



Projection climatique à des fins hydrologiques en région froide (ÉVAP-2)

Rapport final

Juillet 2025



Projection climatique à des fins hydrologiques, en région froide (ÉVAP-2).

Rapport final

Mai 2025

ÉQUIPE DE RÉALISATION :

François Anctil, Université Laval

Sylvain Jutras, Université Laval

Biljana Music, Ouranos

Daniel Nadeau, Université Laval

Julie Thériault, Université du Québec à Montréal

René Therrien, Université Laval

Titre du projet Ouranos: Projection climatique à des fins hydrologiques, en région froide (ÉVAP-2).

Numéro du projet Ouranos: 700700

Citation suggérée : Anctil F, Jutras S, Music B, Nadeau D, Thériault J et Therrien R. (2025). *Projection climatique à des fins hydrologiques, en région froide (ÉVAP-2)*. Rapport présenté à Ouranos. Québec. Université Laval. 38 p.

Remerciements

L'équipe remercie chaleureusement les membres du comité de suivi pour leur enthousiasme et leur apport scientifique au projet. Ce projet a été rendu possible grâce à l'aide d'Ouranos et d'Hydro-Québec. Il a aussi été financé par le Plan d'action 2013-2020 sur les changements climatiques du gouvernement du Québec. Puis, nous remercions le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) de son soutien.



Résumé

Les secteurs en amont des bassins versants forestiers fournissent en eau la moitié de la population de l'Amérique du Nord. Nos observations à la forêt Montmorency confirment cet énoncé puisqu'elles démontrent que plus de 60 % de la précipitation qui y tombe quitte le bassin par son réseau hydrographique, deux fois plus que la moyenne mondiale. Le secteur est aussi favorable à la production hydroélectrique, ce qui contribue également au développement économique et sociétal. Or le changement climatique apporte beaucoup d'incertitudes sur le devenir de la ressource en eau. Ce projet cherche spécifiquement à améliorer notre capacité de modélisation hydrologique et climatique, notamment pour les régions froides caractéristiques du Québec.

Le projet est structuré autour des deux objectifs spécifiques suivants :

- Analyser la variabilité interannuelle de la neige et des flux verticaux d'eau et d'énergie à travers le continuum atmosphère-végétation-sol-aquifère en forêt boréale humide avec neige abondante.
- Évaluer la pertinence hydrologique du Modèle Régional Canadien du Climat (MRCC), en région froide, configuré pour réaliser des simulations à une résolution de l'ordre de 3 km afin de prendre en compte les phénomènes convectifs de manière explicite.

L'approche choisie repose largement sur des observations hydrométéorologiques détaillées à la forêt Montmorency, avec une emphase particulière portée à l'évaporation, à la phase de la précipitation et à la couverture de neige. Les outils suivants sont également mis en œuvre :

- L'opération de trois tours à flux et d'instruments dédiés au suivi de la couverture de neige.
- Des simulations du MRCC, versions 5 et 6, sous différentes configurations décrivant le cycle de l'eau atmosphérique ou la texture des sols, couplées avec le modèle de surface Canadian Land Surface Scheme (CLASS).
- Des simulations non couplées du modèle CLASS.
- Des simulations des modèles HydroGeoSphere (recharge du sol) et SNOWPACK (neige au sol).

L'observation et la modélisation des flux verticaux d'eau et d'énergie à travers le continuum atmosphère-végétation-sol-aquifère en forêt boréale humide avec neige, de par leurs natures interdisciplinaires, a offert un environnement de recherche favorable à la formation de jeunes scientifiques et ingénieur.e.s spécialisé.e.s dans plusieurs domaines importants pour la société : l'hydrologie, l'hydrométéorologie, les sciences de l'atmosphère, la foresterie et la climatologie. Ce travail collaboratif, autour d'un site d'observations à l'avant-garde et de modèles physiques de pointe complémentaires, a favorisé l'émergence de retombées scientifiques nombreuses et diversifiées :

- Des observations hydrométéorologiques uniques au Québec, s'étendant sur près de 10 ans ininterrompues pour deux des trois tours actives;
- Des connaissances approfondies sur la structure du couvert de neige, le rôle de l'interception de la précipitation solide et l'incidence hydrologique des épisodes de pluie sur neige;
- Un modèle probabiliste de la phase de la précipitation;
- Une meilleure compréhension de la recharge des aquifères en milieu boréal froid;
- Un diagnostic de la sensibilité MRCC5/CLASS à la texture du sol;
- Une démonstration que des simulations MRCC6 à haute résolution avec convection profonde explicite apportent une valeur ajoutée en saison froide et une meilleure description du cycle de l'eau à l'échelle du bassin versant.

L'équipe recommande, comme suite à ce projet, de favoriser le déploiement et le maintien de sites hydrométéorologiques expérimentaux d'envergure ainsi que la recherche interdisciplinaire sur la modélisation de pointe des flux d'eau et d'énergie tout au long du continuum atmosphère-végétation-sol-aquifère, et ce pour l'ensemble des régions bioclimatiques du Québec.

Table des matières

Remerciements	2
Résumé	3
Table des matières	5
1. Introduction	7
2. Contexte et objectifs	7
3. Méthodologie	8
3.1. Équipe micrométéorologie	8
3.1.1. Équipements	9
3.1.2. Traitement de données	10
3.2. Équipe hydrométéorologie hivernale	10
3.2.1. Structure du couvert de neige	10
3.2.2. Effet d'un hiver chaud et peu neigeux sur le couvert de neige	10
3.2.3. Rôle de l'interception et des épisodes de pluie	11
3.2.4. Modèle probabiliste de la phase de la précipitation	11
3.3. Équipe GMON-carto	11
3.3.1. Cartographie de la hauteur de la neige	11
3.3.2. Mesure de la teneur en eau du sol par GMON	12
3.4. Équipe aquifère	13
3.4.1. Modélisation physique de la recharge du bassin 7a	13
3.4.2. Comparaison de plusieurs méthodes de modélisation	13
3.5. Équipe MRCC haute résolution	13
3.6. Équipe hydrologie MRCC	16
3.6.1. Sensibilité du modèle CLASS à la texture du sol	16
3.6.2. Sensibilité du modèle MRCC à la texture du sol	17
4. Résultats et discussion	19
4.1. Équipe micrométéorologie	19
4.2. Équipe hydrométéorologie hivernale	21
4.2.1. Structure du couvert de neige	21
4.2.2. Effet d'un hiver chaud et peu neigeux	21
4.2.3. Rôle de l'interception et des épisodes de pluie	22
4.2.4. Modèle probabiliste de la phase de la précipitation	23
4.3. Équipe GMON-carto	24
4.3.1. Cartographie de la hauteur de la neige	24
4.3.2. Mesure de la teneur en eau du sol par GMON	25
4.4. Équipe aquifère	25
4.4.1. Modélisation physique de la recharge du bassin 7a	25
4.4.2. Comparaison de plusieurs méthodes de modélisation	26
4.5. Équipe MRCC haute résolution	27
4.5.1. Évaluation de la phase des précipitations	27
4.5.2. Évaluation du cycle de l'eau	29

4.6.	Équipe hydrologie MRCC.....	31
4.6.1.	Sensibilité du modèle CLASS à la texture du sol.....	31
4.6.2.	Sensibilité du modèle MRCC à la texture du sol.....	32
5.	Conclusion	33
5.1.	Équipe micrométéorologie	33
5.2.	Équipe hydrométéorologie hivernale	34
5.3.	Équipe GMON-carto.....	34
5.4.	Équipe aquifère.....	34
5.5.	Équipe MRCC haute résolution.....	34
5.6.	Équipe hydrologie MRCC.....	35
	Références.....	35
	Liste des figures.....	37
	Liste des tableaux.....	38
	Liste des abréviations, sigles et acronymes	39

1. Introduction

Le projet ÉVAP-2 s'intitule Projection climatique à des fins hydrologiques en région froide. Il s'intéresse au milieu boréal humide de l'est du Canada et s'appuie largement sur les deux tours à flux implantées à la forêt Montmorency en 2015 ainsi que sur la modélisation climatique. Il s'inscrit dans la foulée du projet ÉVAP : Modélisation hydrologique avec bilan énergétique, 2015-01 à 2019-08, CRSNG-RDCPJ-477125-14.

Le projet ÉVAP était articulé autour de deux actions principales : déployer des équipements pour la mesure des bilans d'eau et d'énergie d'un bassin versant en milieu boréal humide et explorer des techniques de modélisation hydrologique qui traitent ces deux bilans. Deux tours à flux ont ainsi été implantées à la Forêt Montmorency (FM) en 2015 (Isabelle et al. 2020). Ce site, très humide et neigeux, qui se situe quelque 80 km au nord de Québec, est également l'objet d'un suivi détaillé de la précipitation solide et de l'évolution de la couverture de neige. Deux approches de modélisation ont alors été opérées et validées à l'aide d'observations micrométéorologiques du Bassin expérimental du ruisseau des Eaux-Volées (BEREV) et d'ailleurs au Canada et dans le monde : des modèles (hydrométéorologiques) de surface et d'autres reposant sur le principe de la production maximale d'entropie (MEP). Plus spécifiquement, nous avons évalué les modèles de surface canadiens Canadian land surface scheme (CLASS; Verseghy et al. 1993) et Soil, Vegetation, and Snow (SVS; Hussain et al. 2016) et montré leur bon fonctionnement général, bien qu'ils soient perfectibles notamment en présence de neige. Nous avons également proposé, avec succès, une méthodologie pour combiner de manière juste et continue les trois modèles MEP existants, chacun spécialisé pour une surface spécifique : sol nu, végétation et neige.

De telles recherches sont nécessaires. Les secteurs en amont des bassins versants forestiers fournissent en eau la moitié de la population de l'Amérique du Nord et des milliards de personnes de par le monde. Nos observations à la FM confirment cet énoncé puisqu'elles démontrent que plus de 60 % de la précipitation qui y tombe quitte le bassin par son réseau hydrographique, deux fois plus que la moyenne mondiale. Cela explique pourquoi tant de régions du Canada bénéficient d'un accès à d'énormes volumes d'eau. Pour Hydro-Québec, cette abondance favorise une production hydroélectrique qui, à son tour, soutient le développement économique local. Ce projet, ÉVAP-2, cherche à améliorer la modélisation hydrologique et climatique, ce qui se traduit de facto par une plus grande production électrique et une meilleure sécurité des populations riveraines. L'eau est si importante pour les humains que les emplois de 78 % de la population active mondiale (2,5 milliards d'individus) en dépendent directement.

2. Contexte et objectifs

L'objectif général du projet est de développer un cadre opérationnel pour la projection climatique à des fins hydrologiques, en région froide. Pour ce faire, le projet est structuré autour des deux objectifs spécifiques suivants :

1. Analyser la variabilité interannuelle de la neige et des flux verticaux d'eau et d'énergie à travers le continuum atmosphère-végétation-sol-aquifère en forêt boréale humide avec neige abondante.
2. Évaluer la pertinence hydrologique du Modèle Régional Canadien du Climat (MRCC), en région froide, configuré pour réaliser des simulations à une résolution de l'ordre de 3 km afin de prendre en compte les phénomènes convectifs de manière explicite.

Pour faciliter le bon fonctionnement du projet, les ressources ont été structurées en six équipes complémentaires :

1. Équipe micrométéorologie.
2. Équipe hydrométéorologie hivernale.
3. Équipe GMON-carto.

4. Équipe aquifère.
5. Équipe MRCC haute résolution.
6. Équipe hydrologie MRCC.

La présentation de la méthodologie et des résultats fera écho à cette structure.

3. Méthodologie

La méthodologie présentée ici succinctement découle des réalisations étudiantes au sein de chaque équipe.

