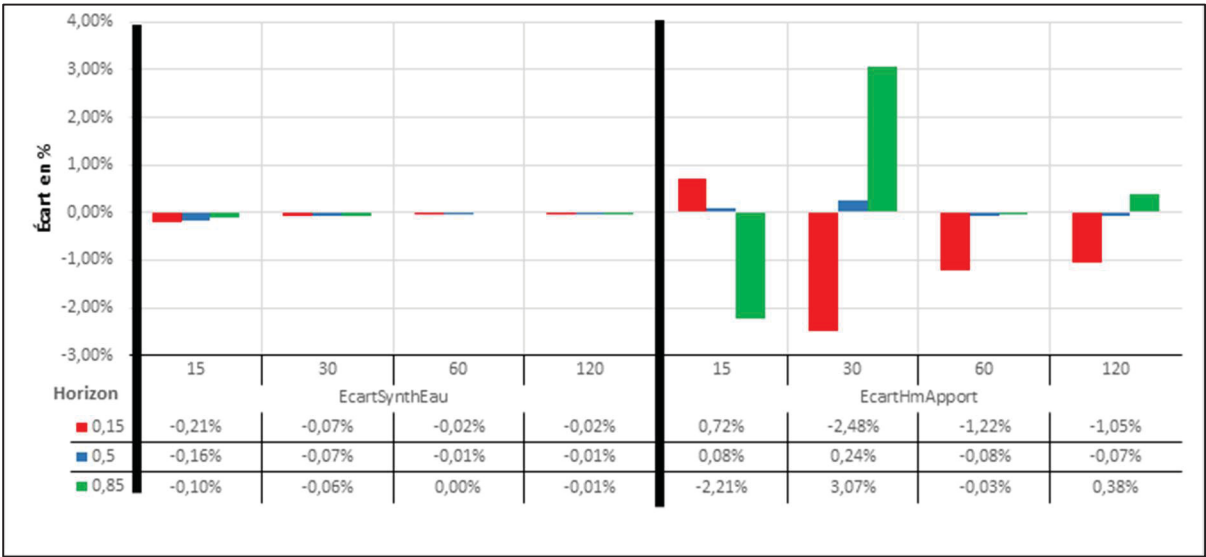


Figure-A I 12 Erreur moyenne du volume cumulé pour le bassin versant Rupert bief aval

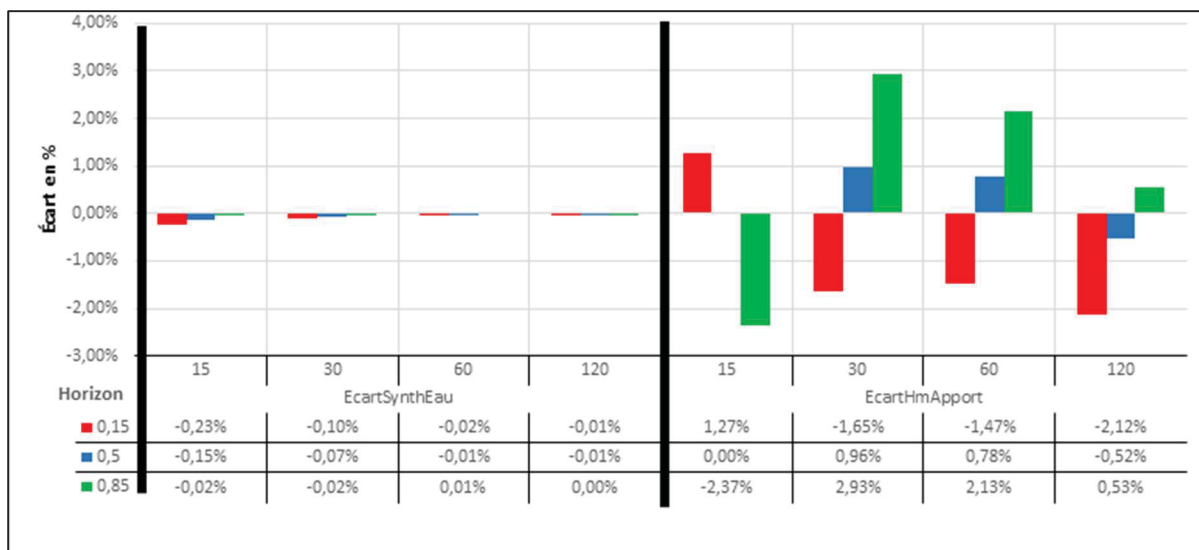


Figure-A I 13 Erreur moyenne du volume cumulé pour le bassin versant Rupert bief amont

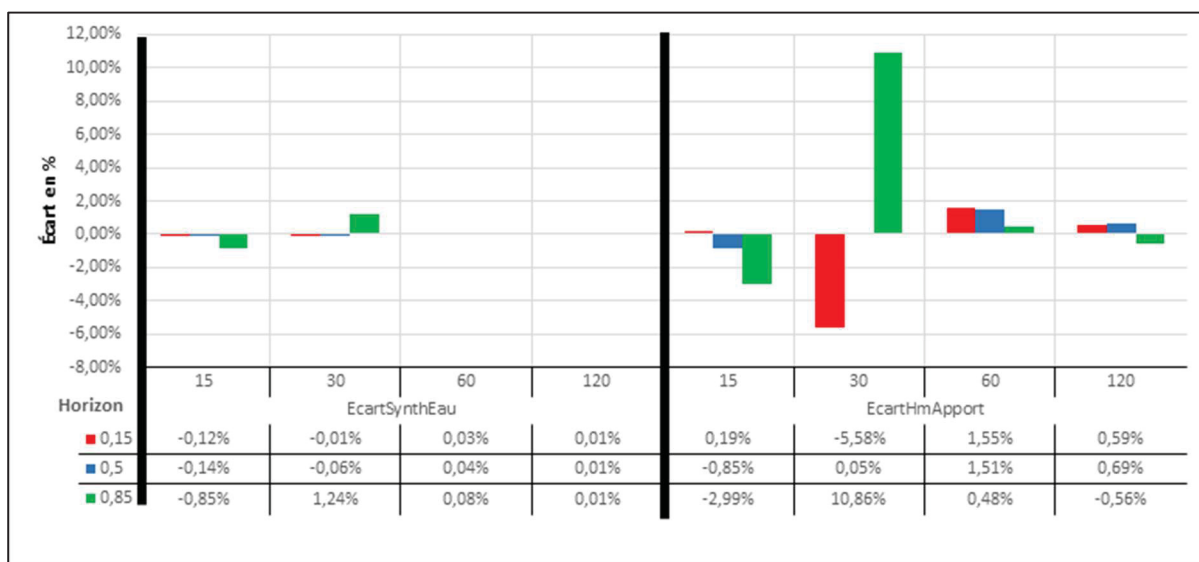


Figure-A I 14 Erreur moyenne du volume cumulé pour le bassin versant Trenché

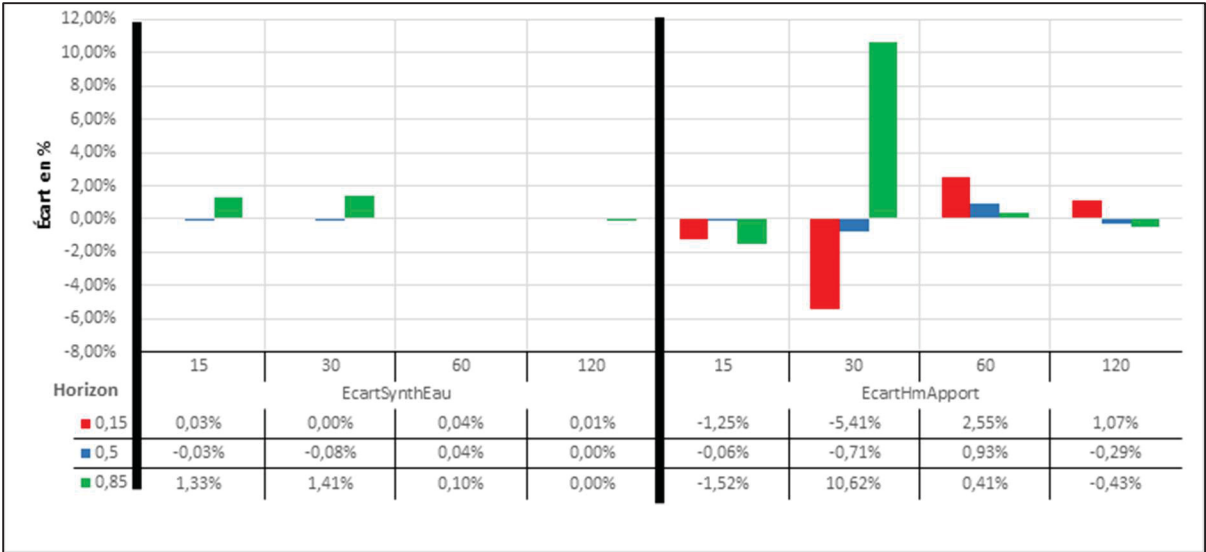


Figure-A I 15 Erreur moyenne du volume cumulé pour le bassin versant Taureau

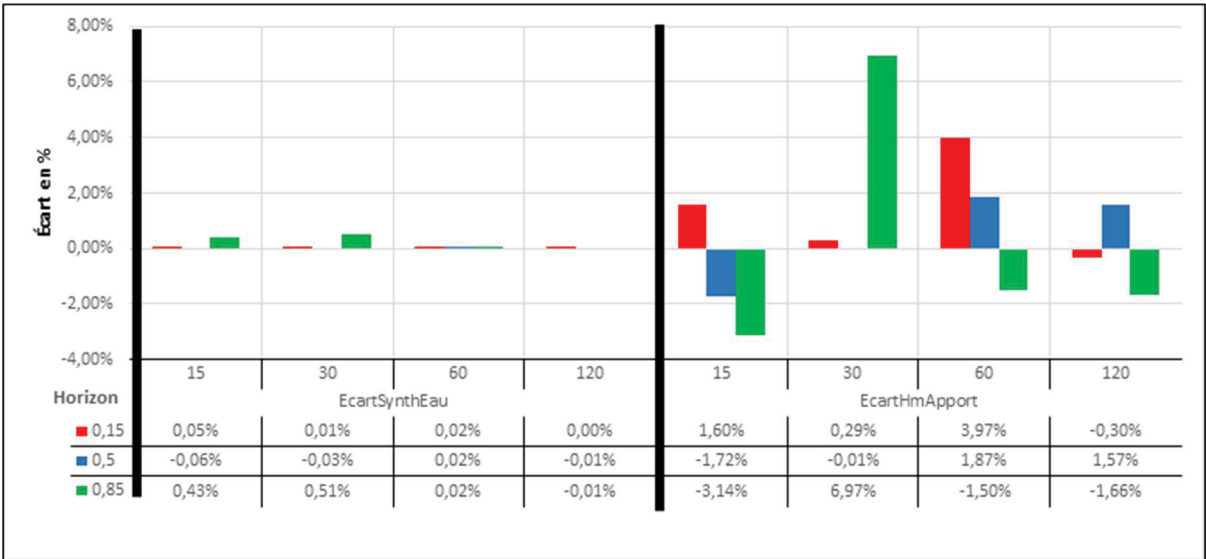


Figure-A I 16 Erreur moyenne du volume cumulé pour le bassin versant Mekinac

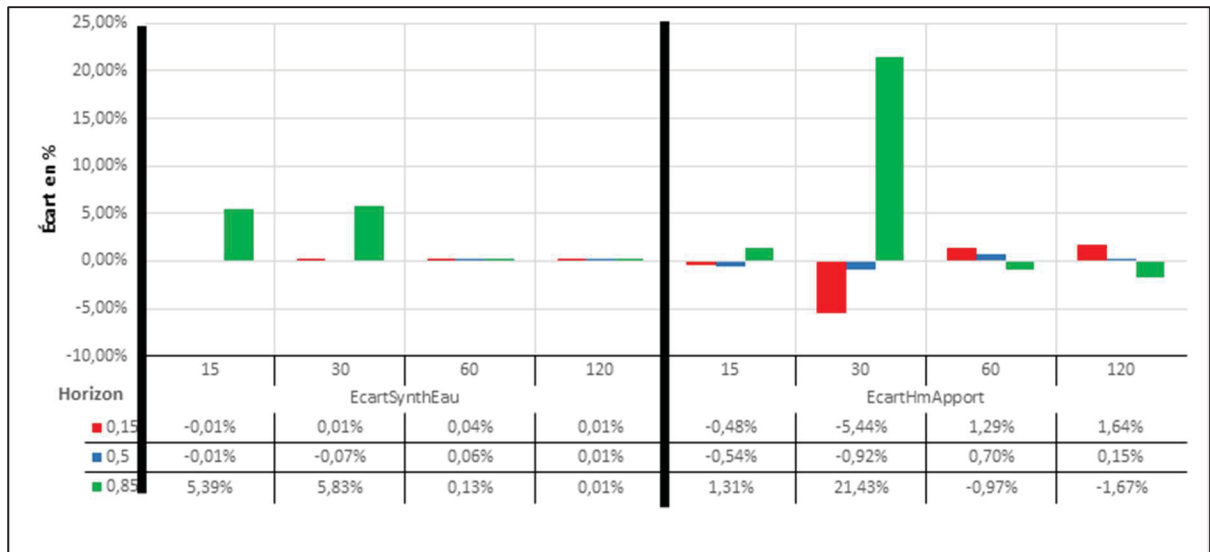


Figure-A I 17 Erreur moyenne du volume cumulé pour le bassin versant Manouane ABC