3.1. ÉQUIPE MICROMÉTÉOROLOGIE

Depuis l'automne 2015, le bassin versant du ruisseau des Eaux-volées (BEREV) est l'hôte de nos installations micrométéorologiques mesurant tous les termes du bilan d'énergie de la surface forestière. Les tours à flux Juvénile et Gaule (figure 1) sont équipées de dispositifs nécessaires à l'utilisation de la méthode de covariances des tourbillons, qui mesure indirectement les flux de chaleurs sensibles et latentes (évaporation). Les sites sont également instrumentés pour mesurer les rayonnements incidents et ascendants d'ondes courtes et longues, le flux de chaleur dans le sol, et les variations de stockage d'énergie dans l'air et le sol, de même qu'une foule de variables météorologiques de base. Cette accumulation de données rendue possible grâce au projet ÉVAP s'est poursuivie dans le projet ÉVAP-2, en conservant les standards de qualité des appareils, mesures et traitement des données, mais avec des améliorations notoires. Le projet ÉVAP-2 a également permis l'ajout d'un troisième site de mesure, la tour à flux Régénération, depuis l'automne 2023. La combinaison de ces trois sites permet une mesure du bilan d'énergie sur trois stades de croissance d'un peuplement de sapinière à bouleau jaune : des arbres juvéniles près de la maturité, des gaules en pleine croissance et un couvert en régénération après une perturbation (coupe totale).

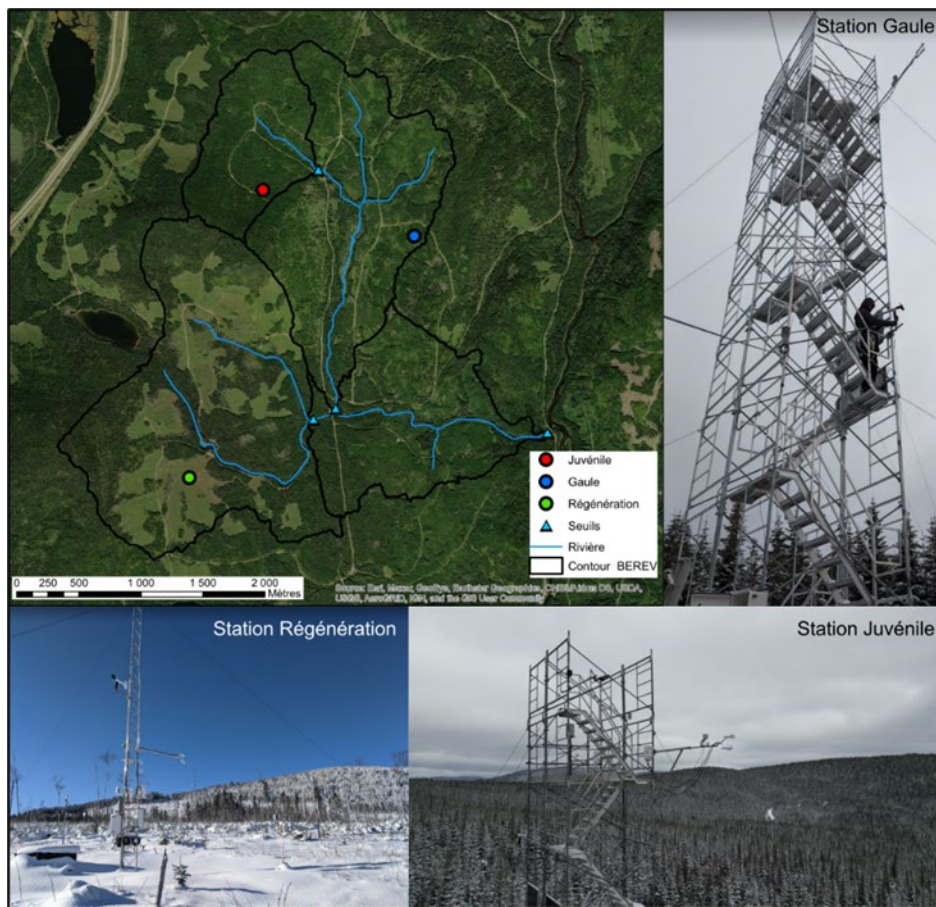


Figure 1. Carte du BEREV et localisation des trois tours à flux

3.1.1. Équipements

Chaque site est équipé pour la mesure complète du bilan d'énergie de surface. Les équipements critiques d'un tel montage sont ceux permettant d'appliquer la méthode de la covariance des tourbillons, vue leur sophistication. Pour les trois sites, l'appareil était un IRGASON (Campbell Scientific, USA), qui combine un anémomètre sonique et un analyseur de gaz à trajet ouvert. Au site Juvénile, deux systèmes sont installés dans des directions opposés pour obtenir une mesure dénuée d'interférences par la structure de la tour. Au site Régénération, un système de covariance des tourbillons à trajet fermé (Closed-Path Eddy-Covariance, CPEC, Campbell Scientific, USA) permet une mesure des flux de meilleure qualité durant les épisodes de précipitations. Ces appareils nécessitent des calibrations fréquentes qui ont été facilitées par une rotation d'appareils entre les calibrations, que nous avons maintenant en surplus.

La méthode de la covariance des tourbillons nécessite que les IRGASONS soient installés à une hauteur étant 1,5-2 fois plus élevée que la végétation moyenne. La station Juvénile a été rehaussée de 15 m à 18 m à l'automne 2020, alors que la station Gaule a été remplacée par un échafaudage à l'automne 2022, faisant monter les appareils de 8 m à 13 m de hauteur. Les systèmes électriques (panneaux solaires, batteries, contrôleur solaire) des deux stations ont également été remplacés à ces occasions.

Toutes les tours sont aussi équipées de radiomètres (CNR4, Kipp and Zonen, Pays-Bas) pour la mesure des rayonnements, et d'appareils de mesures du flux de chaleur dans le sol (HFP01SC, Hukseflux, USA), et de profils de mesures de température et d'humidité (HC2S3, Campbell Scientific, USA) qui ont tous été remplacés en cours de projet.

En plus des trois tours à flux présentées précédemment, un système IRGASON a aussi été installé au site Neige de la forêt Montmorency pour la mesure spécifique de la sublimation de la neige et du bilan d'énergie d'un couvert de neige simple.

Durant tout le projet, les 4 stations ont été entretenus de façon régulière et soutenu par le professionnel de recherche financé par ÉVAP-2. Les visites au minimum mensuelles permettaient la détection de bris, l'entretien et le téléchargement des données.

3.1.2. Traitement de données

Depuis le début de la collecte de données hydrométéorologiques à la forêt Montmorency, la chaîne de traitement de données est bâtie pour obtenir les flux et variables de la meilleure qualité possible.

Les données mesurées par les IRGASON, à une fréquence de 10-Hz, sont converties en flux de chaleur sensible et latente et en flux de carbone au pas de temps demi-horaire grâce au programme Eddypro (Li-Cor Biosciences, USA), un standard du domaine. Le programme effectue une foule de corrections standardisées et des tests de qualité rigoureux. Par la suite, les flux et variables météorologiques sont assujettis à un contrôle qualité avec des procédures automatisées et des inspections manuelles. Les manques dans les données sont comblés selon les règles de l'art, par des procédures automatisées capitalisant sur la prise de mesures synchronisées sur plusieurs sites.

Cette chaîne de traitement est en constante évolution depuis les débuts du projet ÉVAP-1. Au cours du projet ÉVAP-2, les améliorations comprennent : un remplissage des données utilisant les réanalyses ERA5 lorsque nécessaire, un meilleur contrôle qualité du rayonnement hivernal, le passage des codes du logiciel à licences MATLAB vers le langage Python, permettant un roulement plus automatisé, et un raffinement du contrôle qualité lors des épisodes de pluies et neiges.

3.2. ÉQUIPE HYDROMÉTÉOROLOGIE HIVERNALE

3.2.1. Structure du couvert de neige

Dans la forêt boréale, il est important de bien comprendre la structure du couvert de neige en raison de son rôle dans une multitude de processus hydrologiques, climatiques et météorologiques. Il est bien connu que la structure de la neige sous les arbres diffère de celle dans les ouvertures forestières, mais peu d'études ont cherché à caractériser ces différences au-delà des hauteurs et de l'équivalent en eau de la neige. L'objectif de la présente étude est donc de documenter la variabilité dans les propriétés du couvert de neige sous les arbres et dans des trouées forestières adjacentes, en s'intéressant à des variables peu étudiées à ce jour : stratigraphie, masse volumique, profil de température, surface spécifique, perméabilité et conductivité hydraulique. Une réflexion est ensuite proposée sur l'impact de ces différences sur la dynamique de fonte du couvert de neige.

L'étude a été menée durant l'hiver 2018-2019 à la Forêt Montmorency (47.29°N, 71.17°O), où des puits de neige hebdomadaires ont été effectués sous la canopée et dans des ouvertures forestières adjacentes. Les données récoltées ont permis de calculer les gradients verticaux de température et d'en estimer la perméabilité et la conductivité hydraulique à partir de relations empiriques. Les deux environnements à l'étude ont ensuite été analysés en contrastant les profils verticaux et l'évolution saisonnière des propriétés physiques de la neige.

3.2.2. Effet d'un hiver chaud et peu neigeux sur le couvert de neige

Avec le réchauffement climatique, les hivers plus chauds et moins neigeux sont appelés à devenir plus fréquents dans la forêt boréale de l'Est du Canada. Toutefois, les conséquences sur les processus hydrologiques demeurent mal comprises, notamment en raison de la complexité de la structure forestière et des différences marquées entre les zones sous les arbres et dans les ouvertures forestières. L'objectif de cette étude est de quantifier l'effet d'un hiver chaud et peu neigeux sur les propriétés physiques du couvert de neige, le régime thermique du sol, la fonte de neige et les débits observés à l'exutoire du bassin versant, en comparant deux hivers contrastés dans une forêt boréale humide.

L'étude s'est déroulée de nouveau dans la Forêt Montmorency, où trois stations de mesure ont été installées dans des environnements forestiers contrastés : sous la canopée, dans une petite ouverture forestière et dans une ouverture forestière de moyenne taille. Des observations détaillées du couvert de neige (température, densité, SSA, conductivité thermique), du sol (température, humidité), et du rayonnement incident ont été réalisées durant deux hivers (2020–2021 et 2021–2022), le premier étant considéré chaud et peu neigeux et le deuxième plutôt normal. Les données ont été complétées par des profils verticaux des propriétés du couvert de neige et des simulations du modèle de neige à base physique SNOWPACK pour évaluer l'évolution du couvert de neige et sa fonte au printemps.

3.2.3. Rôle de l'interception et des épisodes de pluie

Dans la forêt boréale, une part importante de la neige est interceptée par la canopée, puis relâchée sous forme d'eau liquide lors de redoux ou d'épisodes de pluie sur neige. Un tel apport d'eau liquide en cours d'hiver sur un couvert de neige froid et sec entraîne la formation de couches de regel à faible conductivité hydraulique, limitant par la suite la percolation de l'eau de fonte. Ce phénomène est encore peu étudié et difficile à représenter dans les modèles de neige. L'objectif de cette étude est de mieux comprendre le rôle de l'interception et des épisodes de pluie sur neige sur la microstructure de la neige sous les arbres dans la forêt boréale humide et de cibler les conséquences associées sur les processus hydrologiques en cours lors de la fonte.

L'étude a été réalisée à partir d'observations récoltées sur le terrain entre 2020 et 2023 dans deux sites de la forêt boréale humide du Québec : la Forêt Montmorency (de nouveau) et la vallée de la rivière Bernard (50.9021°N, 63.4053°O), avec un important accent accordé aux épisodes de pluie sur neige. Des puits de neige ont été effectués régulièrement pour mesurer les propriétés physiques du couvert de neige sous les arbres. Un nouveau module de neige interceptée a été intégré au modèle SNOWPACK pour simuler l'accumulation, la fonte et la décharge de la neige interceptée par la canopée en permettant pour la première fois l'évolution des propriétés de la neige interceptée dans le temps.