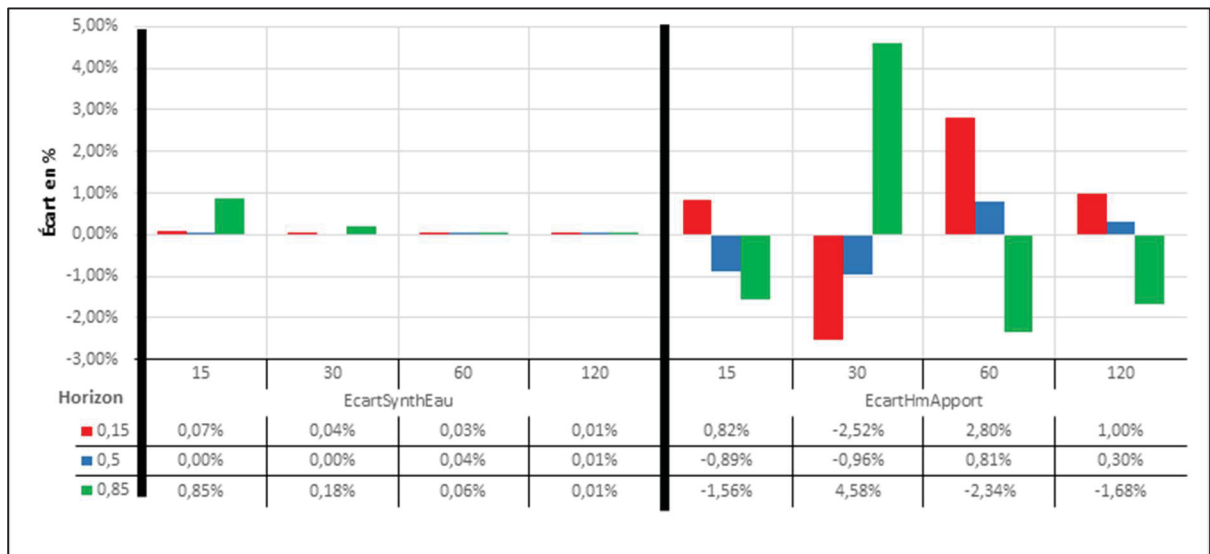


Figure-A I 18 Erreur moyenne du volume cumulé pour le bassin versant La Tuque

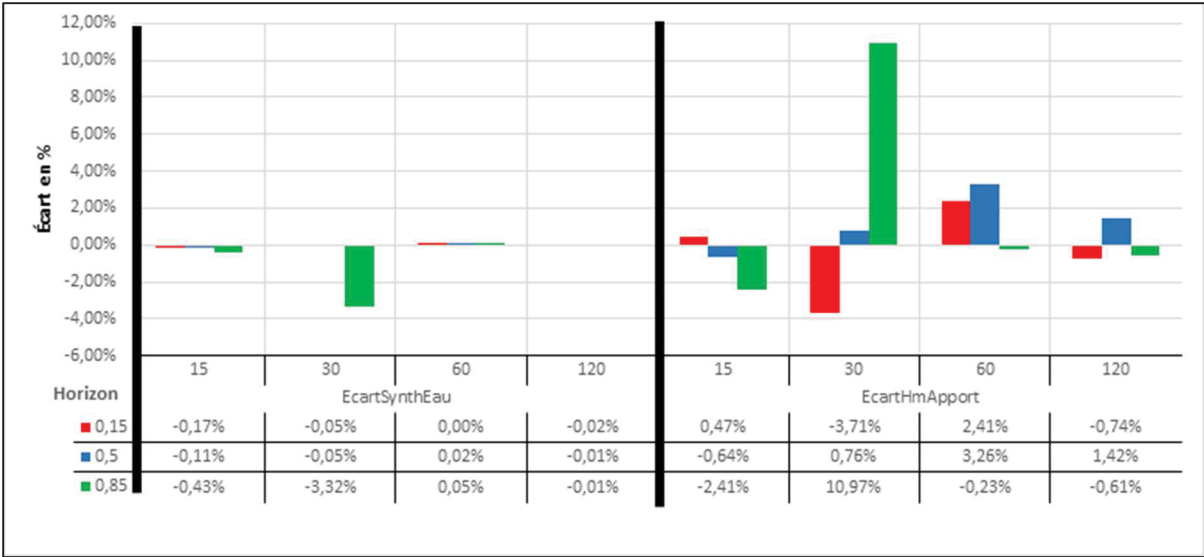


Figure-A I 19 Erreur moyenne du volume cumulé pour le bassin versant Grand-Mère

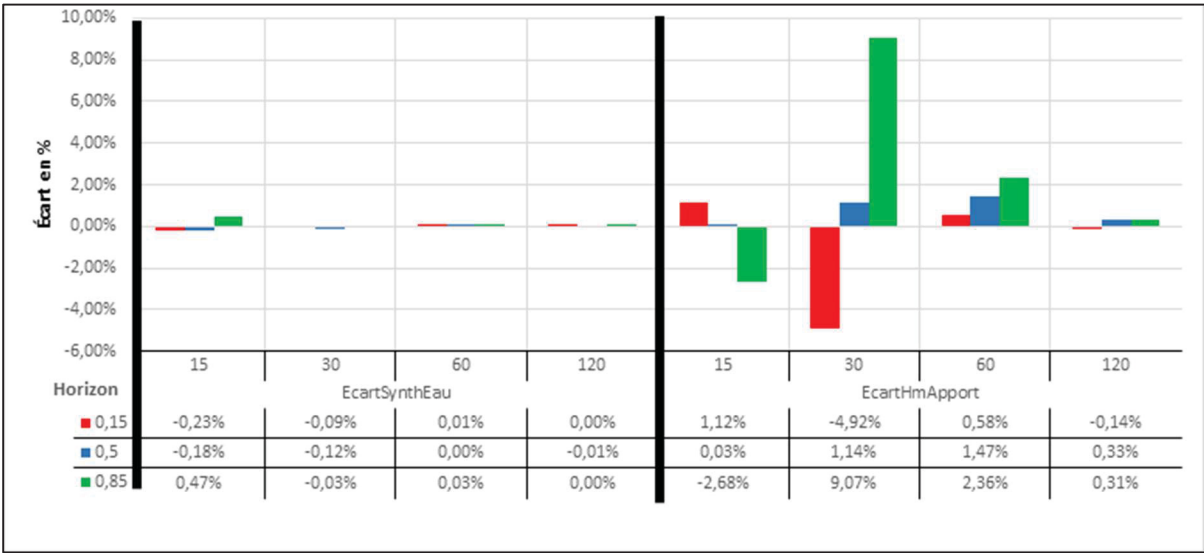


Figure-A I 20 Erreur moyenne du volume cumulé pour le bassin versant Gouin

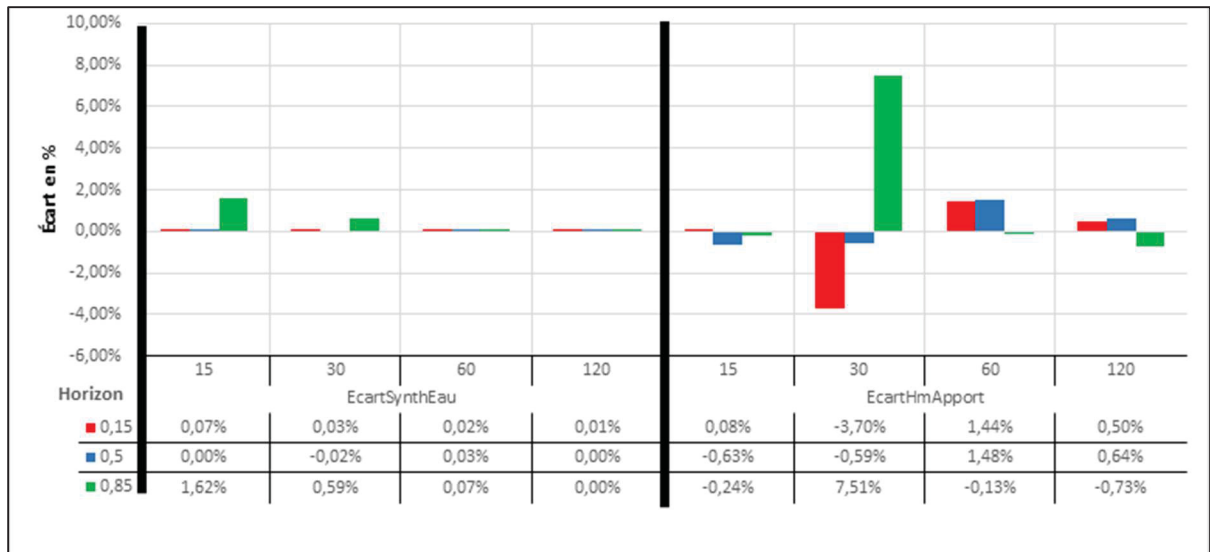


Figure-A I 21 Erreur moyenne du volume cumulé pour le bassin versant Beaumont

ANNEXE II

RÉSULTAT DES COMPARAISONS DE LA FIABILITÉ DES SCÉNARIOS PROBABILISTE PAR BASSIN VERSANT

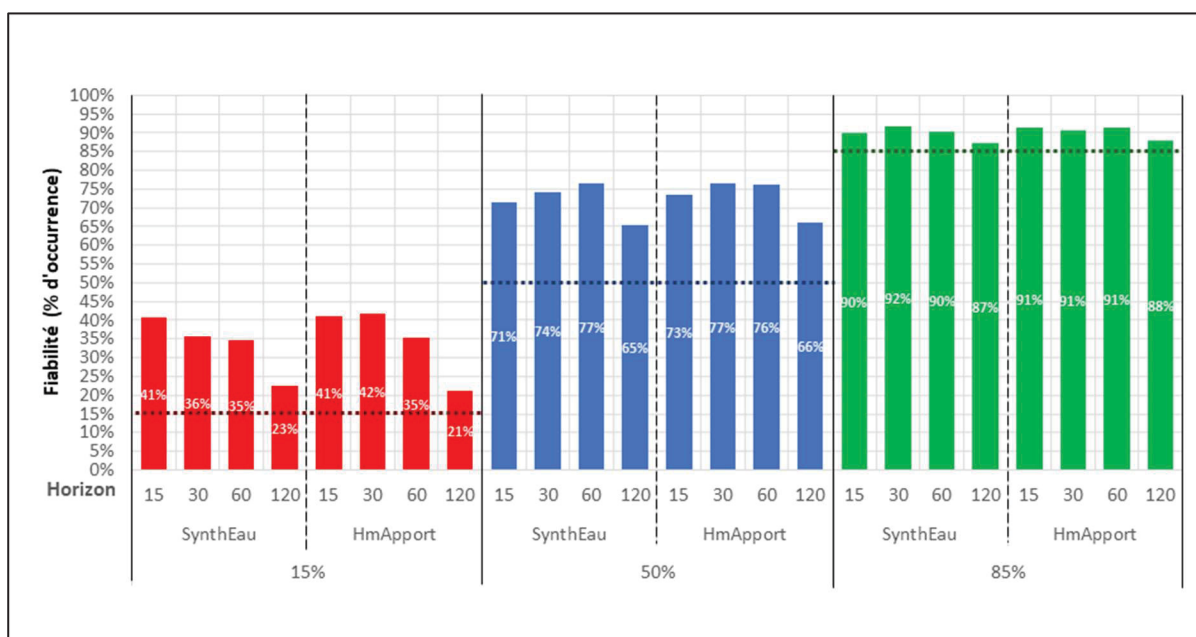


Figure-A II 1 Fiabilité des scénarios pour le bassin versant Caniapiscou

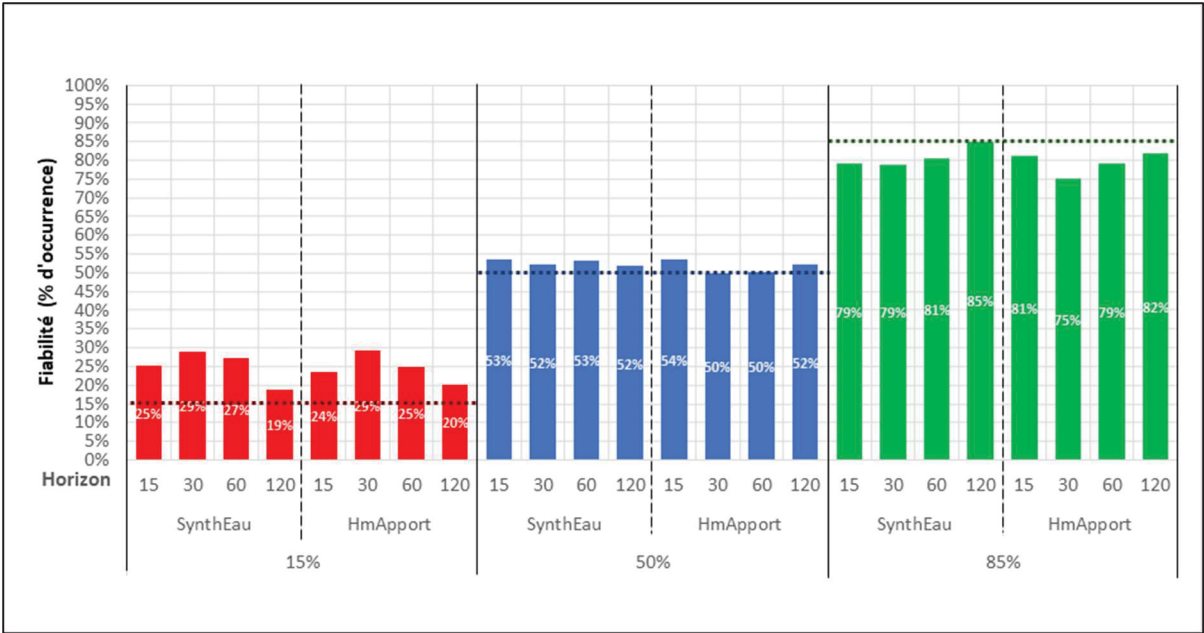


Figure-A II 2 Fiabilité des scénarios pour le bassin versant Eastmain-1

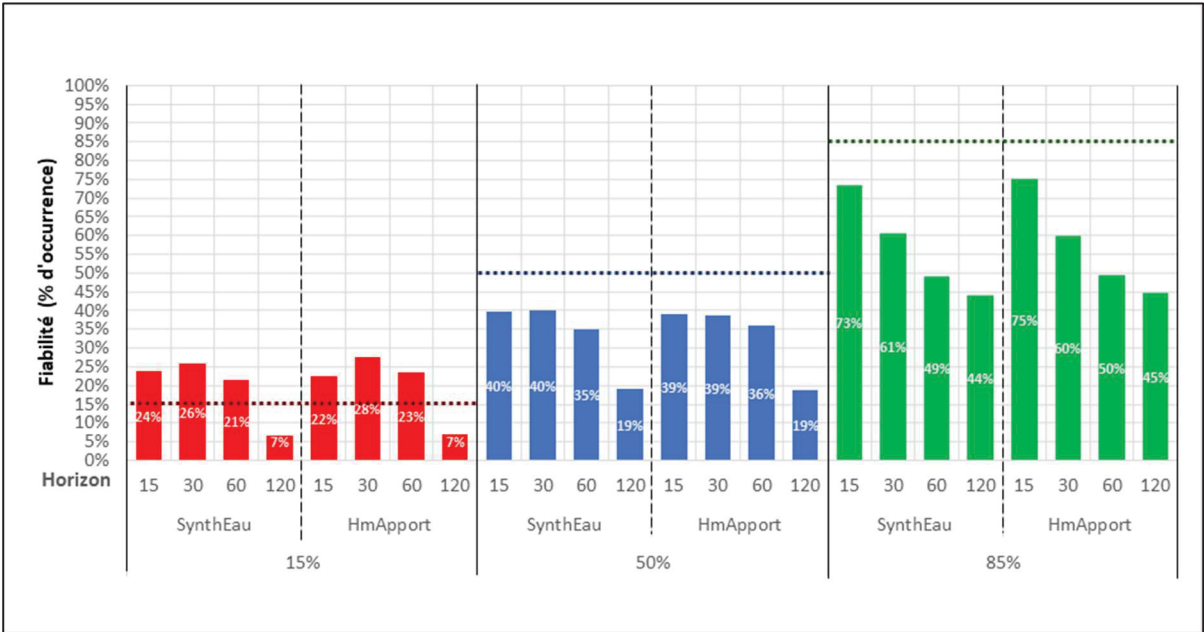


Figure-A II 3 Fiabilité des scénarios pour le bassin versant La Grande-1

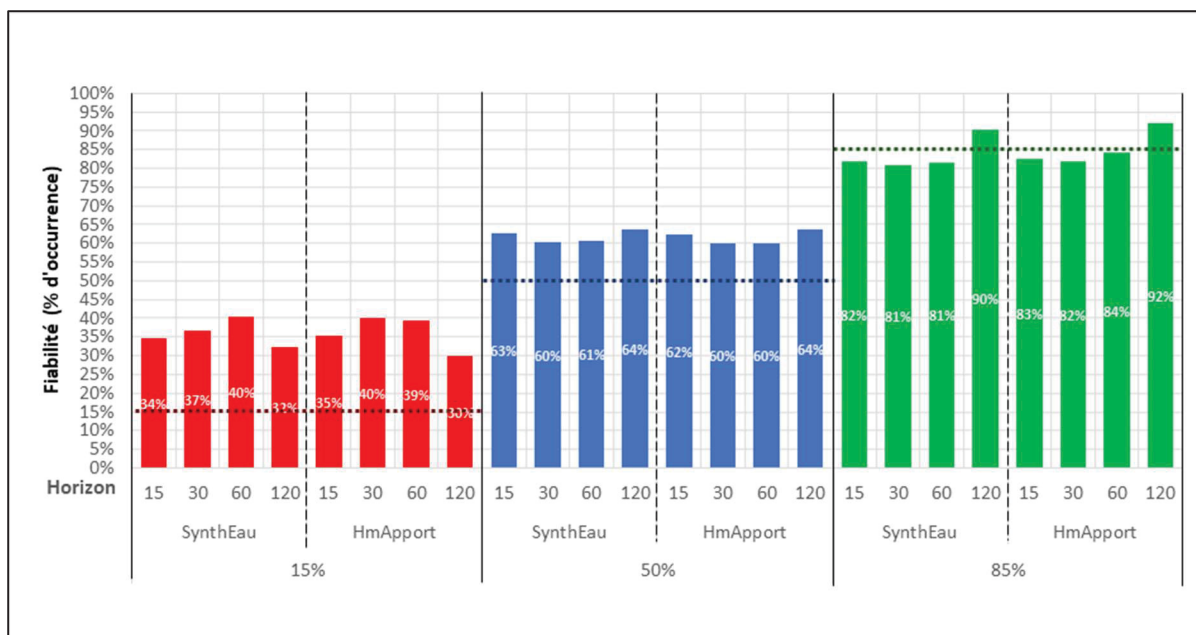


Figure-A II 4 Fiabilité des scénarios pour le bassin versant La Grande-2 et Lac Sakami

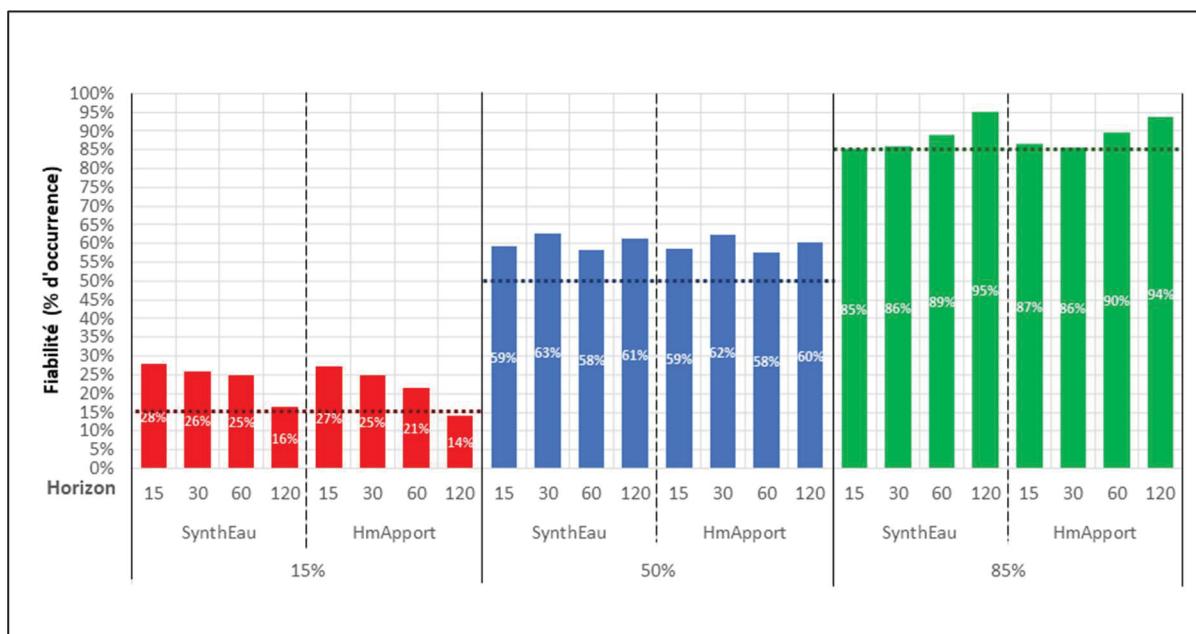


Figure-A II 5 Fiabilité des scénarios pour le bassin versant La Grande-3

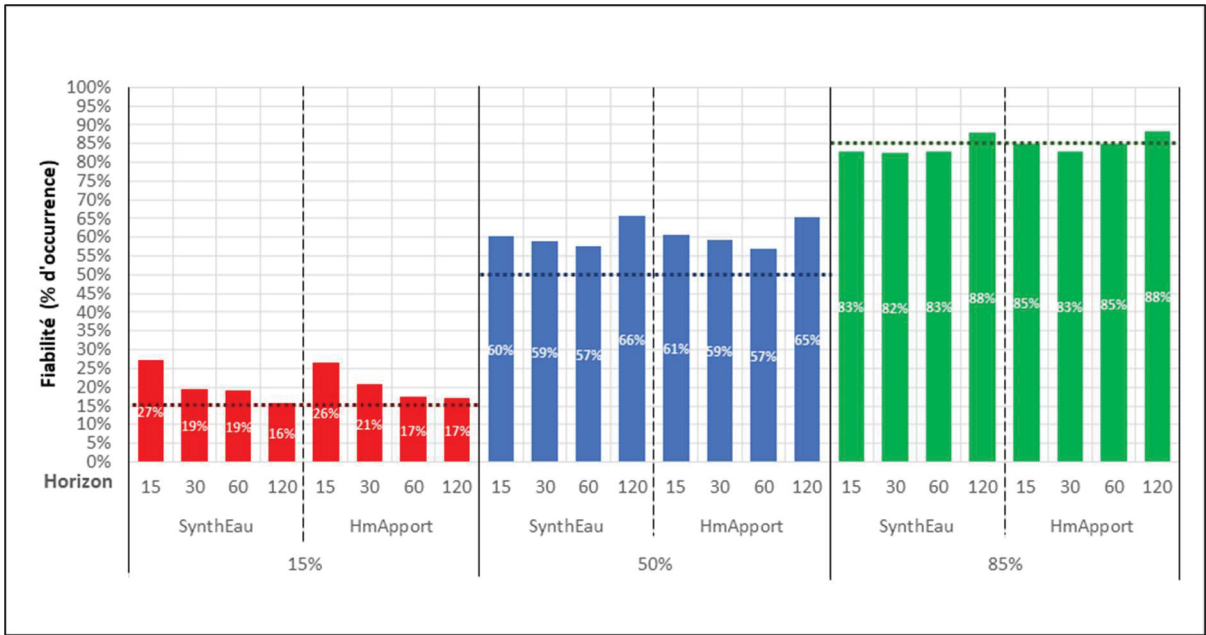


Figure-A II 6 Fiabilité des scénarios pour le bassin versant La Grande-4

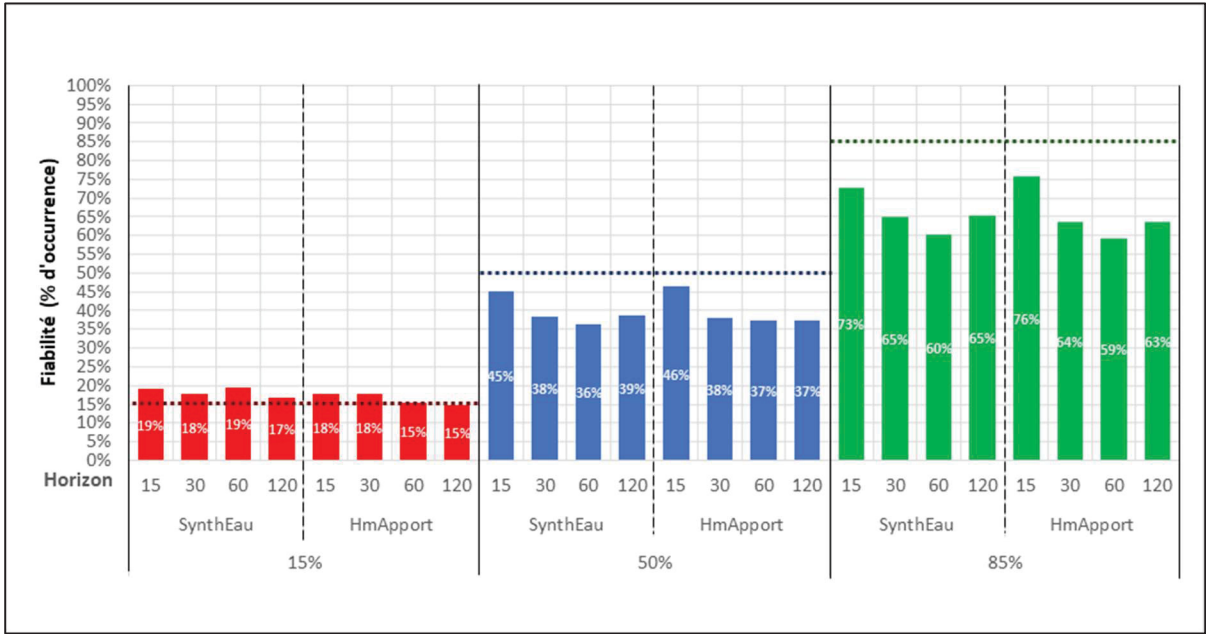


Figure-A II 7 Fiabilité des scénarios pour le bassin versant Lac Mesgouez

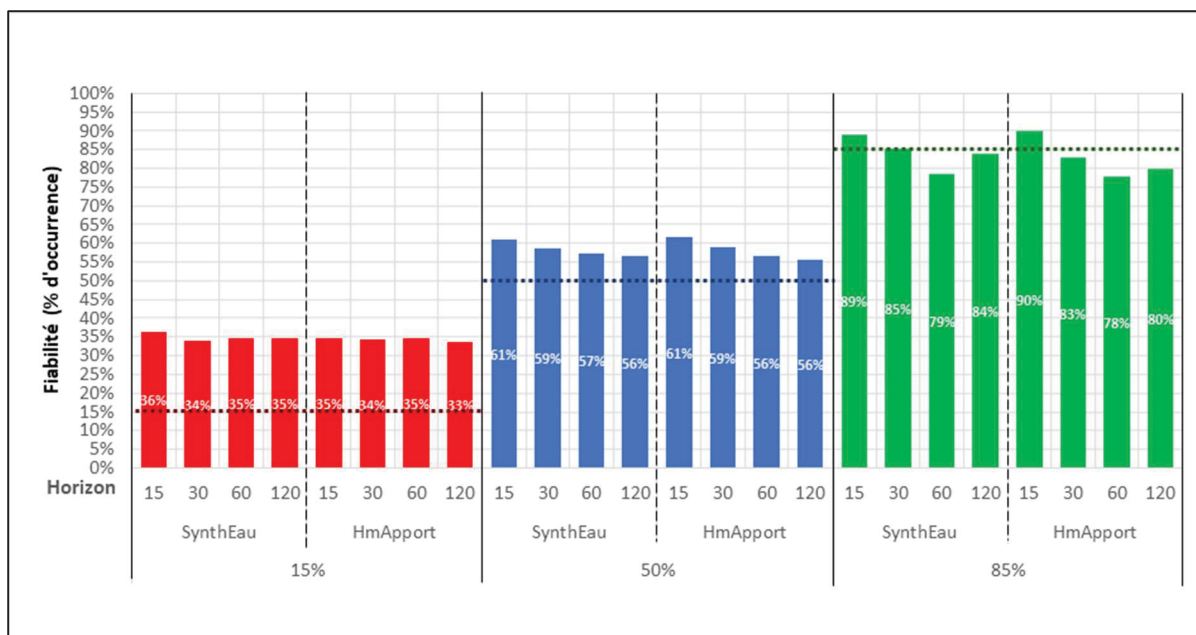


Figure-A II 8 Fiabilité des scénarios pour le bassin versant Lac Mistassini

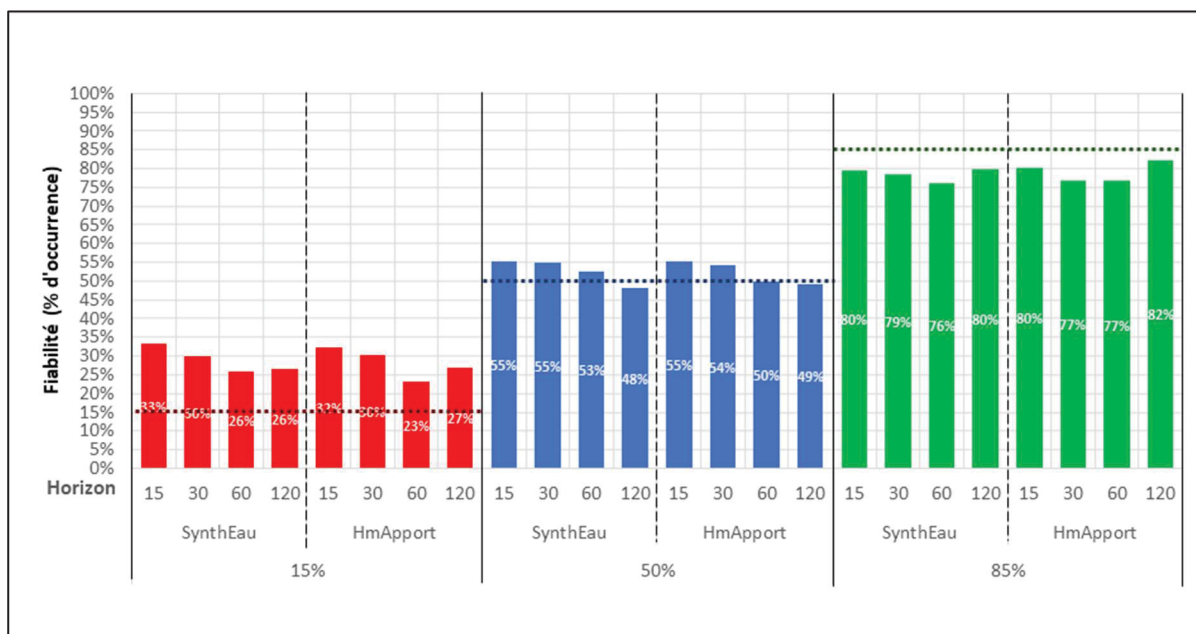


Figure-A II 9 Fiabilité des scénarios pour le bassin versant Lac Opinaca

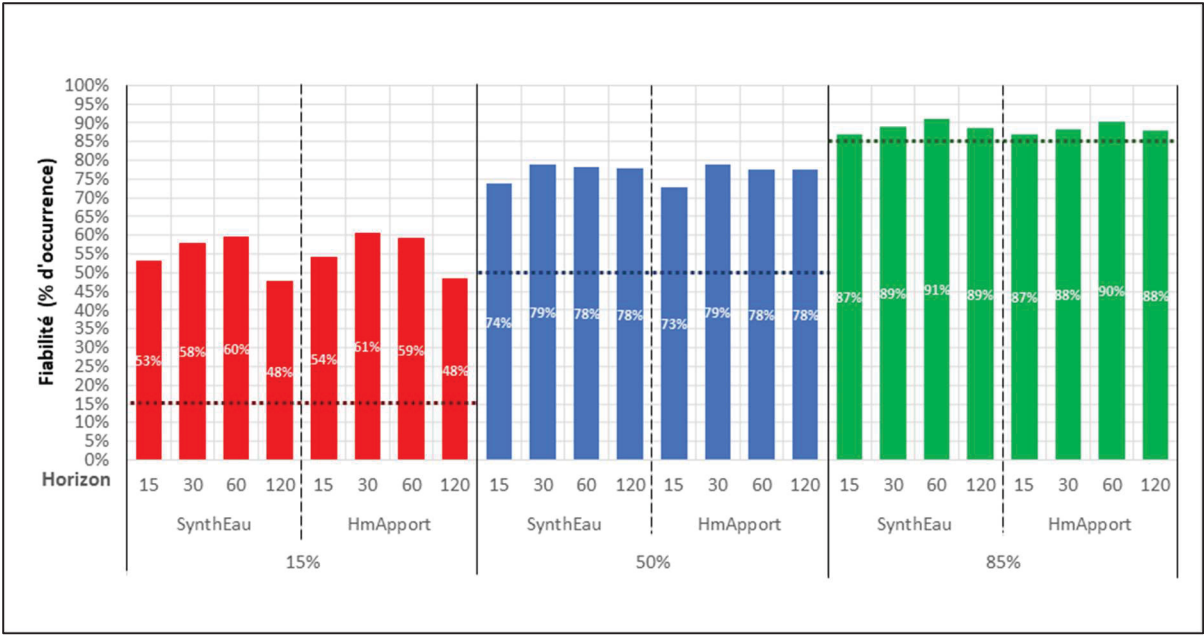


Figure-A II 10 Fiabilité des scénarios pour le bassin versant Laforge-1

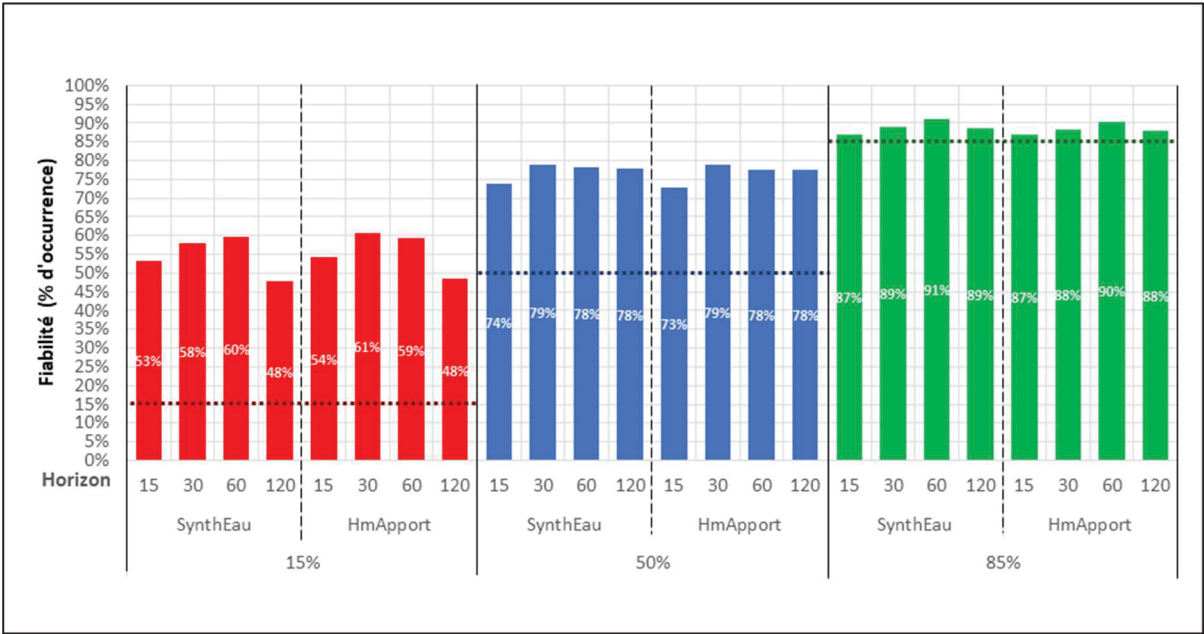