3.2.4. Modèle probabiliste de la phase de la précipitation

Déterminer la phase des précipitations (liquide, solide ou mixte) est une étape cruciale en modélisation hydrologique, en particulier en contexte de réchauffement climatique où les événements de pluie sur neige se multiplient. Les approches existantes, souvent basées uniquement sur la température de l'air, échouent à bien représenter les précipitations mixtes, ce qui entraîne des erreurs significatives dans l'estimation de la neige au sol. L'objectif principal de cette étude est donc de développer et d'évaluer un modèle probabiliste de fractionnement de la phase des précipitations. Cette approche tire profit d'observations directes de la phase de la précipitation récoltées par un réseau de disdromètres radar déployé dans le sud du milieu boréal québécois.

L'étude repose sur l'analyse de données horaires provenant de 27 stations instrumentées avec des disdromètres radar, lors des hivers 2020 à 2023. Trois modèles de fractionnement probabiliste de la phase sont construits à l'aide d'algorithmes de forêts aléatoires, avec un nombre croissant de variables d'entrée. La performance des modèles est évaluée selon leur aptitude à bien catégoriser la phase de la précipitation et à anticiper la fraction solide vs liquide en présence de précipitations mixtes. Les modèles probabilistes sont ensuite comparés à trois approches classiques : un modèle à seuil de température simple, un modèle à double seuil de température et un modèle basé sur l'équilibre psychrométrique. Une importance particulière est accordée à l'évaluation des performances en conditions de précipitation mixte.

3.3. ÉQUIPE GMON-CARTO

3.3.1. Cartographie de la hauteur de la neige

La gestion de l'eau au Québec, province riche en ressources hydriques, repose sur une compréhension fine du cycle de l'eau, notamment en période hivernale où la neige joue un rôle crucial. La fonte du manteau neigeux influence directement les débits des rivières et les risques d'inondation. Or, bien que les mesures de neige soient relativement fiables en milieux ouverts, elles sont beaucoup moins représentatives en milieux forestiers

boréaux, qui couvrent une grande partie du territoire québécois. Ce projet de recherche vise donc à améliorer la cartographie de la neige dans ces milieux, en s'appuyant sur les données historiques de la forêt Montmorency et sur des outils géomatiques avancés, notamment les produits dérivés du LiDAR.

La forêt Montmorency, forêt d'enseignement et de recherche de l'Université Laval, constitue un site d'étude idéal en raison de son historique riche en données hydrométéorologiques et de sa situation géographique dans une zone de fortes précipitations. Le projet s'inscrit dans la continuité des projets EVAP-1 et EVAP-2, qui ont respectivement permis de développer une instrumentation de pointe pour mesurer les flux hydriques et énergétiques, puis de modéliser ces flux à l'échelle du paysage forestier.

Le projet repose sur l'hypothèse que l'accumulation et la fonte de la neige varient spatialement en fonction de facteurs externes tels que la structure forestière, l'exposition au vent et au soleil, la topographie et la densité du couvert végétal. Ces facteurs influencent notamment l'interception, la sublimation et la redistribution de la neige. Par exemple, les forêts denses interceptent davantage les précipitations, réduisant ainsi l'accumulation au sol, tandis que les trouées forestières favorisent une plus grande accumulation, mais sont aussi plus exposées au transport éolien de la neige.

Trois objectifs structurent la méthodologie du projet : (1) harmoniser et structurer les données de neige existantes dans une base de données relationnelle, (2) cartographier les facteurs influençant l'accumulation de la neige à l'aide de données LiDAR et d'indices de la structure forestière comme le TOPEX, et (3) développer une méthode d'interpolation spatiale pour extrapoler les mesures ponctuelles de hauteur, de densité et d'équivalent en eau de la neige à l'ensemble du territoire. L'approche géostatistique permettra de corriger les biais des mesures existantes et de produire une cartographie continue de l'équivalent en eau de la neige (ÉEN), accompagnée d'une estimation des incertitudes.

3.3.2. Mesure de la teneur en eau du sol par GMON

Le mémoire de Mathieu Gélinas, intitulé « Le CS725 pour la mesure de la teneur en eau des sols : Étude de cas en forêt boréale », s'inscrit dans le contexte plus large de la gestion durable des ressources hydriques. Cette gestion repose sur une compréhension approfondie du cycle de l'eau, incluant la mesure de la teneur en eau des sols, un paramètre clé mais difficile à quantifier en raison de sa variabilité spatiale et temporelle. Les outils de mesure actuels présentent des limitations importantes : certains ne couvrent que de très petites surfaces (moins de 1 m²), tandis que d'autres, comme les satellites, opèrent à des échelles très larges (plus de 100 km²), laissant un vide à l'échelle intermédiaire. Pour combler ce manque, le capteur CS725, développé par Campbell Scientific et initialement conçu pour mesurer l'équivalent en eau de la neige (SWE), a été adapté pour estimer la teneur en eau du sol (SM) sur une surface d'environ 100 m². Ce capteur fonctionne en mesurant le rayonnement gamma naturellement émis par le sol minéral, lequel est atténué par la présence d'eau. Cette propriété permet d'estimer indirectement la quantité d'eau présente dans les premières couches du sol.

Cependant, en forêt boréale, la présence d'une épaisse couche d'humus, riche en matière organique et en eau, pose un défi supplémentaire. Cette couche atténue le rayonnement gamma sans en émettre, ce qui peut biaiser les mesures du CS725 si elle n'est pas prise en compte. Le mémoire explore donc la capacité du CS725 à estimer la teneur en eau du sol minéral sous cette couche organique, en comparant deux approches : la méthode standard du fabricant et une méthode ajustée intégrant des variables décrivant l'humus (épaisseur, densité, composition, coefficient d'atténuation).

L'étude repose sur une méthodologie rigoureuse combinant mesures in situ à l'aide de sondes TDR (Time Domain Reflectometry), mesures gravimétriques manuelles, et calculs basés sur les lois d'atténuation du rayonnement gamma. Six sites en forêt boréale ont été instrumentés, avec des épaisseurs d'humus variant de 5 à plus de 60 cm. Les performances des deux méthodes ont été évaluées à l'aide de l'indice de performance Kling-Gupta (KGE), qui combine la corrélation, le biais et la variance.

3.4. ÉQUIPE AQUIFÈRE

3.4.1. Modélisation physique de la recharge du bassin 7a

La recharge des eaux souterraines est un élément fondamental du cycle hydrologique, influençant directement la disponibilité de la ressource en eau pour les écosystèmes et les activités humaines. Elle est particulièrement difficile à estimer dans les régions boréales humides, où l'abondance apparente en eau réduit l'urgence perçue de telles études, malgré les impacts potentiels du changement climatique. L'absence de méthodes de mesure directe de la recharge impose l'usage de techniques indirectes, notamment les bilans hydriques, les séparations hydrographiques, les traceurs chimiques et les méthodes physiques comme les lysimètres ou les fluctuations de la nappe phréatique. Face à ces limitations, les modèles hydrologiques intégrés représentent aujourd'hui la meilleure approche pour estimer la recharge. Ce travail s'inscrit dans cette perspective en mobilisant le modèle HydroGeoSphere (HGS; Hwang et al., 2014). pour simuler 55 années de conditions hydrologiques passées dans un bassin boréal du Québec. Le but est de produire des estimations spatio-temporelles de la recharge en eau souterraine à haute résolution temporelle et spatiale.

Le bassin versant étudié, nommé 7a, est situé à 70 km au nord de Québec, dans la Forêt Montmorency. Il couvre une superficie de 1,04 km² et fait partie du bassin expérimental BEREV, utilisé pour la recherche hydrologique depuis les années 1970. Le site présente des dépôts glaciaires, une topographie montagneuse et une végétation dominée par le sapin baumier et le bouleau blanc. La région est marquée par un climat subarctique, caractérisé par des précipitations annuelles élevées (1480 mm) et une température moyenne annuelle de 0,5 °C.

L'objectif principal est d'exploiter le modèle HGS pour simuler le bilan hydrique du bassin de 1965 à 2020 à une échelle journalière, estimer la recharge en eaux souterraines en soustrayant l'évapotranspiration simulée de l'infiltration, évaluer les contributions saisonnières (ex. fonte des neiges, événements pluie-sur-neige) et analyser la variabilité spatiale et temporelle de la recharge à long terme.

Les observations incluent : température de l'air et précipitation quotidienne depuis 1965, débit à la sortie du bassin depuis 1966 et niveaux piézométriques dans trois puits d'observation installés en 2017. Le modèle simule les écoulements de surface et souterrains de manière couplée, à l'aide d'un maillage 3D. Il inclut des modules pour l'évapotranspiration, la neige (méthode degré-jour), et la recharge calculée comme infiltration moins évapotranspiration. Une calibration manuelle et automatique (PEST++) a permis d'ajuster les paramètres du modèle, validé par l'indice KGE'.

3.4.2. Comparaison de plusieurs méthodes de modélisation

Ce volet vise à comparer des méthodes variées d'estimation de la recharge avec les résultats du modèle physique HydroGeoSphere (HGS), incluant : un bilan hydrique simple, le modèle GWHAT (Gosselin 2016), l'analyse de l'hydrogramme (baseflow et récession), la méthode WTF (Water Table Fluctuation), et l'évaluation de l'impact des données d'évapotranspiration (AET et PET) issues de différentes sources (Bowen, ERA5, Hargreaves-Samani, etc.).

L'étude s'appuie sur le bassin 7a, de 1,04 km², situé dans la Forêt Montmorency. Les données disponibles couvrent 1965–2020 pour les précipitations et les débits, 2017–2020 pour les niveaux d'eau souterraine, et 2015–2020 pour l'évapotranspiration par tour à flux. Plusieurs approches ont été testées : (1) HGS simule la recharge comme infiltration nette après ET ; (2) le modèle GWHAT calcule la recharge via un bilan d'humidité du sol et un budget aquifère ; (3) des méthodes d'analyse de l'hydrogramme (baseflow, récession) estiment la recharge à partir du débit ; (4) la méthode WTF repose sur les variations du niveau piézométrique. Chaque méthode est appliquée avec plusieurs scénarios d'ET pour tester leur sensibilité.

3.5. ÉQUIPE MRCC HAUTE RÉOLUTION

Pour étudier la phase de précipitation, le MRCC6-GEM5 a été intégré dans deux domaines, chacun utilisant des résolutions spatiales distinctes. Un maillage grossier de 0,11° (~12 km) a été appliqué au domaine nord-

station UQAM-PK est représentée par le cercle jaune. Les stations de sondage situées à l'intérieur de la zone d'étude sont représentées par des triangles. La vallée du Saint-Laurent (VSL), la Côte-Nord et la Gaspésie sont identifiées (adapté de Chalifour et al. 2025). Les bassins versants utilisés pour l'étude du bilan de l'eau.

Les simulations ont été confrontées aux données de phase des précipitations du réseau d'observation d'Hydro-Québec. Ces données sont décrites et utilisées dans l'étude de Bédard-Therrien et al. (2025). On retrouve davantage d'informations sur les données et le contrôle de qualité dans Chalifour (2023).