Figure-A II 11 Fiabilité des scénarios pour le bassin versant Laforge-2

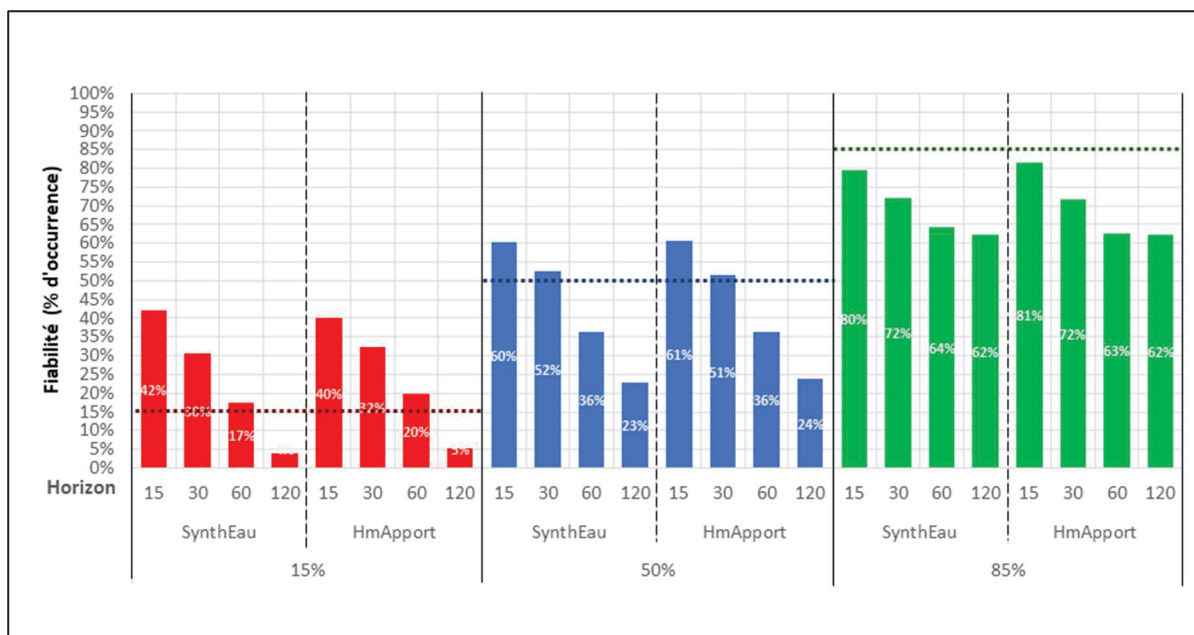


Figure-A II 12 Fiabilité des scénarios pour le bassin versant Rupert bief amont

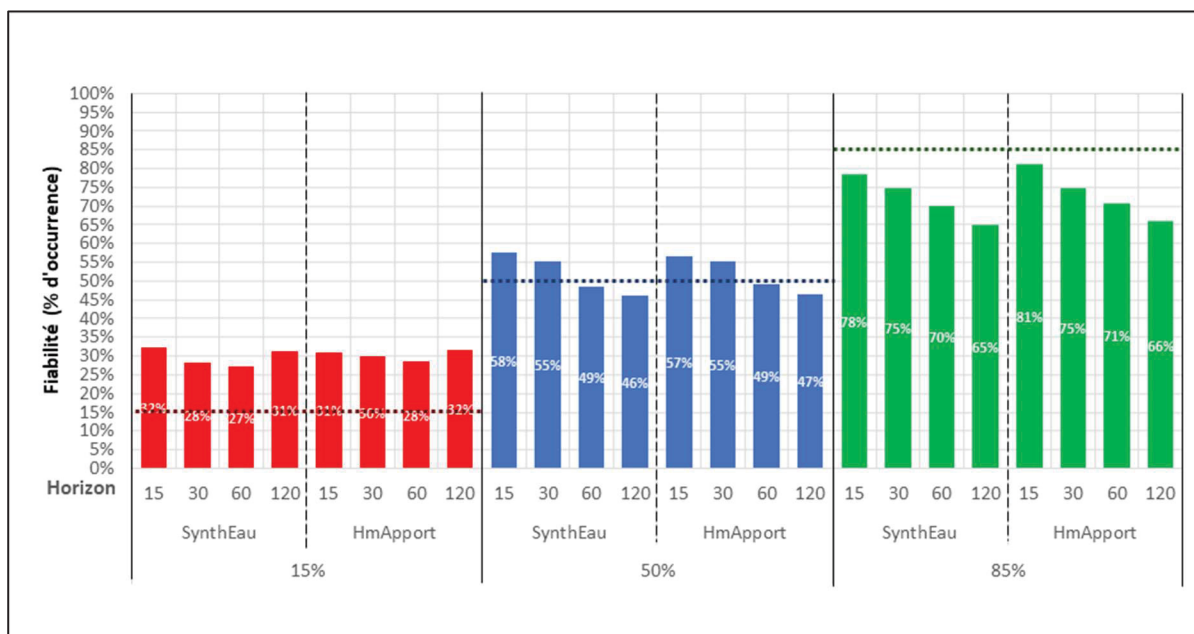


Figure-A II 13 Fiabilité des scénarios pour le bassin versant Rupert bief aval

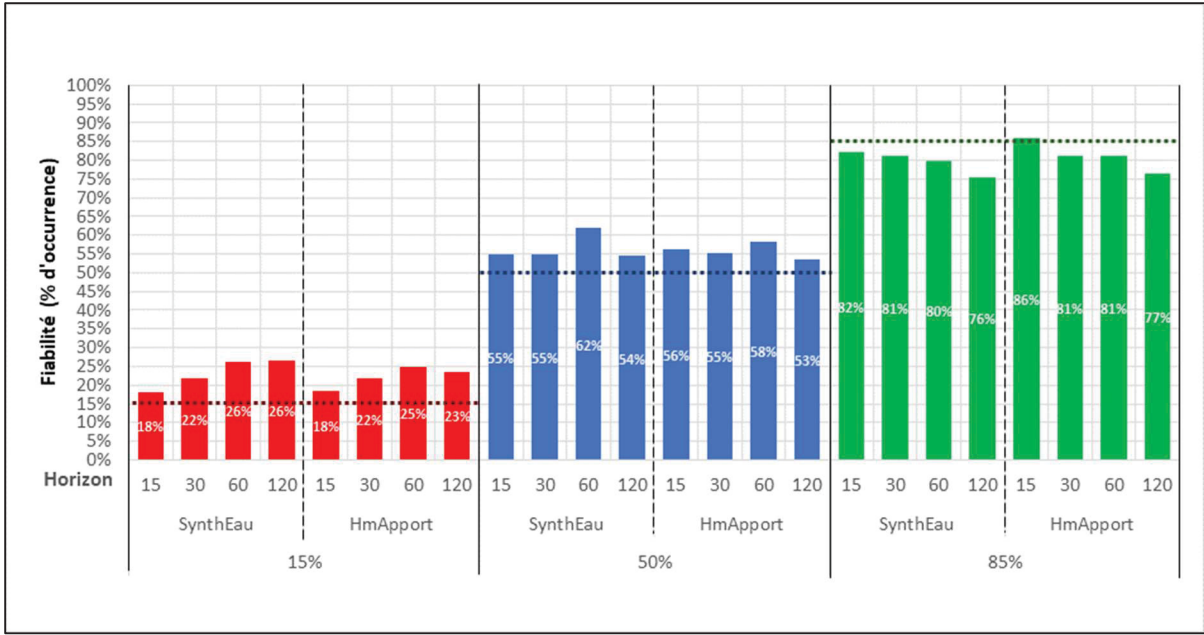


Figure-A II 14 Fiabilité des scénarios pour le bassin versant Beaumont

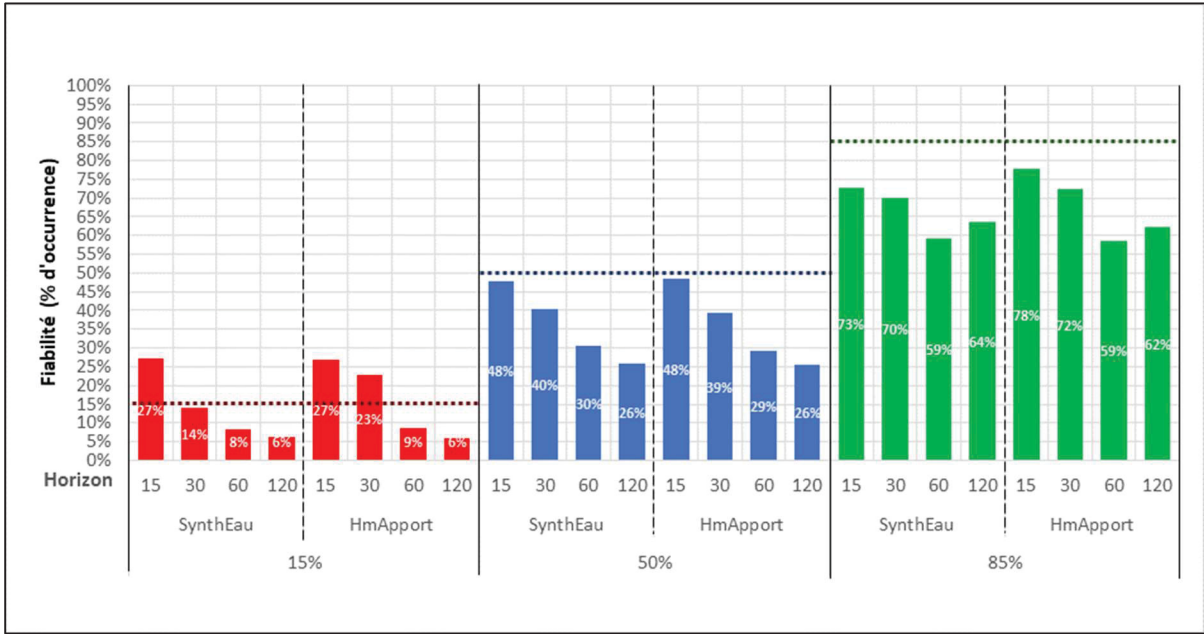


Figure-A II 15 Fiabilité des scénarios pour le bassin versant Gouin

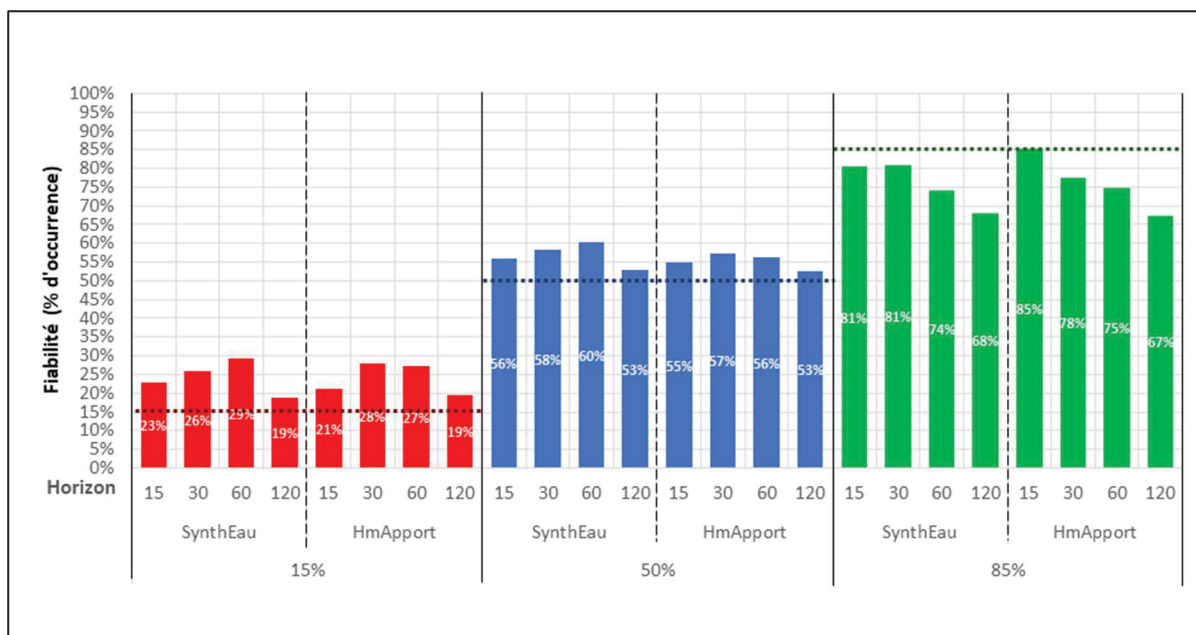


Figure-A II 16 Fiabilité des scénarios pour le bassin versant Grand-Mere

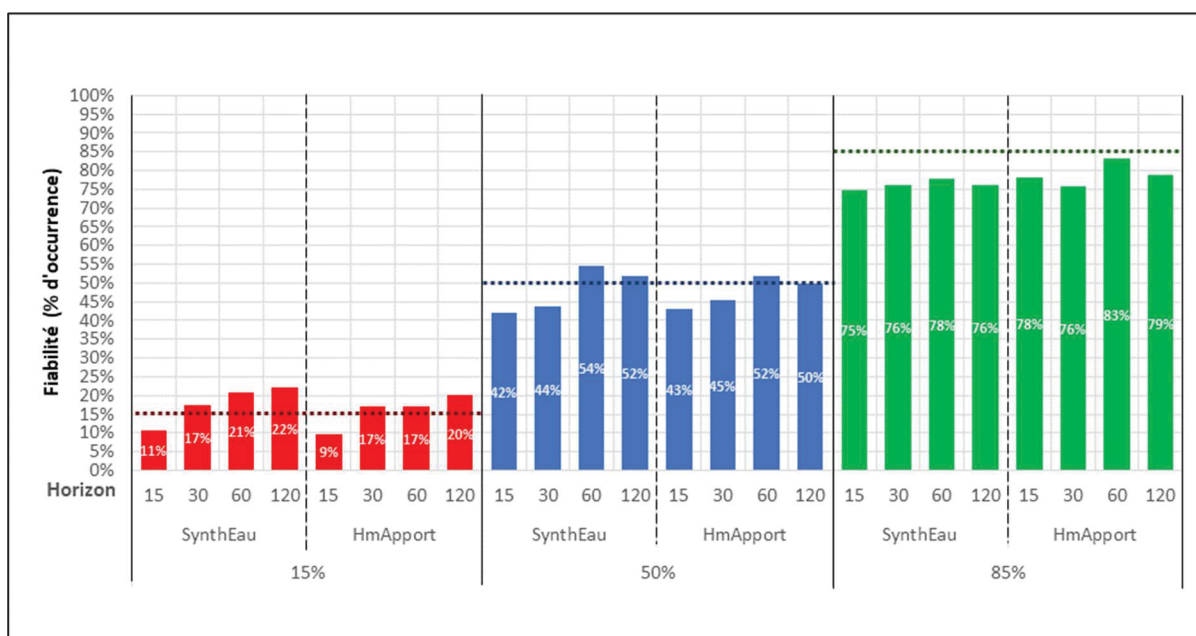


Figure-A II 17 Fiabilité des scénarios pour le bassin versant La Tuque

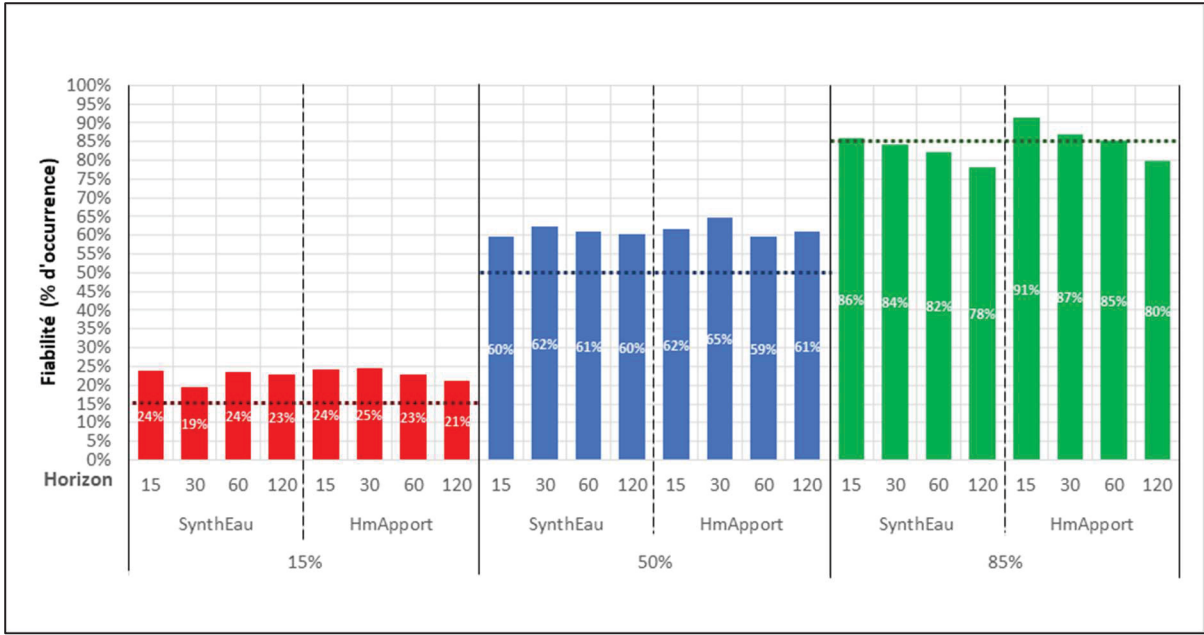


Figure-A II 18 Fiabilité des scénarios pour le bassin versant Manouane ABC

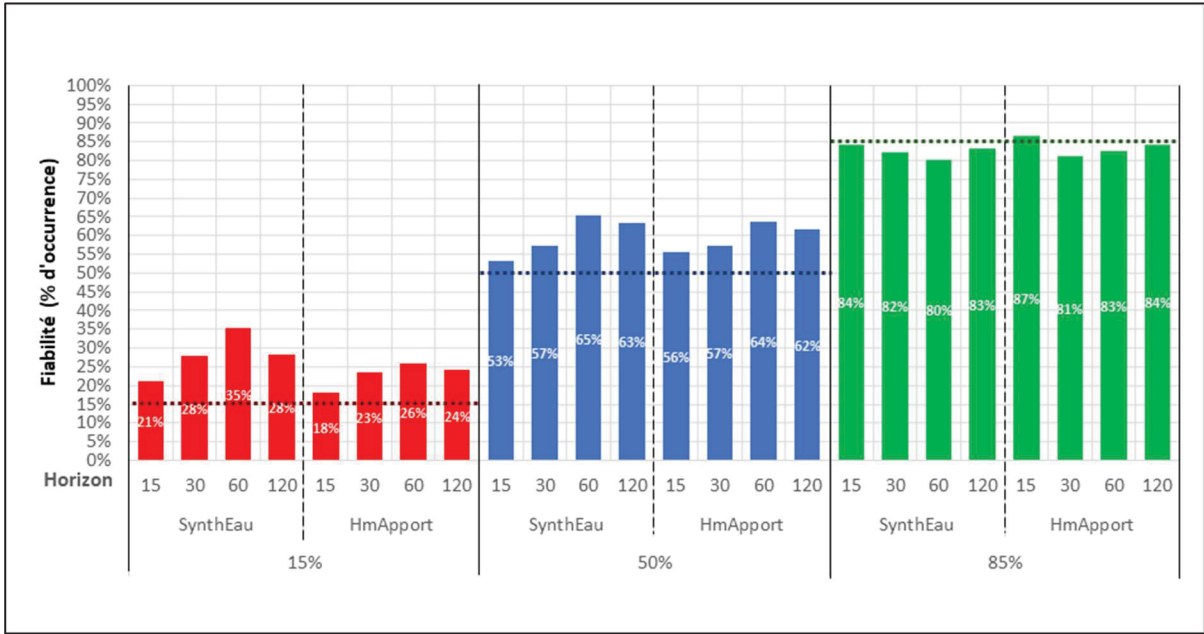


Figure-A II 19 Fiabilité des scénarios pour le bassin versant Mekinac

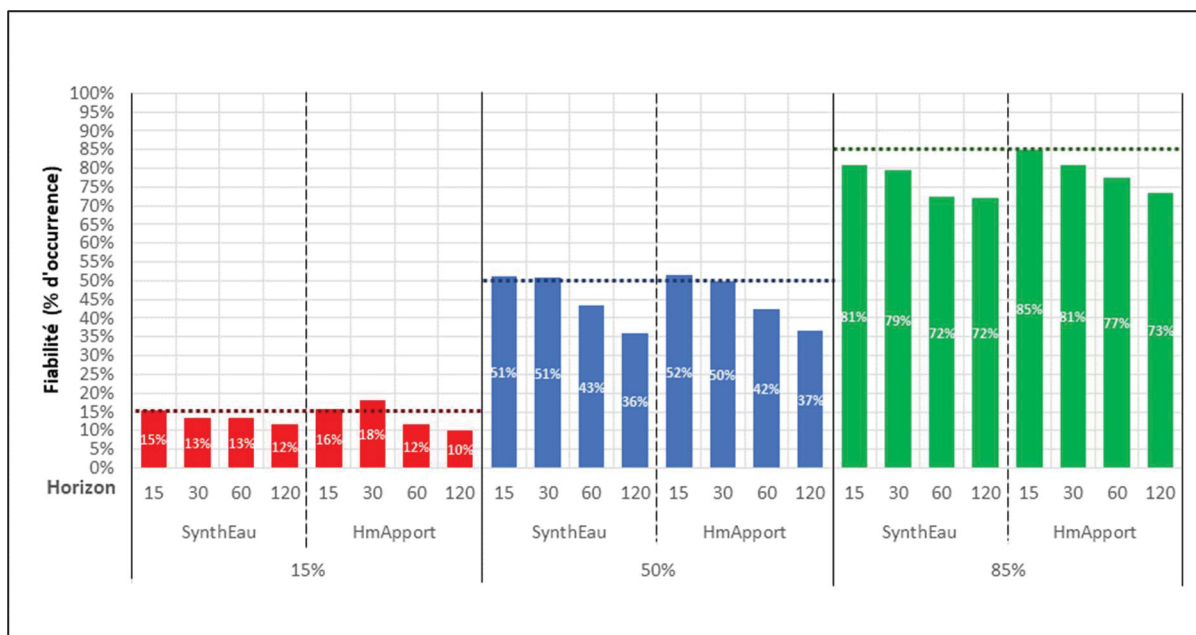


Figure-A II 20 Fiabilité des scénarios pour le bassin versant Taureau

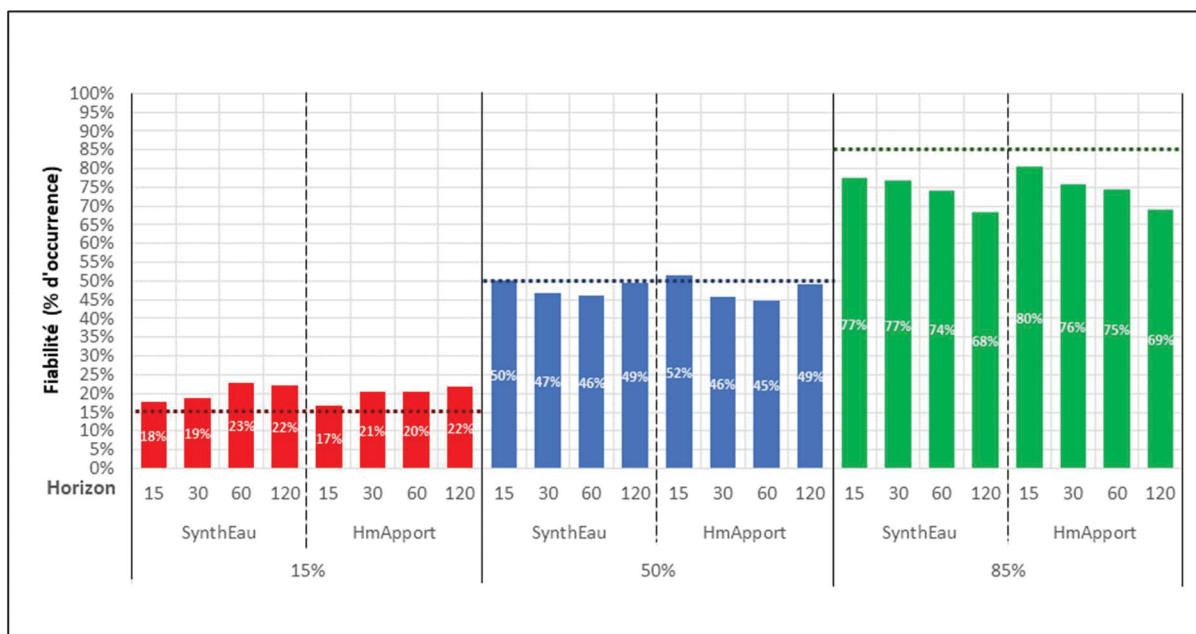


Figure-A II 21 Fiabilité des scénarios pour le bassin versant Trenché

ANNEXE III

FIGURES DES APPORTS HISTORIQUES JOURNALIERS 1950-2023 PAR BASSIN VERSANT

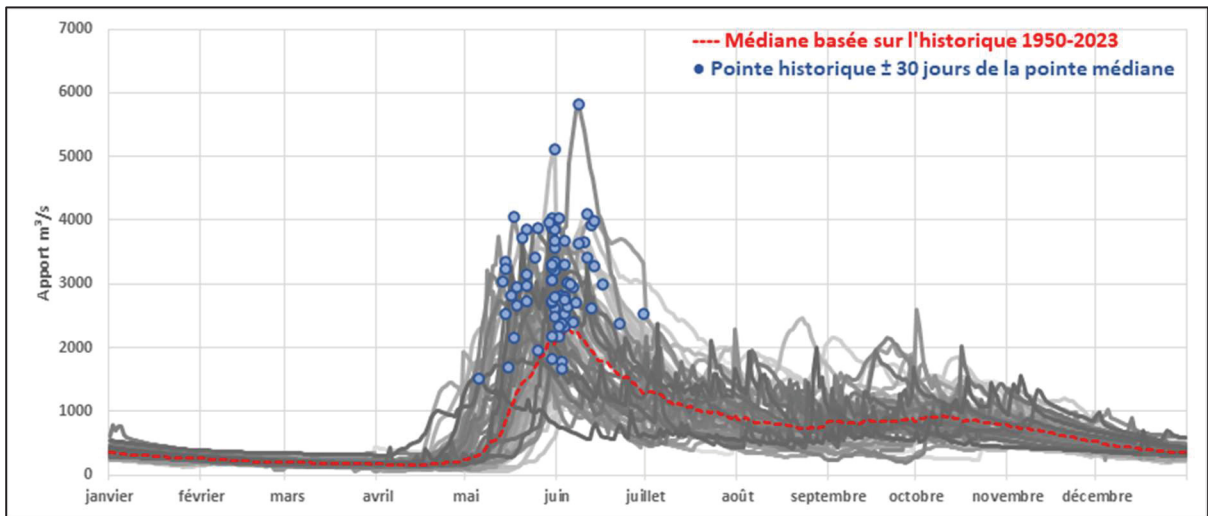


Figure-A III 1 Apports historiques 1950 à 2023 pour le bassin versant Caniapiscou