Dans les deux simulations, les processus de nuages et de précipitations sont représentés à l'aide du schéma microphysique Predicted Particle Properties (P3, Morrison and Milbrandt, 2015). Comme expliqué précédemment, le schéma P3 fournit une représentation détaillée des processus microphysiques dans les nuages, y compris les nuages de pronostic et les précipitations. Ce schéma fonctionne comme un modèle bulk à deux moments. Le schéma prédit la masse et la concentration des nuages liquides, de la pluie et de la glace. Toutes les précipitations solides sont représentées par une catégorie de glace (Morrison and Milbrandt, 2015). En plus de la masse et de la concentration, P3 prédit deux variables additionnelles, soient la masse et le volume de givrage. Le schéma de fraction nuageuse, qui repose sur un seuil d'humidité relative dépendant de la hauteur (Jouan et al., 2020), quantifie la contribution de la condensation à l'échelle de la maille au contenu en eau des nuages à l'échelle de la grille, même lorsque l'humidité relative à l'échelle de la grille est inférieure à 100 %.

Pour évaluer la sensibilité de différentes composantes du cycle de l'eau atmosphérique à la représentation de la convection, à la microphysique des nuages, ainsi qu'aux schémas de surface terrestre, six configurations du modèle MRCC6-GEM5 ont été mises en œuvre (tableau 1). Les simulations correspondantes ont été réalisées sur une période couvrant deux années hydrologiques complètes, d'octobre 2018 à octobre 2020.

Tableau 1. Les six jeux de configurations du MRCC6-GEM5 employés pour étudier le cycle de l'eau atmosphérique.

Résolution horizontale et verticale	Schémas de convection	Schémas de précipitation et de nuages	Schémas de surface terrestre
12 km, 71 niveaux verticaux (sommet: 10 hPa)	Profonde (Kain & Fritsch, 1990)	Sundqvist (Sundqvist et al., 1989)	CLASS (Verseghy et al., 1993)
			ISBA (Bélair et al., 2003)
	Peu profonde (Bechtold et al., 2001)	P3 (Morrison & Milbrandt, 2015)	CLASS
			ISBA
2.5 km, 64 niveaux verticaux (sommet: 23 hPa)	Profonde: résolu explicitement	P3 (Morrison & Milbrandt, 2015)	CLASS
	Peu-profonde: Kuo-transient (Bélair et al., 2005)		ISBA

Les simulations ont été effectuées sur le domaine couvrant l'Est du Canada, incluant les Grands Lacs (encadré en bleu sur la figure 1). Ce domaine, d'environ 2800 km × 2650 km, comprend une grille de 230 × 220 mailles à une résolution de 12 km, et une grille de 1132 × 1060 mailles à une résolution de 2,5 km. Toutes les

simulations ont été pilotées par la réanalyse ERA5. Les simulations couvrent deux années hydrologiques complètes, d'octobre 2018 à octobre 2020.

Le forçage latéral est appliqué toutes les heures pour la température, le géopotential, l'humidité spécifique et les vents horizontaux à tous les niveaux verticaux du modèle. Le pilotage spectral est également appliqué aux champs de température et de vent horizontal, afin de maintenir la cohérence avec la circulation synoptique issue d'ERA5.

Les conditions initiales du sol proviennent des données ERA5-Land (Muñoz-Sabater et al., 2021). Les valeurs d'humidité et de température du sol ont été extraites des quatre couches de ERA5-Land, puis interpolées pour correspondre aux couches des deux schémas de surface utilisés dans les simulations : CLASS (Verseghy, 2000) et ISBA (Bélaïr et al. 2003). Le schéma CLASS comporte 16 couches s'étendant jusqu'à 10 m de profondeur. Pour initialiser les couches profondes (7 à 16), une interpolation linéaire a été effectuée entre la température de la quatrième couche ERA5 (à 2 m) et sa moyenne climatologique (1990–2019) à 10 m. Le schéma ISBA est plus simple, avec deux couches pour la température et l'humidité du sol, et une pour la glace, initialisées à partir des couches supérieures d'ERA5-Land selon une méthode similaire.

Quatre simulations ont été réalisées à une résolution de 12 km, dans laquelle la convection profonde est paramétrée (Tableau 1). Deux d'entre elles utilisent le schéma de condensation de Sundqvist et les deux autres, le schéma de microphysique P3. Concernant la représentation des processus de surface, deux simulations reposent sur le schéma CLASS et deux sur le schéma ISBA. Deux autres simulations ont été effectuées à une résolution de 2,5 km, permettant une représentation explicite de la convection profonde. Elles intègrent également les schémas CLASS et ISBA pour la modélisation des processus de surface.

3.6. ÉQUIPE HYDROLOGIE MRCC

3.6.1. Sensibilité du modèle CLASS à la texture du sol

Le Québec, étant la province canadienne avec la plus grande superficie, fait en sorte que la qualité de la description de la texture du sol est problématique, car les observations pédologiques n'y sont pas assez nombreuses. Or, les modèles hydrométéorologiques nécessitent une représentation juste des caractéristiques du sol pour produire les meilleures simulations possibles. Plusieurs bases de données de la texture du sol existent, ce qui peut rendre la tâche plus complexe quand elles ne concordent pas. L'objectif de cette étude est d'examiner la sensibilité du modèle de surface CLASS à la texture du sol au Québec. Pour ce faire, il a été choisi de recourir aux douze sols types compilés par Carsel et Parrish (1988), en lien avec la classification texturale proposée par le SCS (Soil Conservation Service). D'une part, l'étude prend place au Québec, Canada, dans cinq sites exposés à des climats différents (tableau 2) et, par conséquent, recouverts par une végétation différente. Les sites à l'étude permettront ainsi d'analyser l'influence de la texture du sol sur les principales variables hydrométéorologiques. Pour ce faire, il a été décidé de travailler d'abord avec une texture du sol identique, du loam argileux-sableux, un sol au comportement médian afin que la comparaison ne soit pas influencée par la variabilité spatiale des sols. La deuxième étape consiste en une comparaison pour les douze types de sols (tableau 3), couvrant toute la gamme, afin de dégager la sensibilité du modèle CLASS.

Tableau 2. Moyenne annuelle des cinq sites à l'étude sur la période de 1990 à 2022

	Ondes courtes (W/m ²)	Ondes longues (W/m ²)	Température de l'air (°C)	Vitesse du vent (m/s)	Pression de surface (kPa)	Humidité spécifique (kg/kg)	Précipitation totale (mm/an)
Broadback	136	274	0,4	2,5	98,0	0,0042	976
Chaudière	148	291	5,3	2,4	99,9	0,0053	1315

Harricana	143	281	2,5	2,6	97,8	0,0047	981
Matapédia	142	279	2,7	2,4	97,8	0,0046	1159
Rimouski	149	279	3,1	2,9	98,1	0,0047	1093

Tableau 3. Valeur moyenne du sable et l'argile (Carsel et Parrish, 1988) avec leurs valeurs de porosité et de conductivité hydraulique.

Type de sol	Sable (%)	Argile (%)	Porosité	Conductivité hydraulique (mm/h)
Sable (S)	92,7	2,9	0,37	86,7
Sable loameux (S-LO)	80,9	6,4	0,39	57,3
Loam sableux (LO-S)	63,4	11,1	0,41	30,9
Loam argileux sableux (LO-A-S)	54,3	27,4	0,42	22,4
Loam (LO)	40,0	19,7	0,44	13,6
Loam limoneux (LO-LI)	16,6	18,5	0,47	6,0
Loam Argileux (LO-A)	29,8	32,6	0,45	9,5
Limon (LI)	5,8	9,5	0,48	4,1
Argile (A)	14,9	55,2	0,47	5,6
Argile sableuse (A-S)	47,5	41,0	0,43	17,7
Loam Argileux-limoneux (LO-A-LI)	7,6	33,2	0,48	4,3
Argile limoneuse (A-LI)	6,1	46,3	0,48	4,1

3.6.2. Sensibilité du modèle MRCC à la texture du sol

Une représentation précise des données sur les sols est essentielle pour des simulations climatiques régionales réalistes; cependant, les incertitudes associées aux données sur les sols restent sous-explorées, en particulier en ce qui concerne leur influence sur les échanges d'énergie à long terme et la dynamique du climat régional. Cette recherche étudie la sensibilité à long terme du Modèle régional canadien du climat version 5 (MRCC5), couplé au Schéma canadien de la surface terrestre (CLASS), aux différences de texture du sol en utilisant deux ensembles de données disponibles sur les sols, ECOCLIMAP (Masson et al., 2003) et SIIGSOL (Sylvain et al., 2021), sur une période de simulation de 40 ans (1982-2021) au Québec, Canada.

L'analyse a été menée sur le sud du Québec, qui couvre une superficie d'environ 400 000 km². Bien que les simulations aient porté sur l'ensemble de la province (figure 3), les régions situées au nord de 50°N ont été exclues de l'analyse. Dans ces régions, Sylvain et al. (2021) disposaient d'un nombre de plus en plus limité d'observations de sol lors de la construction de la base de données SIIGSOL et parfois même d'aucune observation. Dans d'autres cas, ECOCLIMAP a montré des valeurs irréalistes. En conséquence, le MRCC5 a

utilisé par défaut les données ECOCLIMAP, rendant les données pédologiques identiques entre les simulations et limitant leur utilité pour l'analyse comparative. La région sélectionnée englobe divers types de couverture terrestre, y compris des forêts, des champs agricoles et des zones urbaines.

Deux simulations MRCC5 ont été utilisées dans cette étude, qui ne diffèrent que par les bases de données de texture du sol employées. Une simulation a utilisé ECOCLIMAP (Masson et al. 2003), un ensemble de données opérationnelles standard, tandis que l'autre a utilisé SIIGSOL (Sylvain et al., 2021), une base de données des sols à haute résolution récemment développée et disponible uniquement pour la province de Québec. Les deux simulations du MRCC5 ont été pilotées par la réanalyse ERA5 sur la période 1971-2021, avec une résolution horizontale de $0,11^\circ$ (~12 km) sur une grille latitude-longitude rotative et un pas de temps de 5 minutes. La structure verticale se compose de 56 niveaux atmosphériques hybrides, s'étendant jusqu'à un sommet du modèle proche de 10 hPa. Les simulations ont été effectuées sur le domaine QC11d1 (figure 3), centré sur la province de Québec (340×340 points de grille), y compris une zone éponge de 20 points où les variables physiques sont progressivement relâchées vers les champs moteurs. Le nudging spectral (Riette et Caya, 2002) a été appliqué à la composante horizontale du vent avec une longueur d'onde de demi-réponse de 1177 km et un temps de relaxation de 13,34 h. La force du nudging a été fixée à zéro en dessous de 500 hPa et a augmenté linéairement jusqu'au sommet du modèle à 10 hPa. La température de surface de la mer et la couverture de glace de mer ont également été prescrites à partir d'ERA5.

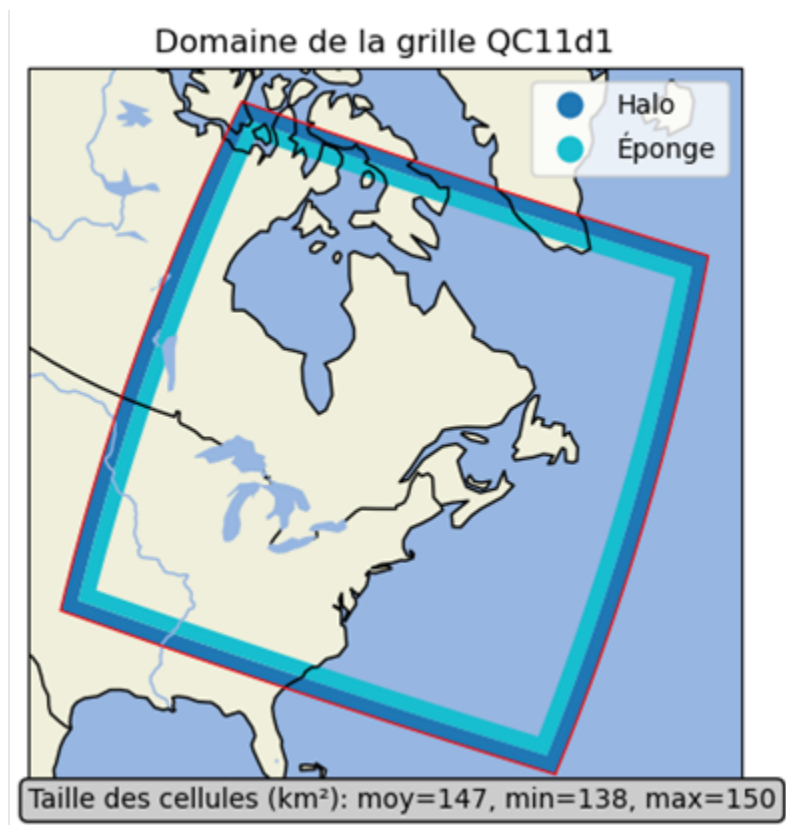


Figure 3. Domaine de simulation MRCC5.