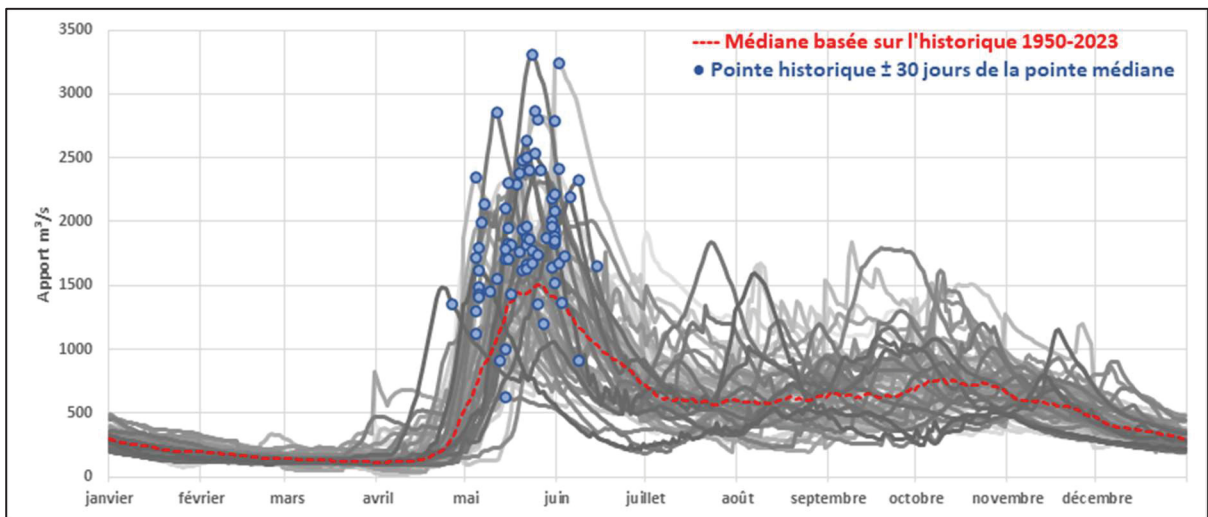


Figure-A III 2 Apports historiques 1950 à 2023 pour le bassin versant Eastmain-1

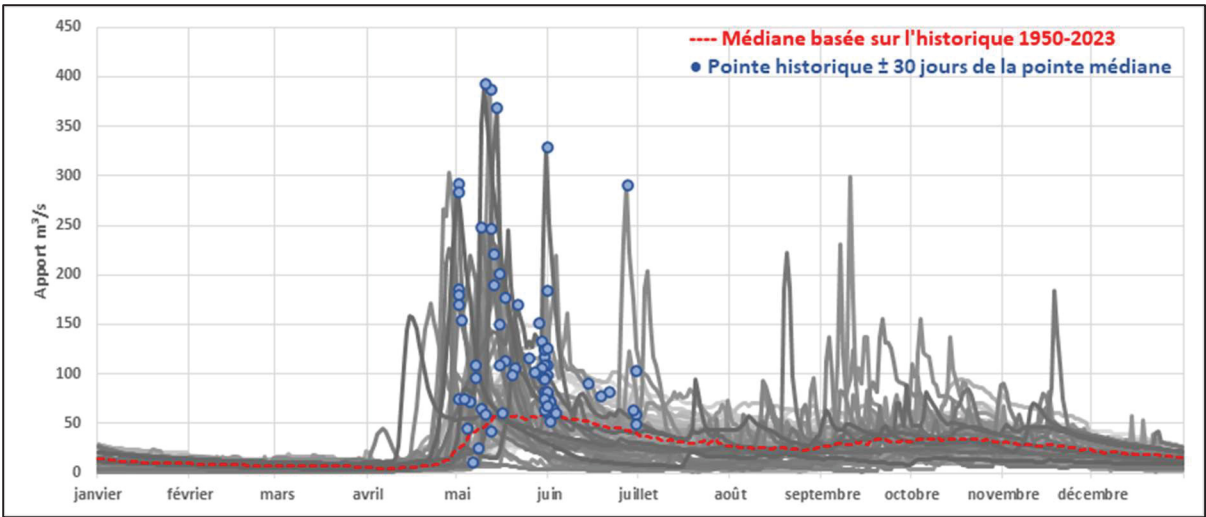


Figure-A III 3 Apports historiques 1950 à 2023 pour le bassin versant La Grande-1

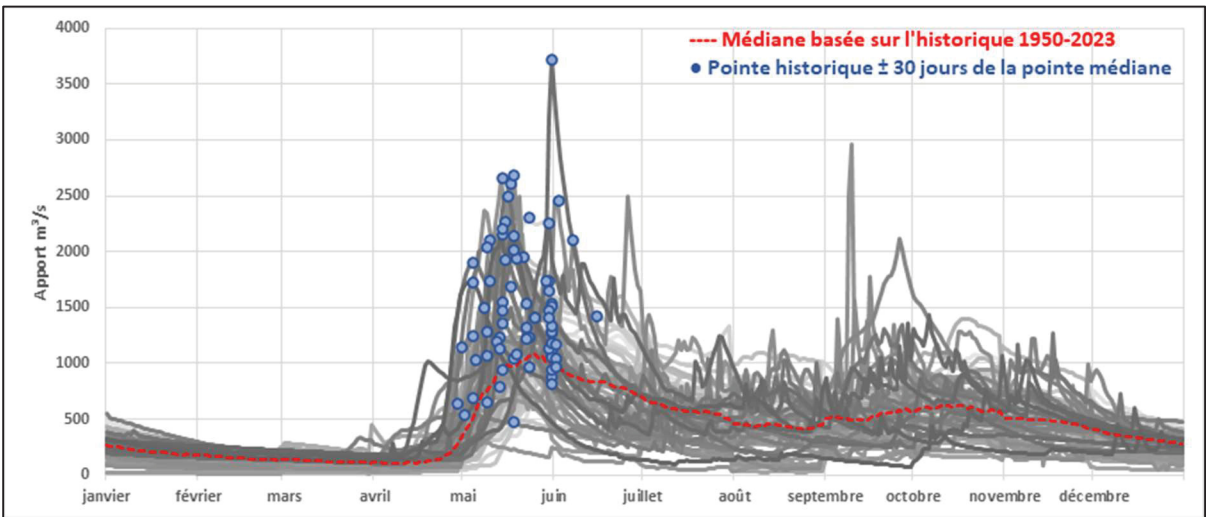


Figure-A III 4 Apports historiques 1950 à 2023 pour le bassin versant La Grande 2 et Lac Sakami

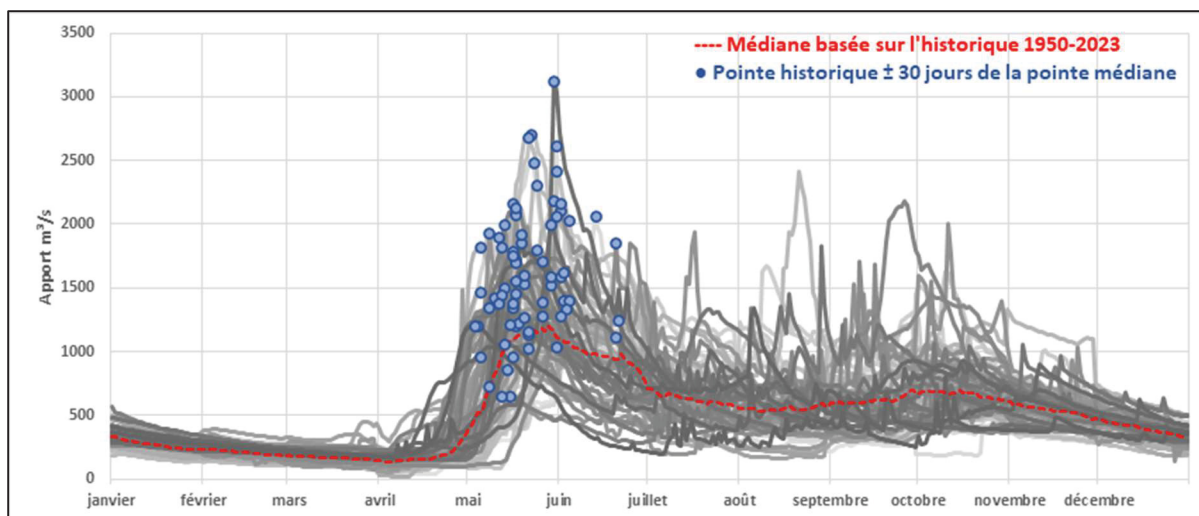


Figure-A III 5 Apports historiques 1950 à 2023 pour le bassin versant La Grande 3

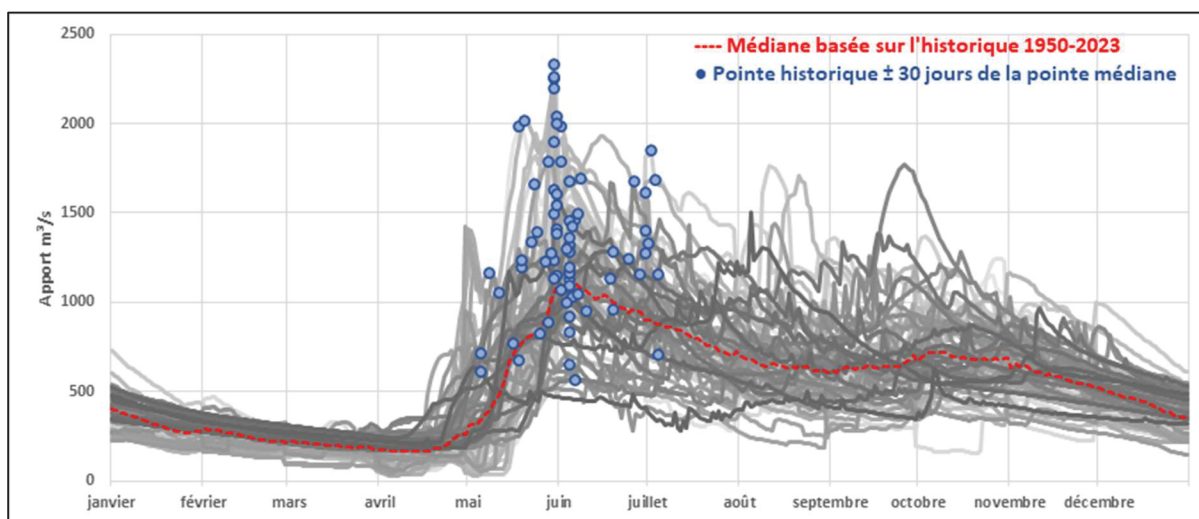


Figure-A III 6 Apports historiques 1950 à 2023 pour le bassin versant La Grande 4

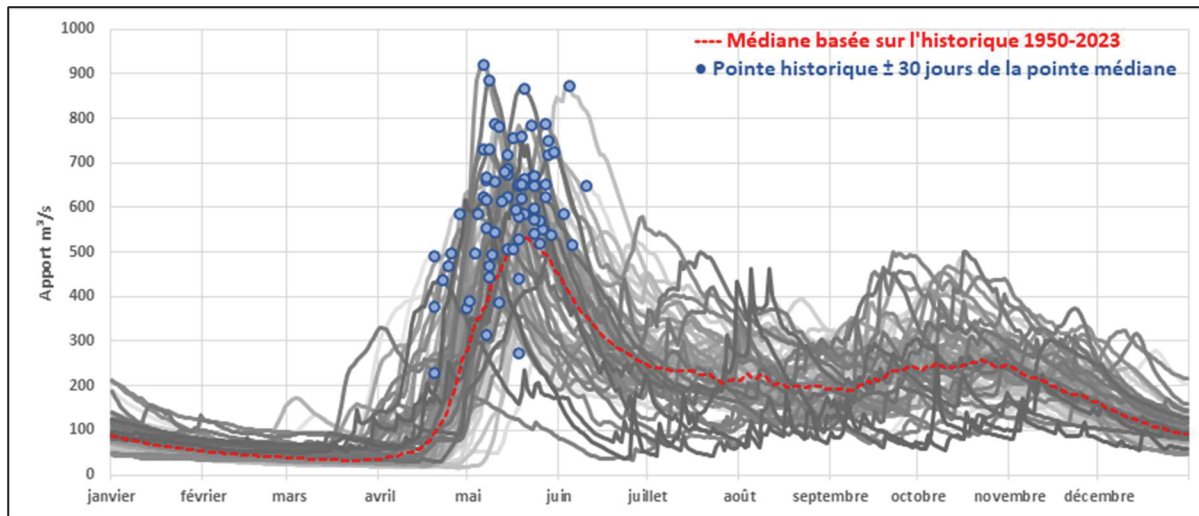


Figure-A III 7 Apports historiques 1950 à 2023 pour le bassin versant Lac Mesgoez

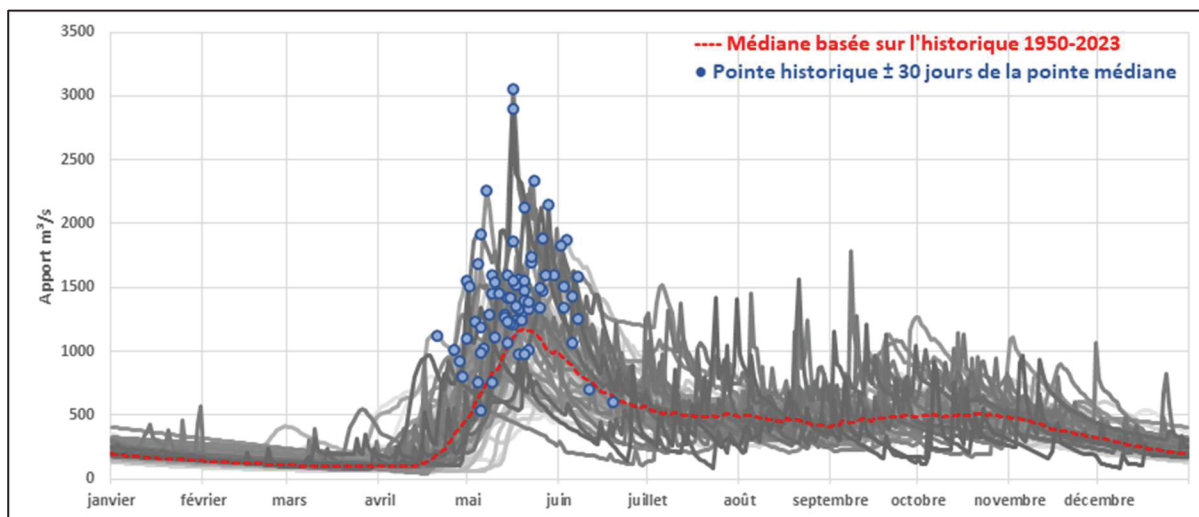


Figure-A III 8 Apports historiques 1950 à 2023 pour le bassin versant Lac Mistassini