4. Résultats et discussion

Les résultats présentés ici succinctement découlent des réalisations étudiantes au sein de chaque équipe.

4.1. ÉQUIPE MICROMÉTÉOROLOGIE

Le principal résultat obtenu par l'équipe micrométéorologie du projet ÉVAP-2 est la base de données accumulée, soit près de 10 ans d'observations hydrométéorologiques pour 2 à 4 sites de mesures, ce qui équivaut à environ 175000 pas de temps pour près de 200 variables mesurées et 200 variables dérivées, et/ou comblées. Un exemple est illustré à la figure 4.

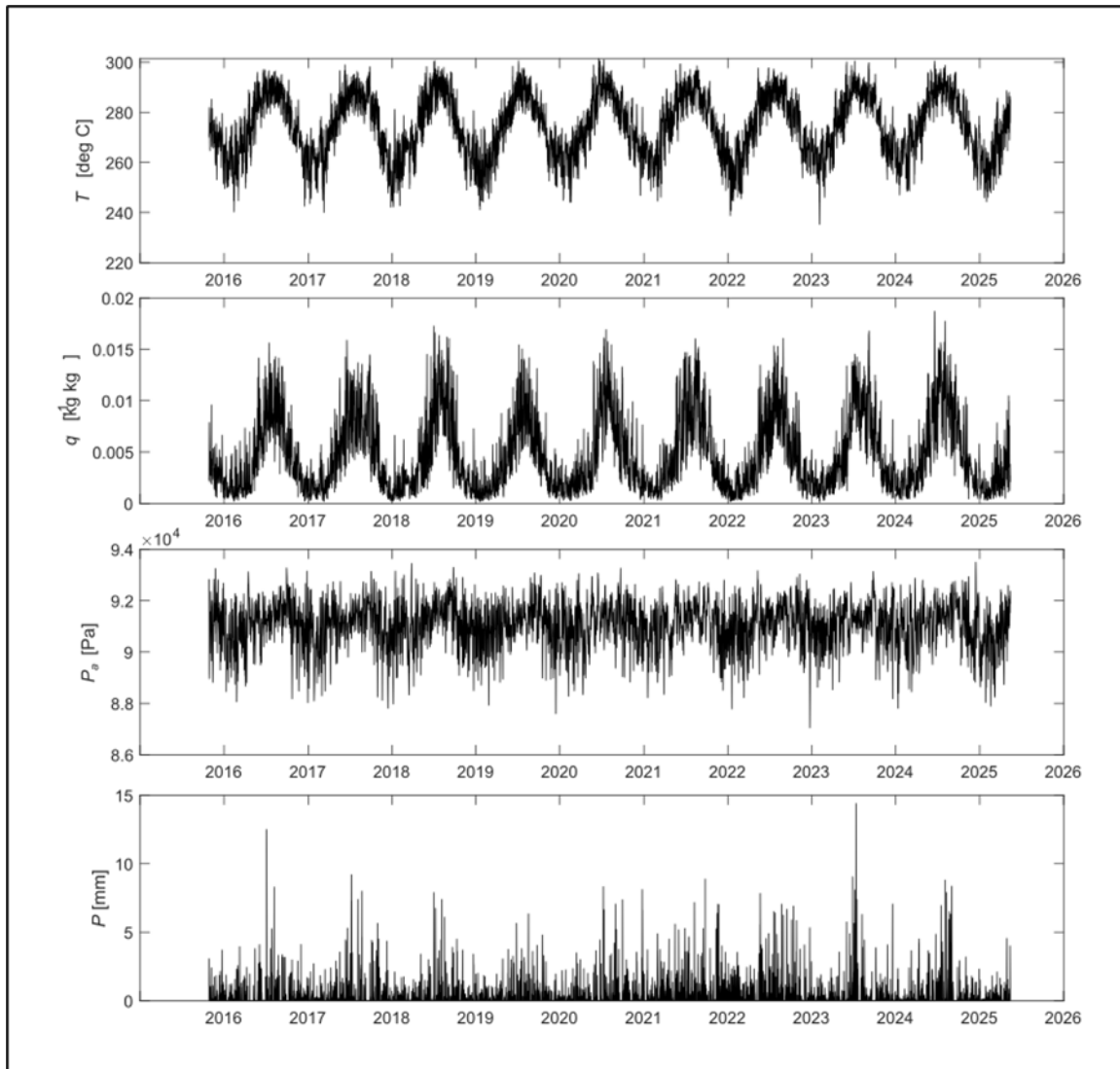


Figure 4. Séries temporelles de variables météorologiques à la forêt Montmorency (station Juvénile). Les variables présentées (température de l'air T , humidité spécifique de l'air q , pression atmosphérique P_a , précipitation totale P) sont au pas de temps demi-heure.

Les données météorologiques sont relativement similaires de site en site, n'étant affecté par la surface que sur de courtes échelles temporelles. Ces données ont été utilisées par diverses équipes de recherche désirant obtenir des informations spécifiques à la forêt Montmorency et à des échelles plus fines que les données disponibles ailleurs. Un exemple est illustré à la figure 5.

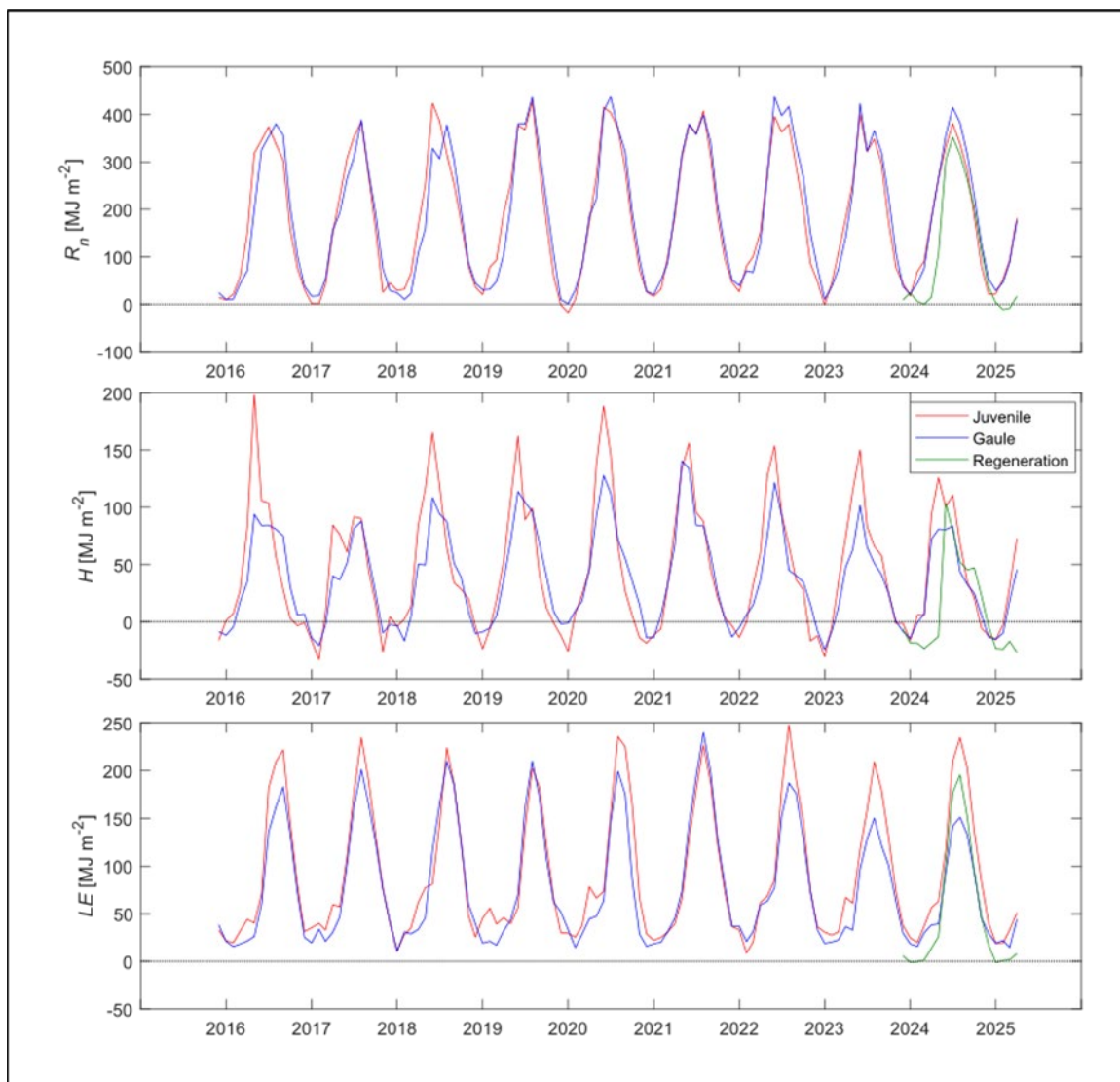


Figure 5. Séries temporelles des flux d'énergie aux trois sites de mesure. Les flux (chaleur sensible H, chaleur latente LE et rayonnement net Rn) sont agrégés en sommes mensuelles.

Les séries de flux d'énergie sont uniques au Québec, colligeant près de 10 ans ininterrompues sur deux sites différents mais rapprochés. La comparaison entre les sites sur cette longue période permet de déceler des tendances claires. Avec une entrée d'énergie par rayonnement relativement semblable de site en site, les plus grands arbres de la station Juvenile renvoient plus d'énergie vers l'atmosphère sous forme de chaleur sensible et latente. L'impact de la neige est manifeste au site Régénération, où le couvert émerge à peine en hiver : il en résulte une diminution de l'énergie totale et partitionnée durant la saison froide.

4.2. ÉQUIPE HYDROMÉTÉOROLOGIE HIVERNALE

4.2.1. Structure du couvert de neige

L'étude révèle que le couvert de neige est plus mince sous la canopée en raison de l'interception de la précipitation qui s'y produit (figure 6). Ceci entraîne des gradients de température verticaux plus marqués, favorisant la formation de cristaux facettés, comparativement aux grains arrondis et plus denses observés dans les ouvertures forestières. Ces différences se traduisent par une perméabilité et une conductivité hydraulique plus élevées sous les arbres, favorisant la percolation de l'eau en période de fonte. En revanche, dans les ouvertures forestières, la présence de couches de regel limite la conductivité hydraulique. Ces contrastes de structure, bien que mesurés à petite échelle, pourraient avoir des effets significatifs sur le cheminement de l'eau à l'échelle du bassin versant.

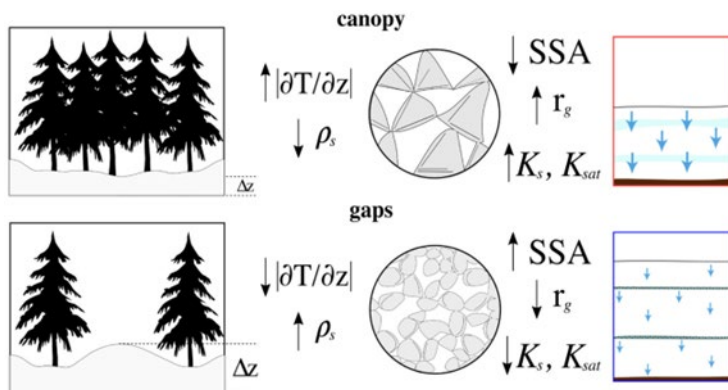


Figure 6. Résumé des différences entre un couvert de neige sous les arbres (haut) et dans les ouvertures forestières (bas), résultant de l'analyse effectuée lors de l'hiver 2018-19 (tiré de Bouchard et al. 2022).

4.2.2. Effet d'un hiver chaud et peu neigeux

L'hiver 2020–2021, plus chaud et moins neigeux, a entraîné une fonte plus hâtive mais plus lente du couvert de neige (figure 7), un refroidissement plus marqué du sol sous la canopée, un métamorphisme plus soutenu de la neige, de même qu'une augmentation de la perméabilité du couvert de neige, surtout sous la canopée. La crue printanière a été exceptionnellement faible cet hiver-là, principalement en raison du mince couvert de neige combiné à un printemps plutôt sec. Les résultats illustrent que la structure de la forêt joue un rôle prépondérant sur le gel du sol et les propriétés du couvert de neige, alors que ce sont plutôt les conditions météorologiques qui vont comment s'opérer l'accumulation et la fonte de la neige (et non la structure de la forêt).

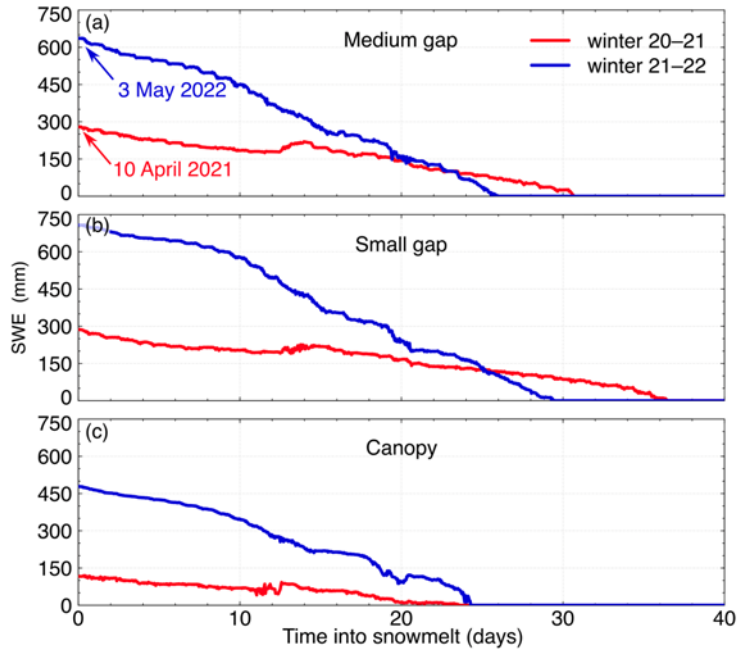


Figure 7. Une fonte plus hâtive du couvert de neige est plus lente, car elle survient à un moment où l'énergie disponible est limitée. Cette figure contraste l'évolution de l'équivalent en eau de la neige (SWE) lors de l'hiver chaud et peu de neigeux de 2020-21 à l'hiver plus normal de 2021-22, dans trois environnements forestiers : (a) ouverture forestière de moyenne taille; (b) ouverture de petite taille; (c) sous les arbres (tiré de Bouchard et al. 2024a).

4.2.3. Rôle de l'interception et des épisodes de pluie

L'étude montre que l'eau provenant de l'égouttement de la neige interceptée ou de la pluie hivernale peut entraîner la formation rapide de couches de regel à faible conductivité hydraulique dans le couvert de neige au sol. Ces couches ralentissent ou bloquent l'infiltration de l'eau de fonte dans les jours ou semaines qui suivent. Nos résultats démontrent également la présence d'écoulements préférentiels au sein du couvert de neige comme un mécanisme important du cheminement vertical de l'eau. Après avoir démontré la performance de SNOWPACK (figure 8) à simuler la hauteur de neige et sa masse volumique sous les arbres, notre étude montre que de permettre l'évolution de la neige interceptée dans le modèle permet de reproduire plus fidèlement le nombre et l'épaisseur de couches de regel dans le couvert de neige au sol.

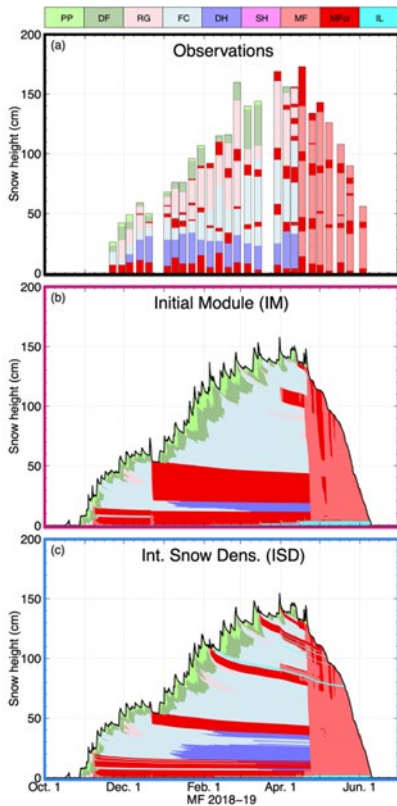


Figure 8. Le nouveau module d'interception (c) permettant l'évolution de la neige interceptée (métamorphisme, densification) reproduit plus fidèlement la structure du couvert de neige sous les arbres observés (a) que le module d'interception par défaut (b) (tiré de Bouchard et al. 2024b).

4.2.4. Modèle probabiliste de la phase de la précipitation

Les modèles probabilistes de fractionnement de la phase proposent des performances en somme supérieures aux approches classiques en termes de précision de classification. Le modèle le plus complet (i.e., qui intègre le plus de variables d'entrées) est sans surprise celui qui présente la plus faible erreur de fractionnement (figure 9). Or, même le modèle probabiliste le plus simple, qui s'appuie uniquement sur la température de l'air et l'élévation du site, se démarque par une performance surpassant l'approche du seuil fixe. Une analyse d'importance des variables pour la construction des modèles probabilistes illustre que la température de l'air à 2 m est la variable la plus importante. L'humidité relative, bien que souvent citée dans la littérature, s'est avérée peu utile comme variable prédictive, car le climat étudié est humide et que les conditions atmosphériques sont souvent près de la saturation.

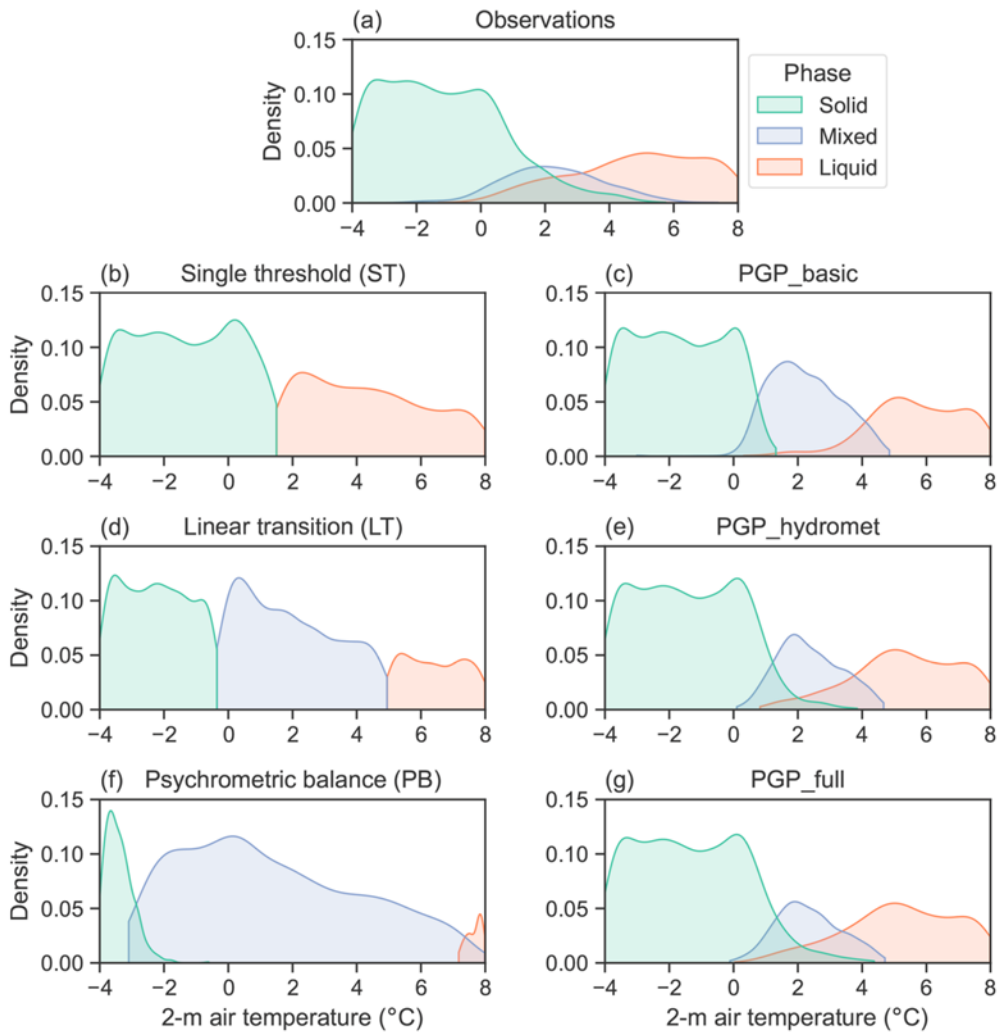


Figure 9. Les approches de fractionnement de la phase de la précipitation développées dans l'étude (colonne de droite, avec un niveau croissant de variables d'entrée du haut vers le bas), arrivent à mieux reproduire les observations que les approches classiques (colonne de gauche), qui elles tendent à surestimer la présence de précipitations mixtes (tiré de Bédard et al. 2025).

4.3. ÉQUIPE GMON-CARTO

4.3.1. Cartographie de la hauteur de la neige

Plusieurs centaines d'observations de neige ont été minutieusement compilées, comparées, nettoyées et analysées. À partir des archives de la forêt Montmorency, il a été possible de retrouver les données de 6 lignes à neiges, comportant chacune 10 points d'échantillonnages mesurés entre 6 et 8 fois par hiver, de 1996 à 2022. Extrêmement utiles pour comparer les lignes entre elles et pour établir des suivis temporels d'accumulation et de fonte de neige, ces données ont été comparées à plus de 2000 données de mesure d'épaisseur de neige prélevées de manière aléatoire sur le territoire dans le cadre d'une étude de suivi de pistage entre 2012 et 2022. Des tendances pertinentes ont été observées entre les observations de densité, d'épaisseur et d'équivalent en eau de la neige lorsque comparées à certaines caractéristiques du territoire, comme l'orientation de la pente, l'altitude et la densité du couvert forestier. Les analyses fines sont en cours.

4.3.2. Mesure de la teneur en eau du sol par GMON

Les résultats montrent que le CS725 peut estimer la teneur en eau du sol minéral avec une exactitude de ± 10 % par rapport aux mesures de référence. L'intégration des variables de l'humus améliore la précision des estimations, surtout lorsque l'épaisseur de l'humus est inférieure ou égale à 10 cm. Pour les sites avec un humus plus épais, les résultats restent cohérents mais moins précis, probablement en raison de l'incertitude sur les paramètres théoriques utilisés.