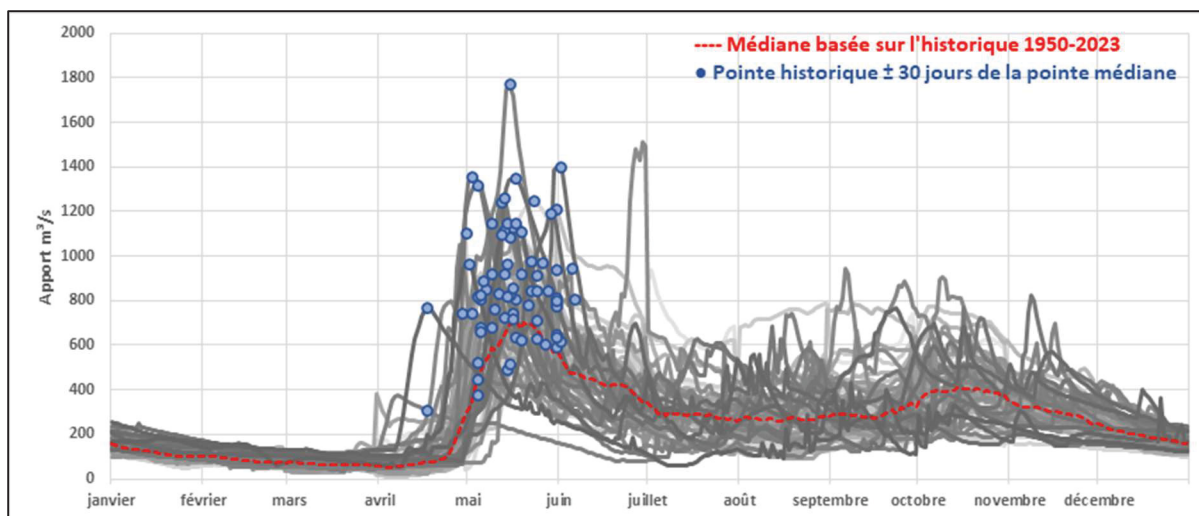


Figure-A III 9 Apports historiques 1950 à 2023 pour le bassin versant Lac Opinaca

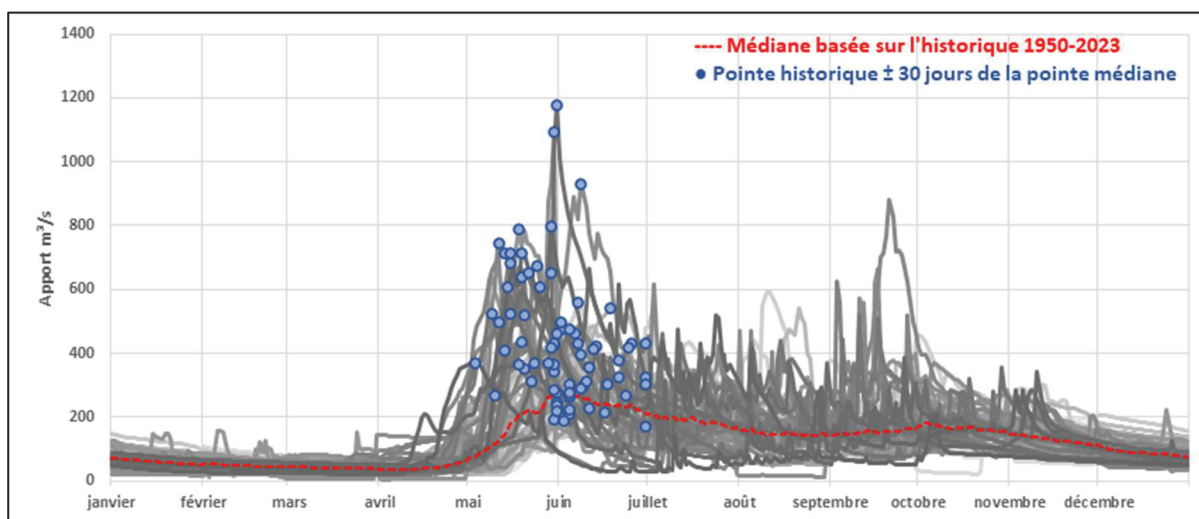


Figure-A III 10 Apports historiques 1950 à 2023 pour le bassin versant Laforge 1

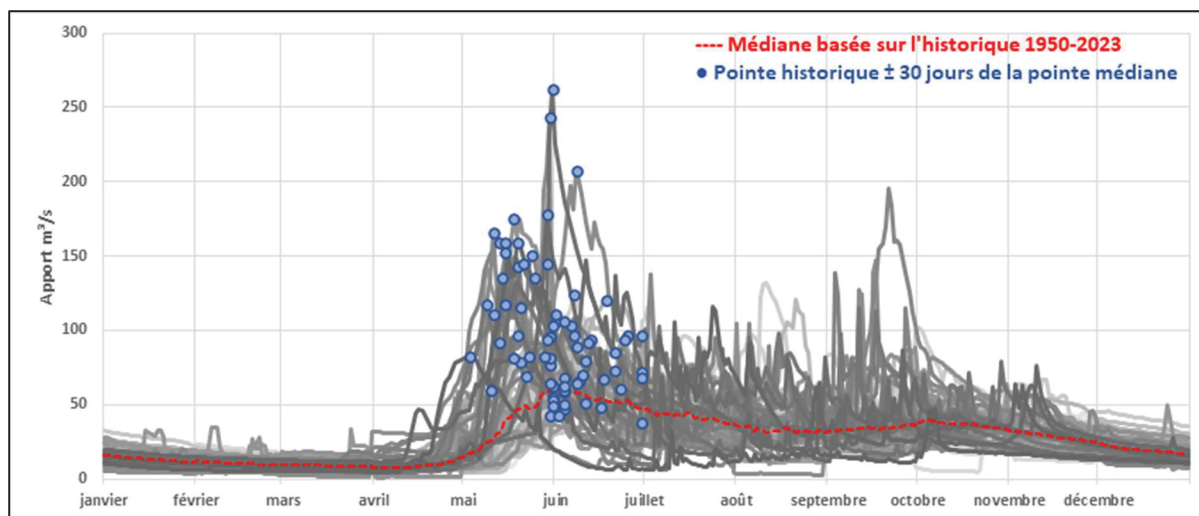


Figure-A III 11 Apports historiques 1950 à 2023 pour le bassin versant Laforge 2

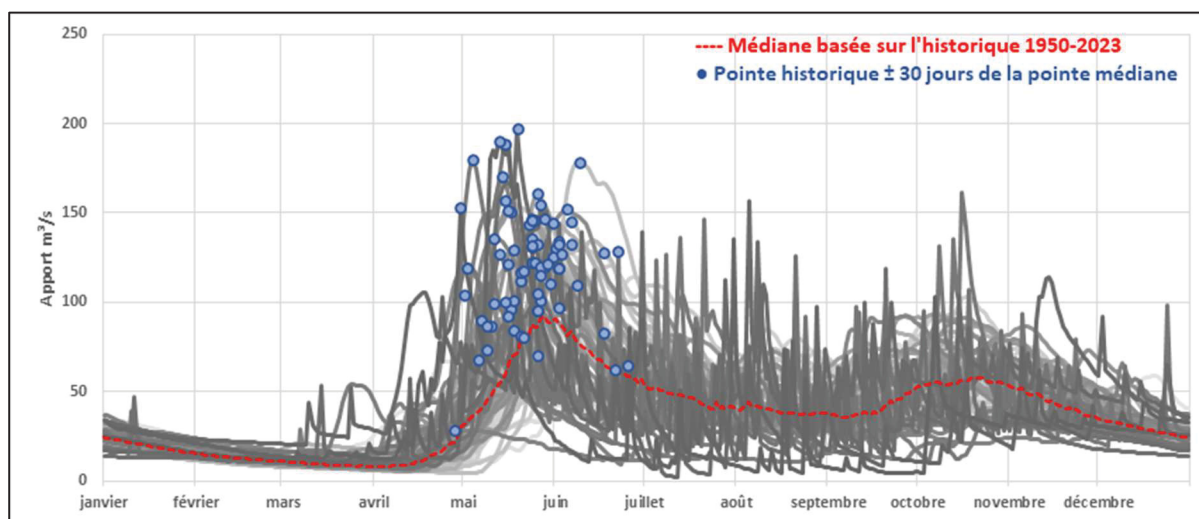


Figure-A III 12 Apports historiques 1950 à 2023 pour le bassin versant Rupert bief amont

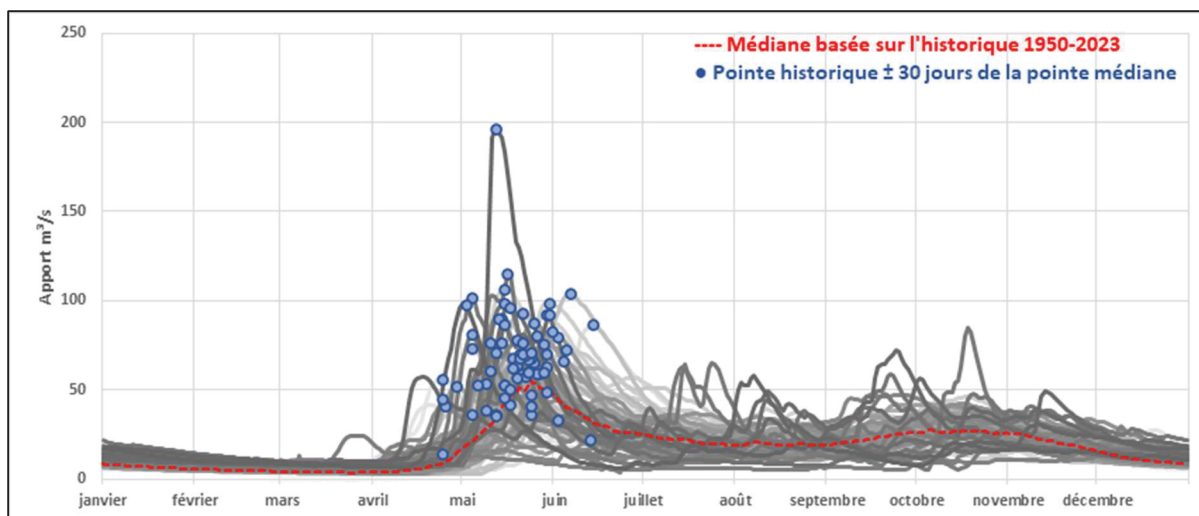


Figure-A III 13 Apports historiques 1950 à 2023 pour le bassin versant Rupert bief aval

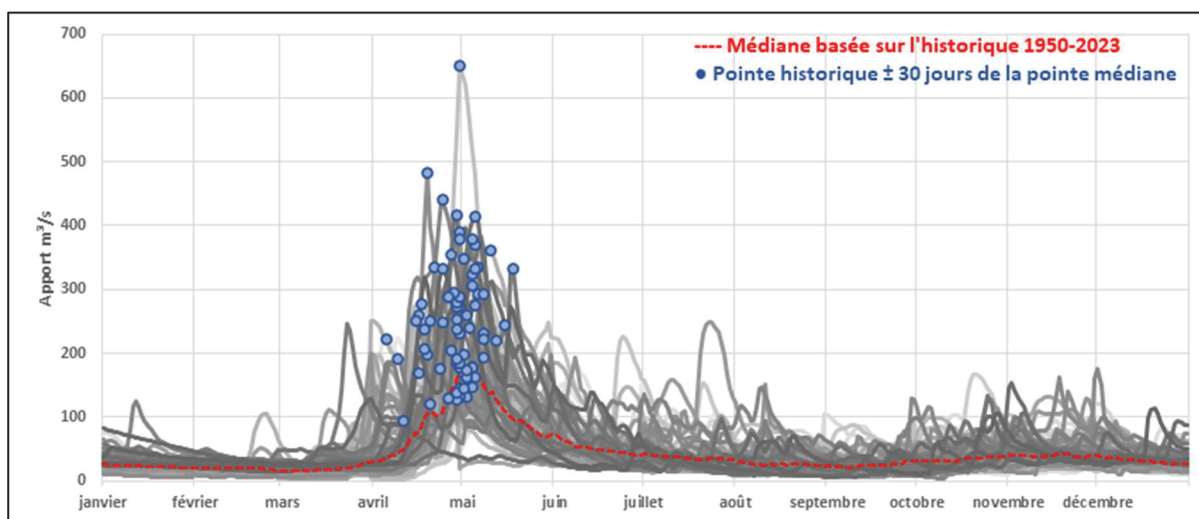


Figure-A III 14 Apports historiques 1950 à 2023 pour le bassin versant Beaumont

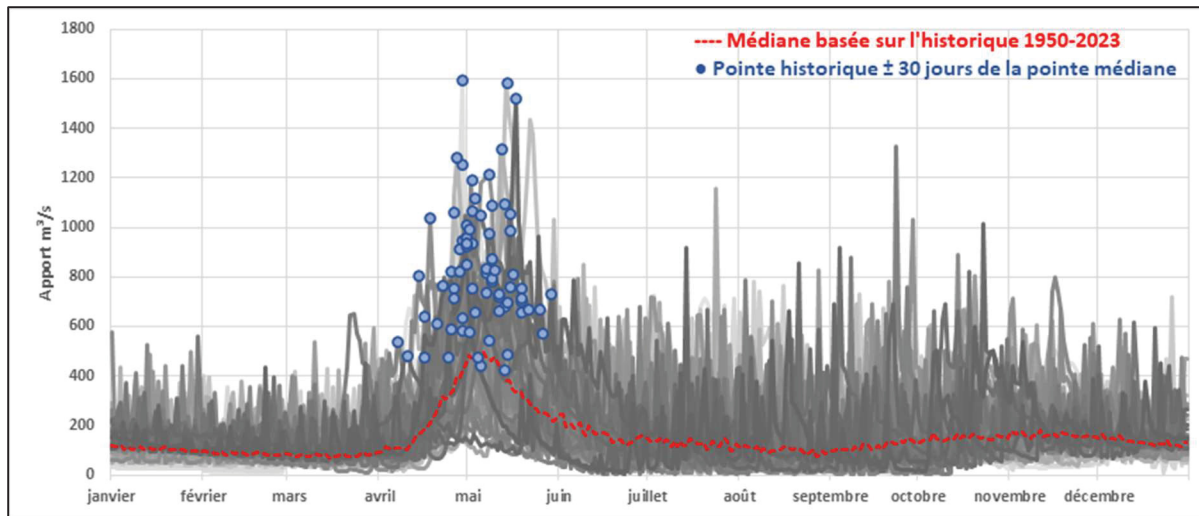


Figure-A III 15 Apports historiques 1950 à 2023 pour le bassin versant Gouin

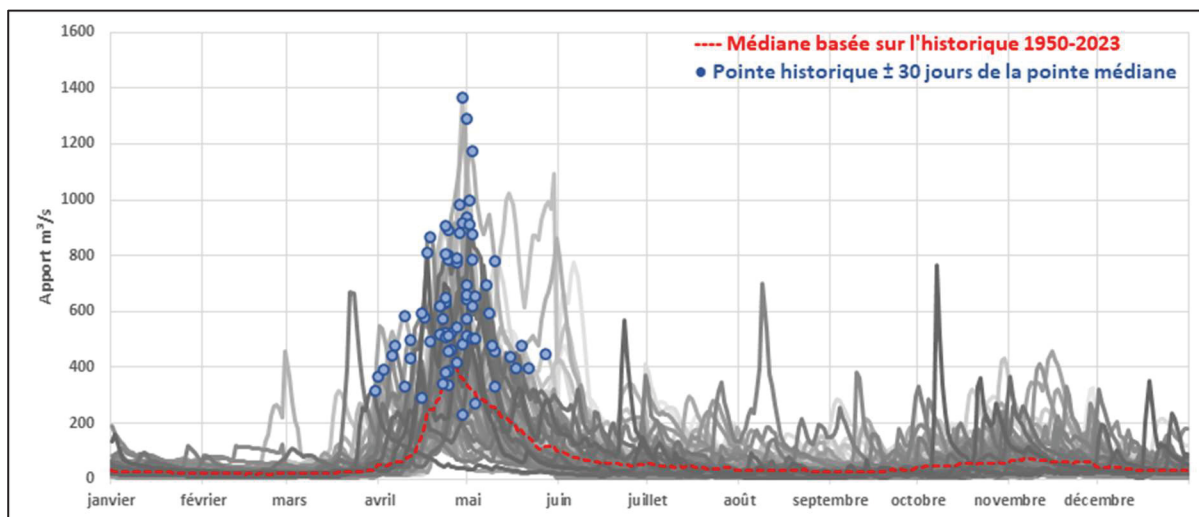


Figure-A III 16 Apports historiques 1950 à 2023 pour le bassin versant Grand-Mere