La discussion met en lumière le potentiel du CS725 comme outil de mesure à moyenne échelle, capable de combler le vide entre les sondes ponctuelles et la télédétection. Elle souligne également l'importance d'intégrer les caractéristiques de l'humus dans les calculs pour obtenir des mesures fiables en forêt boréale. Enfin, la conclusion recommande l'utilisation du CS725 dans des contextes où l'humus est bien caractérisé, et propose la création d'un réseau de capteurs pour extrapoler les données à l'échelle du bassin versant.

4.4. ÉQUIPE AQUIFÈRE

4.4.1. Modélisation physique de la recharge du bassin 7a

La recharge moyenne est de 923,7 mm/an (62 % de la précipitation), dominée par la fonte des neiges (53 %), suivie de l'infiltration estivale et automnale. Les événements pluie-sur-neige sont également des contributeurs significatifs en hiver.

Les zones de recharge maximales se trouvent dans les parties médianes du bassin, avec des pentes faibles et des dépôts glaciaires épais. Les zones de contact avec le cours d'eau et les affleurements rocheux ne présentent pas de recharge. La recharge est saisonnière, maximale en mai et minimale en février (figure 10). Ces résultats sont cohérents avec les études antérieures.

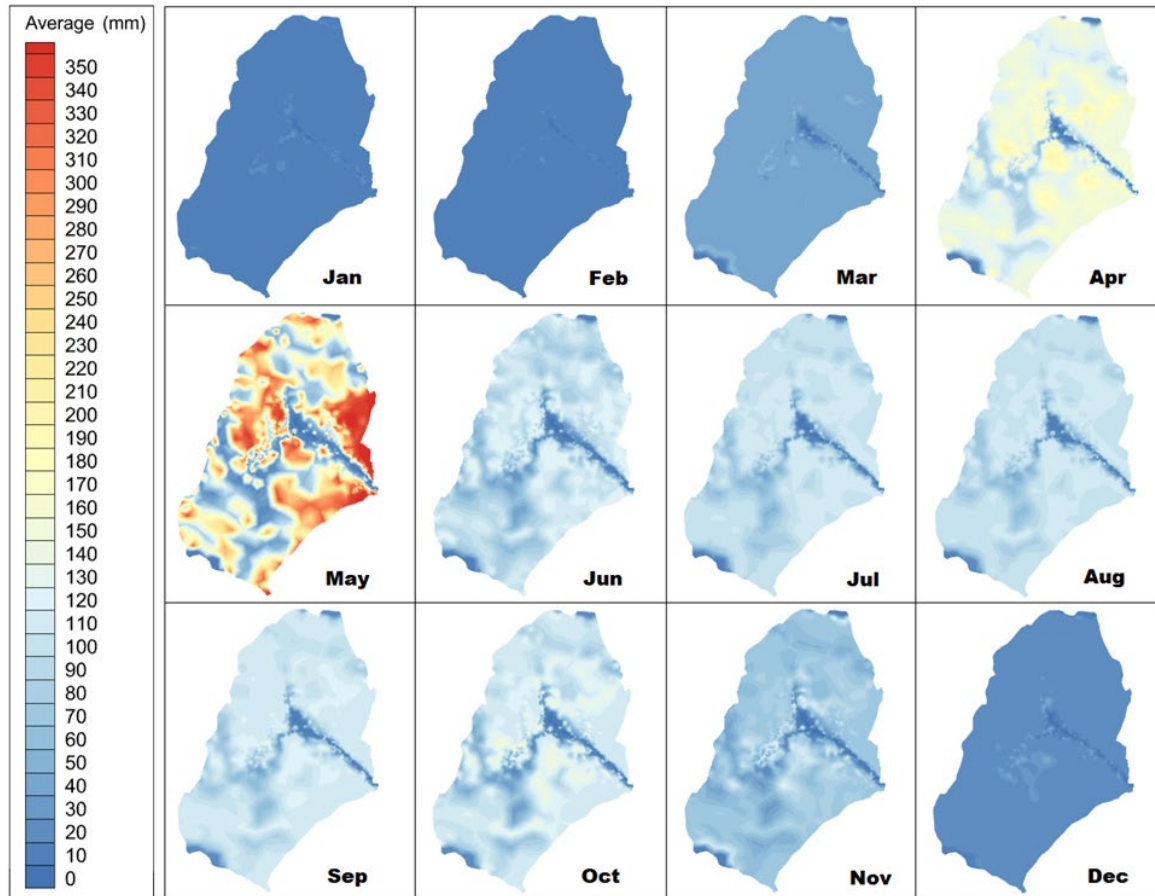


Figure 10. Distribution spatiale et intensité (mm) de la recharge mensuelle moyenne pour la période 1965-2020, pour le bassin 7a du BEREV, à la forêt Montmorency (tiré de Antolinez-Quijanoa et al. 2026a).

Cette étude montre qu'il est possible d'estimer de manière fiable la recharge en eau souterraine dans un bassin boréal à l'aide de simulations hindcast du modèle HGS. Le modèle a bien reproduit les dynamiques de ruissellement, de niveaux d'eau et de recharge sur plus de 55 ans. La méthode pourrait être étendue à d'autres régions nordiques pour soutenir la gestion durable des ressources en eau sous l'effet du changement climatique.

4.4.2. Comparaison de plusieurs méthodes de modélisation

Les résultats montrent que la recharge annuelle moyenne estimée par HGS est de 923 mm (61 % de la précipitation). Les autres méthodes donnent des valeurs comprises entre 40 % (GWHAT) et 54 % (baseflow). Le bilan hydrique simple affiche 53 %, tandis que la méthode de récession atteint aussi 53 %. Les analyses de corrélation (figure 11) révèlent une bonne concordance entre les scénarios GWHAT ($r > 0,8$), ainsi qu'entre les méthodes baseflow. HGS est fortement corrélé à GWHAT ($r \approx 0,84$), mais présente des écarts avec les méthodes baseflow ($r < 0,1$). L'analyse des biais montre une bonne concordance HGS–baseflow HFI/HSI et RCD. La méthode WTF, bien qu'appliquée sur seulement 3 ans, produit des résultats proches de HGS (≈ 62 %).

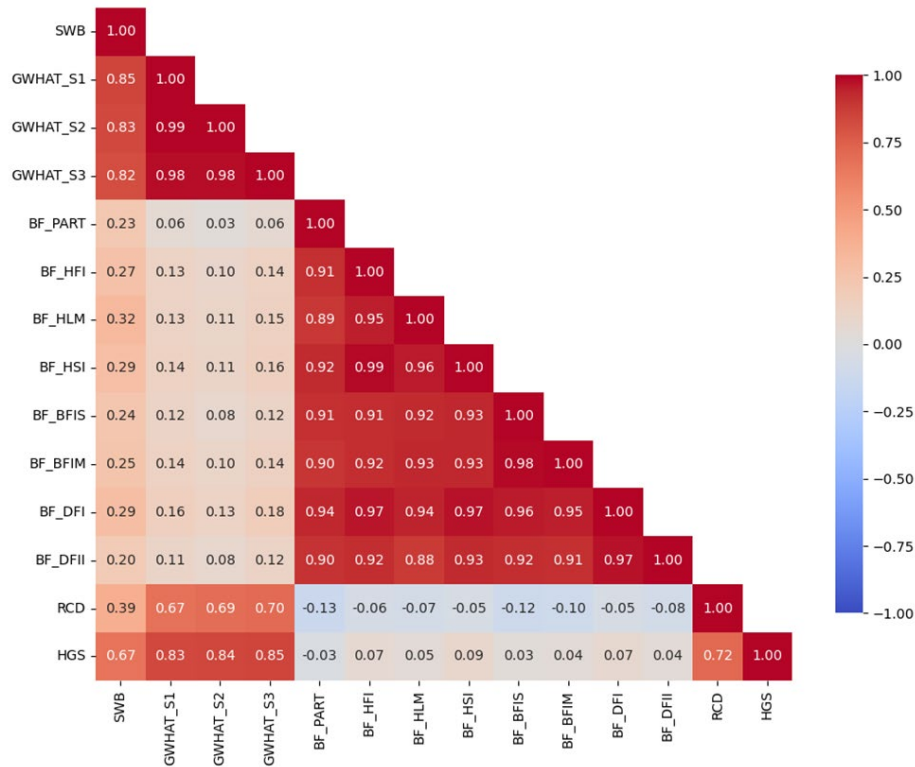


Figure 11. Matrice de corrélation entre les différentes approches de modélisation de la recharge (tiré de Antolínez-Quijano et al. 2026b)

4.5. ÉQUIPE MRCC HAUTE RÉOLUTION

4.5.1. Évaluation de la phase des précipitations

La phase des précipitations a été évaluée en fonction de la température de l'air à 2 m et de la quantité de précipitations liquides, solides et mixtes (figure 12). Le point de grille le plus près de la station a été utilisé pour l'évaluation. Les deux simulations surestiment la quantité de précipitations liquide et sous-estiment la quantité de précipitations solides. La simulation à plus haute résolution (MRCC6-2.5km) représente mieux les précipitations liquides tandis que les précipitations solides sont mieux représentées par les simulations à plus basse résolution (MRCC6-12km). Les deux simulations surestiment la quantité de précipitations mixtes.

La température de l'air à 2 m associée aux précipitations liquides et solides est bien représentée par les deux simulations. Toutefois, les précipitations solides sont produites à des températures plus basses que dans les observations. Les précipitations mixtes sont également généralement produites à des températures plus basses que celles observées.

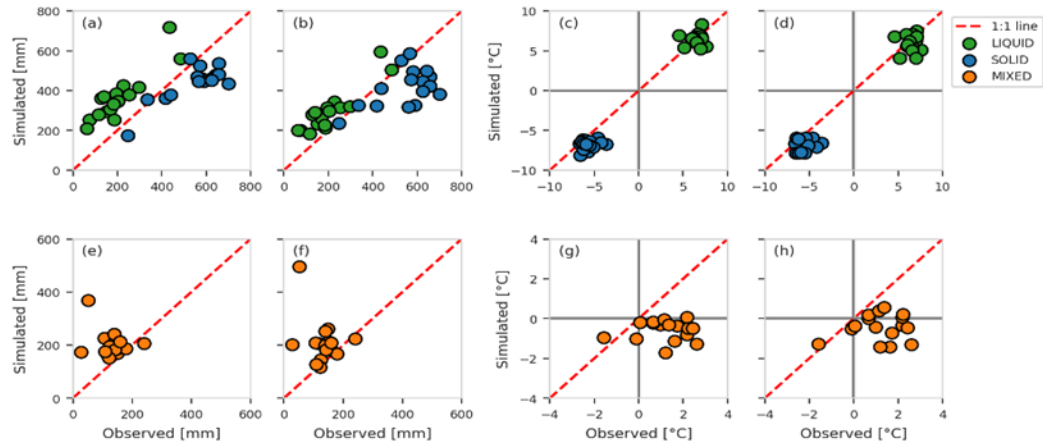


Figure 12. Comparaison des quantités de précipitations simulées et observées aux stations hydrométéorologiques pour les précipitations liquides, solides et mixtes (a, b, e, f), ainsi que la température de l'air à 2 m correspondante à laquelle ces types de précipitations se produisent (c, d, g, h). Les panneaux des première et troisième colonnes (a, e, c, g) représentent la simulation MRCC6-12km, tandis que les panneaux des deuxième et quatrième colonnes (b, f, d, h) représentent la simulation MRCC6-2.5km.