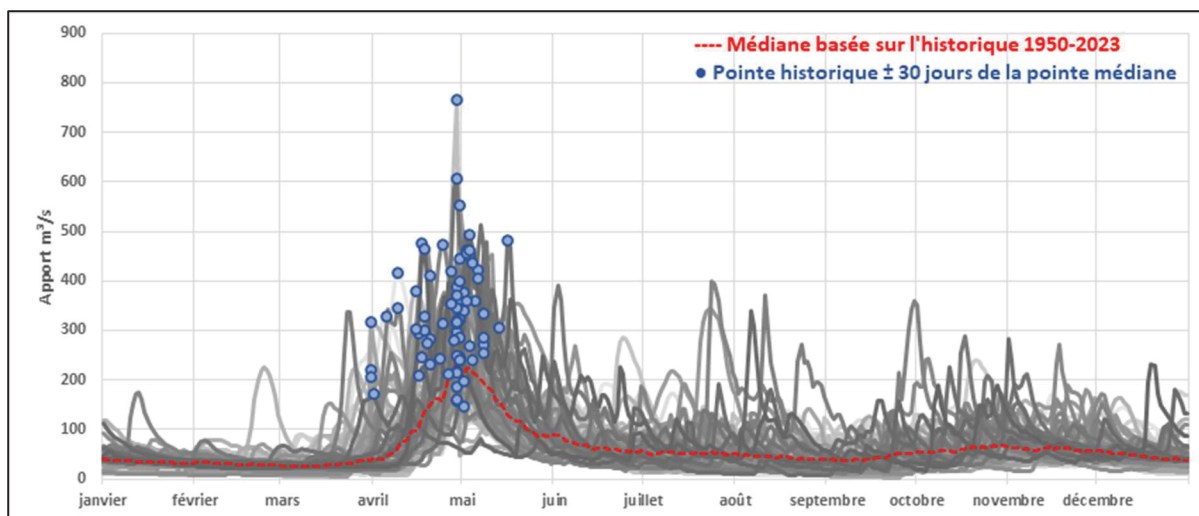


Figure-A III 17 Apports historiques 1950 à 2023 pour le bassin versant La Tuque

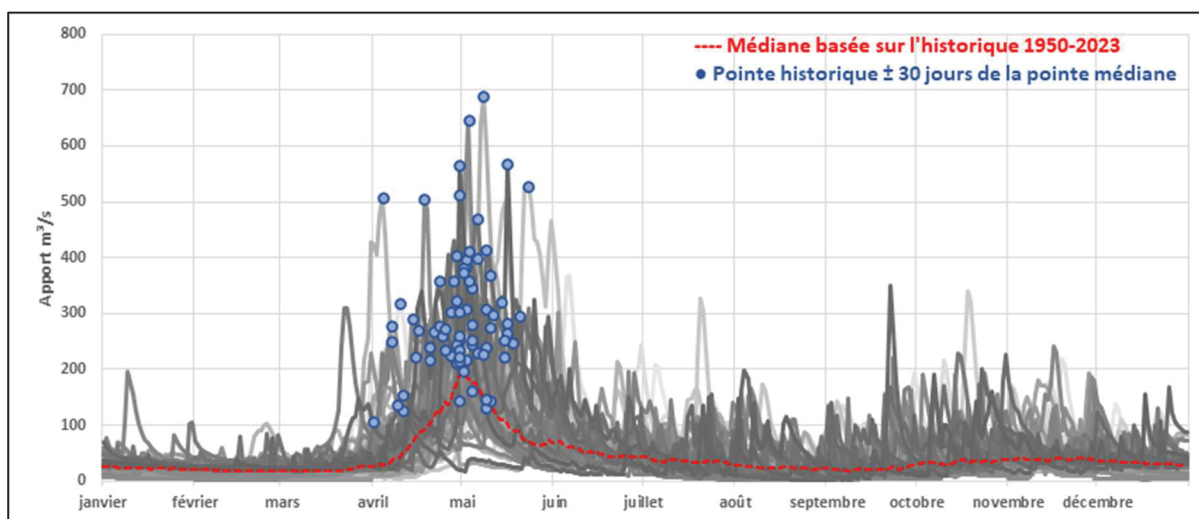


Figure-A III 18 Apports historiques 1950 à 2023 pour le bassin versant Manouane ABC

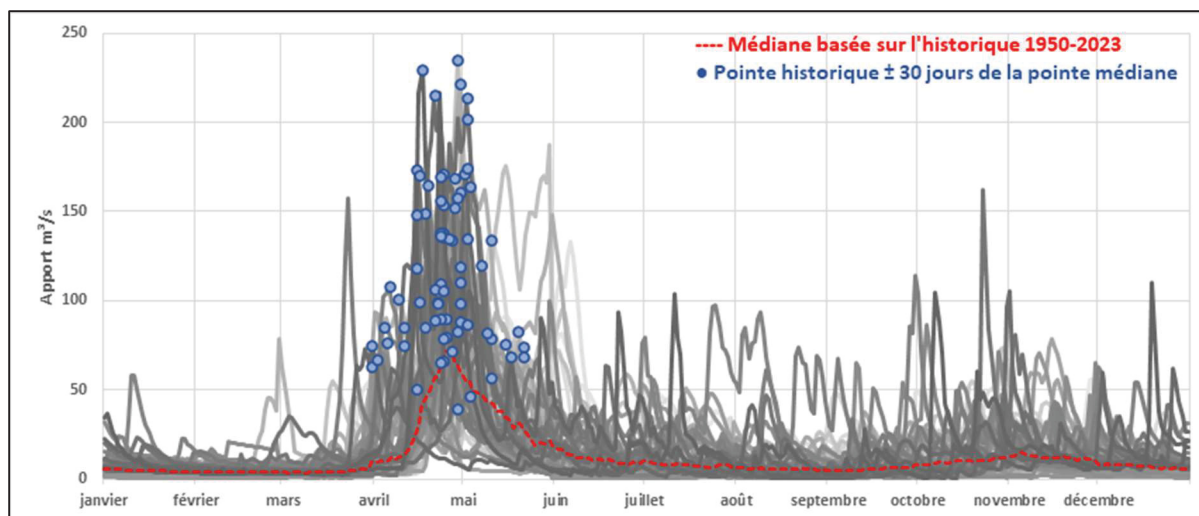


Figure-A III 19 Apports historiques 1950 à 2023 pour le bassin versant Mekinac

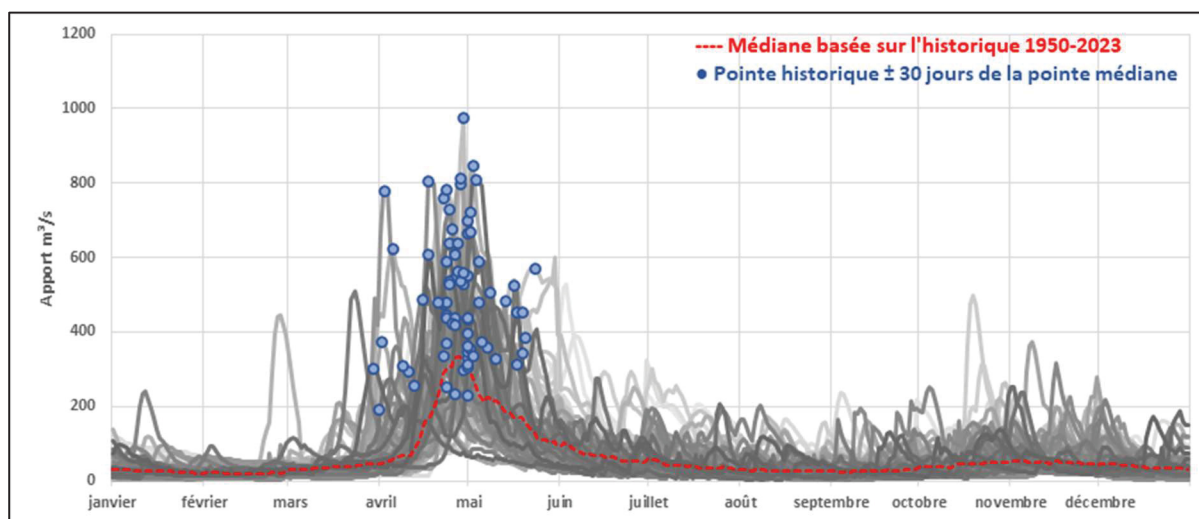


Figure-A III 20 Apports historiques 1950 à 2023 pour le bassin versant Taureau

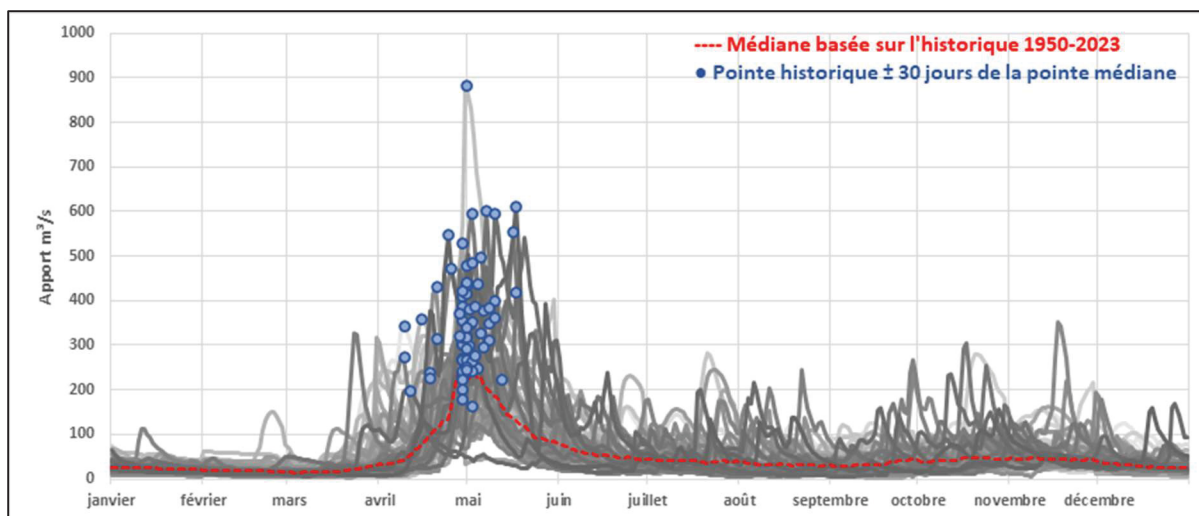


Figure-A III 21 Apports historiques 1950 à 2023 pour le bassin versant Trenché

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Ambardar, A. (2003). *Digital signal processing: A modern introduction*. Michigan Technological University.
- Arsenault, R., & Côté, P. (2019). Analysis of the effects of biases in ensemble streamflow prediction (ESP) forecasts on electricity production in hydropower reservoir management. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(6), 2735–2750. doi:10.5194/hess-23-2735-2019
- Arsenault, R., Brissette, F., & Martel, J.-L. (2016a). Improving Hydrological Ensemble Forecasts Using Post-Processing and Data Assimilation. *Journal of Hydrometeorology*, 17(3), 1025–1040. doi:10.1175/JHM-D-15-0177.1
- Arsenault, R., Latraverse, M., & Duchesne, T. (2016b). An efficient method to correct under-dispersion in ensemble streamflow prediction of inflow volumes for reservoir optimization. *Water Resources Management*, 30(13), 4363–4380. doi:10.1007/s11269-016-1425-4
- Bobée, B., & Robitaille, P. (1977). The use of the Pearson Type III and Log Pearson Type III distributions for flood frequency analysis. Dans *Water Resources Research* (pp. 427–443).
- Boucher, M.-A., Tremblay, D., Delorme, L., Perreault, L., & Anctil, F. (2012). Hydro-economic assessment of hydrological forecasting systems. *Journal of Hydrology*, 416–417, 133–144. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.11.042
- Cloke, H. L., & Pappenberger, F. (2009). Ensemble flood forecasting: A review. *Journal of Hydrology*, 375(3–4), 613–626. doi:10.1016/j.jhydrol.2009.06.005
- Courbariaux, M., Barbillon, P., & Perreault, L. (2019). Post-processing Multiensemble Temperature and Precipitation Forecasts Through an Exchangeable Normal-Gamma Model and Its Tobit Extension. *JABES*, 24, 309–345. doi:10.1007/s13253-019-00358-2
- Demeritt, D., N. S., Cloke, H., & Pappenberger, F. (2010). Challenges in communicating and using ensembles in operational flood forecasting. *Meteorological Applications*, 17(2), 209–222. doi:10.1002/met.194
- Fortin, V. (1999). *Le modèle météo-apport HSAMI : historique, théorie et application*. Rapport de recherche IREQ-99-255, Institut de recherche d'Hydro-Québec.
- Hydro-Québec. (2020). *Rapport annuel 2020*. Récupéré sur Hydro-Québec: <https://www.hydroquebec.com/data/documents-donnees/pdf/rapport-annuel-2020.pdf>

- Hydro-Québec. (2022). *Plan stratégique 2022-2026*. Récupéré sur <https://www.hydroquebec.com/data/documents-donnees/pdf/plan-strategique.pdf?v=2022-03-25>
- Institut du Québec. (2024). *Efficacité énergétique : incontournable pour décarboner le Québec - Simulation des besoins énergétiques pour électrifier les bâtiments et les transports*. Institut du Québec. Récupéré sur <https://institutduquebec.ca/wp-content/uploads/2024/10/IDQ-202410-EFFICACITE-ENERGETIQUE.pdf>
- Marinelli. (2007). *Analyse séries produites avec HMAPPORT*. Interne - Hydro-Québec Production.
- Mathieu, C. (2010). *Description du système de prévision des apports*. Interne - Hydro-Québec Production.
- MELCCFP. (2022). *Atlas hydroclimatique du Québec méridional - Rapport technique*. Récupéré sur <https://www.cehq.gouv.qc.ca/atlas-hydroclimatique/rapport-atlas-hydroclimatique-2022.pdf>
- MSP. (2022). *Bilan et perspectives : Inondations printanières 2019*. Québec, Canada. Ministère de la Sécurité publique. Récupéré sur https://cdn-contenu.quebec.ca/cdn-contenu/adm/min/securite-publique/publications-adm/rapport_inondations_printanieres_2019.pdf
- Shi, X., Wood, A. W., & Lettenmaier, D. P. (2008). How Essential is Hydrologic Model Calibration to Seasonal Streamflow Forecasting? *Journal of Hydrometeorology*, 9(6), 1350-1363. doi:10.1175/2008JHM1001.1
- Thiboult, A., Anctil, F., & Ramos, M. (2017). How does the quantification of uncertainties affect the quality and value of flood early warning systems? *Journal of Hydrology*, 551, 365-373. doi:10.1016/j.jhydrol.2017.05.014
- Troin, M., Arsenault, R., Wood, A. W., Brissette, F., & Martel, J.-L. (2021). Generating ensemble streamflow forecasts: A review of methods and approaches over the past 40 years. *Water Resources Research*, 57(7), 0043-1397. doi:10.1029/2020WR028392
- Verkade, J., Brown, J., Reggiani, P., & Weerts, A. (2013). Post-processing ECMWF precipitation and temperature ensemble. *Journal of Hydrology*, 501, 73-91. doi:10.1016/j.jhydrol.2013.07.039