La figure 13 montre la distribution de précipitations en fonction de la température à 2 m. La température limite, T_{50} , représente la probabilité de précipitations solide et liquide sont la même. Cette limite pour les observations est de 2.1°C . Les deux simulations ont une valeur de 0.8°C pour le MRCC6-12km et de 0.5°C pour le MRCC6-2.5km. De plus, la simulation à plus haute résolution représente mieux les précipitations liquides mais les précipitations mixtes sont moins bien représentées par les deux simulations, particulièrement à des températures d'environ -5°C et 0°C . Finalement, l'occurrence de précipitation solide entre -5°C et 0°C est plus rarement produite par le MRCC6-2.5km que le MRCC6-12km. En résumé, même si les deux simulations ont de la difficulté à reproduire les précipitations mixtes, la pluie est mieux représentée par le MRCC6-2.5km et les précipitations solides par le MRCC6-12km.

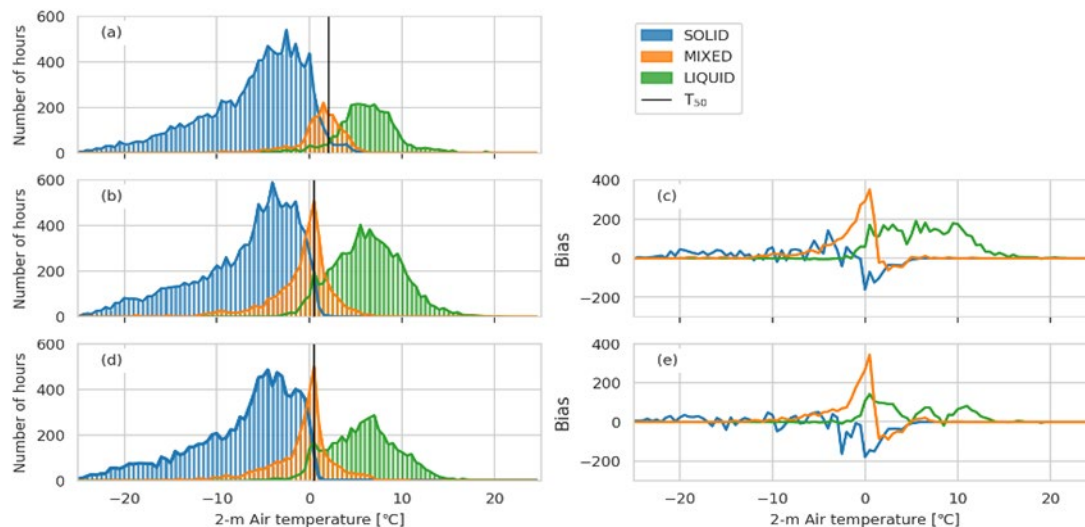


Figure 13. Le nombre d'heures de chaque type de précipitations et les biais correspondants en fonction de la température de l'air à 2 m pour (a) les observations, (b-c) MRCC6-12km, et (d-e) MRCC6-2.5km. La ligne verticale noire indique le seuil de 50 % de la température pluie-neige (T_{50}). Chaque distribution est codée en couleur selon le type de précipitations, avec un contour ajouté pour faciliter la comparaison lorsque les distributions se chevauchent.

Finalement, une analyse des heures cumulées de précipitation solides, liquides et mixtes en fonction de la température de l'air à 2 m est montrée à la figure 14. Le MRCC6-2.5km a tendance à sous-estimer l'occurrence cumulative des précipitations solides pour les températures > 0°C, alors que le MRCC6-12km l'a surestimé à toutes les températures. Cependant, MRCC6-2.5km est plus précis pour les précipitations liquides et mixtes.

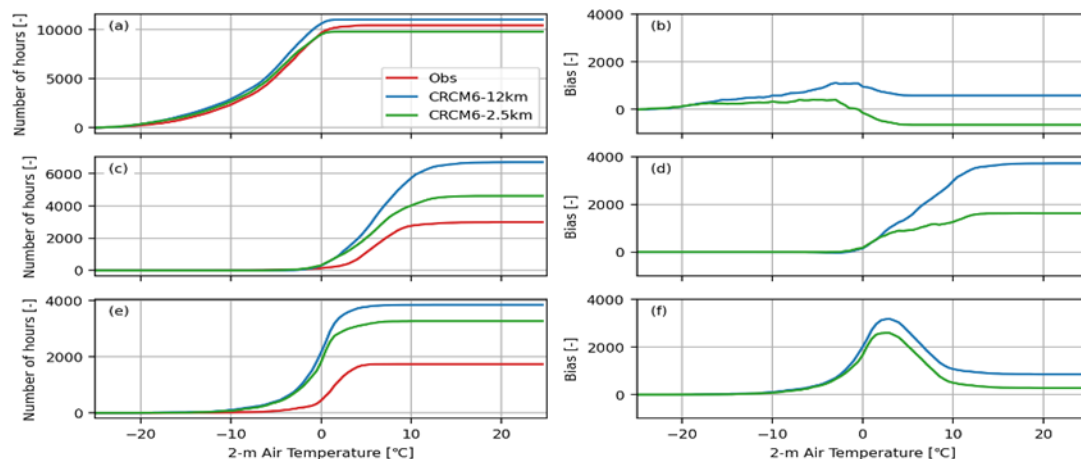


Figure 14. Nombre cumulé d'heures de précipitations en fonction de la température de l'air à 2 m pour les observations (rouge), MRCC6-12km (bleu), et MRCC6-2.5km (vert), pour (a) les précipitations solides, (c) les précipitations liquides, et (e) les précipitations mixtes. Les biais de simulation correspondants pour MRCC6-12km et MRCC6-2.5km sont présentés pour les précipitations (b) solide, (d) liquide et (f) mixte.

4.5.2. Évaluation du cycle de l'eau

L'évaluation des principales composantes du bilan de l'eau atmosphérique a été réalisée à l'aide de bases de données jugées pertinentes, issues d'observations ou de réanalyses reconnues pour leur qualité. Pour les précipitations, le produit Canadian Precipitation Analysis (CaPA; Fortin et al. 2018; Mai et al. 2020) a été retenu en raison de son assimilation des observations provenant des stations météorologiques, ce qui n'est pas le cas dans les réanalyses globales comme ERA5-Land.

L'évaluation de la précipitation a été menée à la fois à l'échelle de la grille et à l'échelle des bassins versants. Concernant l'évapotranspiration, bien que les données ERA5-Land (Muñoz-Sabater et al., 2021) ne reposent pas sur l'assimilation directe de mesures in situ, elles offrent une estimation physiquement cohérente, à haute résolution, et couramment utilisée dans les études hydrologiques. Enfin, pour évaluer la convergence du flux d'humidité et la tendance de l'eau précipitable, une version assurant la conservation de la masse dans la colonne atmosphérique des données ERA5 a été utilisée (Mayer et al., 2022). La convergence du flux d'humidité, moyennée spatialement sur un bassin versant et temporellement sur plusieurs années, peut être utilisée comme un indicateur de la disponibilité en eau dans la région. Par ailleurs, comme ni la convergence du flux d'humidité ni la tendance de l'eau précipitable ne sont directement disponibles en sortie du modèle, ces champs ont été calculés à partir des vents horizontaux et de la somme de la vapeur d'eau et des autres hydrométéores simulés, afin de représenter l'évolution de l'eau atmosphérique totale.

Le modèle reproduit de manière satisfaisante les principales composantes du bilan hydrique atmosphérique sur le bassin des Grands Lacs, selon la comparaison avec les produits de référence (figure 15). Toutefois, les précipitations, la convergence de vapeur d'eau et l'évaporation sont généralement surestimées dans la majorité des configurations. Les simulations à haute résolution (2,5 km), qui permettent une représentation explicite de la convection profonde, reproduisent plus fidèlement les données de référence; plus particulièrement celles combinant le schéma de surface CLASS et le schéma microphysique P3 (figure 15 a). Ce même comportement du modèle a également été observé sur les deux autres bassins versants étudiés, soit ceux de l'Outaouais et du Saint-Maurice. De plus, la figure 16 met en évidence une nette amélioration des

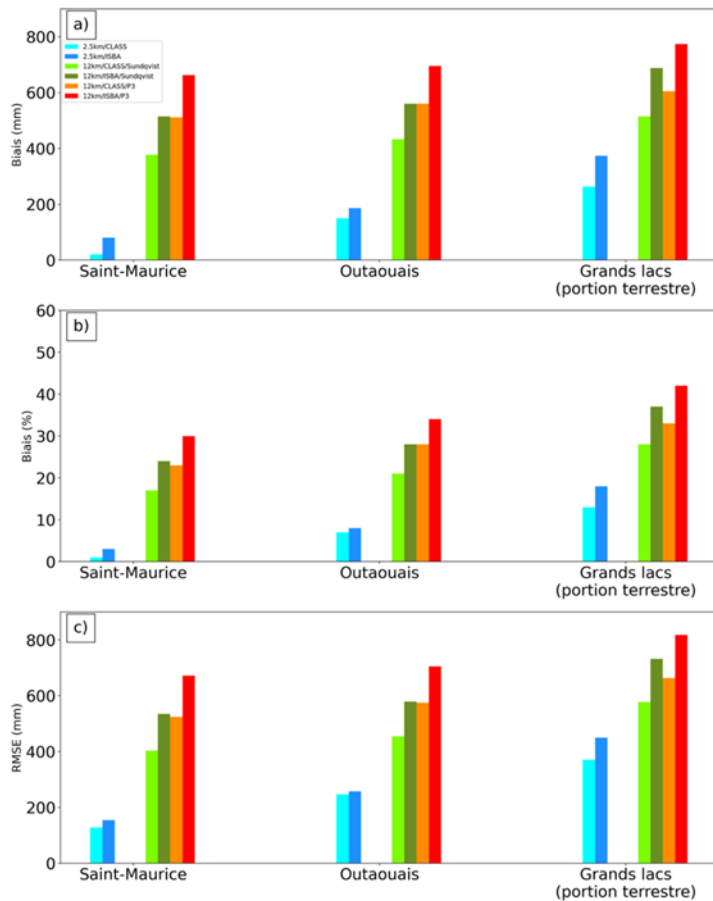


Figure 16. Cumuls de précipitations sur deux années hydrologiques (septembre 2018 à août 2020) : (a) biais absolu, (b) biais relatif, et (c) erreur quadratique moyenne (RMSE), calculés par rapport aux données CaPA. Les biais sont moyennés sur chacun des bassins versants, tandis que la RMSE est calculée à partir de l'ensemble des points de grille de chaque bassin. Le biais relatif est exprimé en divisant le biais absolu par la moyenne des précipitations CaPA sur le bassin.

4.6. ÉQUIPE HYDROLOGIE MRCC

4.6.1. Sensibilité du modèle CLASS à la texture du sol

En général, les sols qui possèdent un plus grand pourcentage d'argile présentent une capacité de rétention d'eau et une disponibilité en eau pour la végétation plus élevées, ce qui est favorable à l'évaporation, au ruissellement de surface et à la teneur en eau.

Les principaux éléments de l'évaporation (E) influencés par les caractéristiques du sol sont l'évaporation du sol (E_G) et la transpiration (E_T), la première étant plus fortement influencée. Le rapport E_G/P illustré à la figure 17 présente des valeurs plus élevées pour le site de Broadback et des valeurs plus faibles pour le site de Chaudière, avec des pentes similaires et très inclinées entre les deux sites. Les sols sableux ont le moins d'impact sur l'évaporation du sol, car les sols argileux ont une plus grande teneur en eau et donc ceux-ci ont des valeurs plus élevées d'évaporation depuis le sol. Le rapport E_G/P est essentiellement inverse à celui de l'évaporation du sol, bien que sa pente soit légèrement ascendante, suggérant un impact légèrement plus élevé des sols sableux sur la transpiration. L'évaporation interceptée (E_c), en revanche, n'est pas influencée par les caractéristiques du sol, présentant des valeurs de ratio élevées et suivant une tendance linéaire.

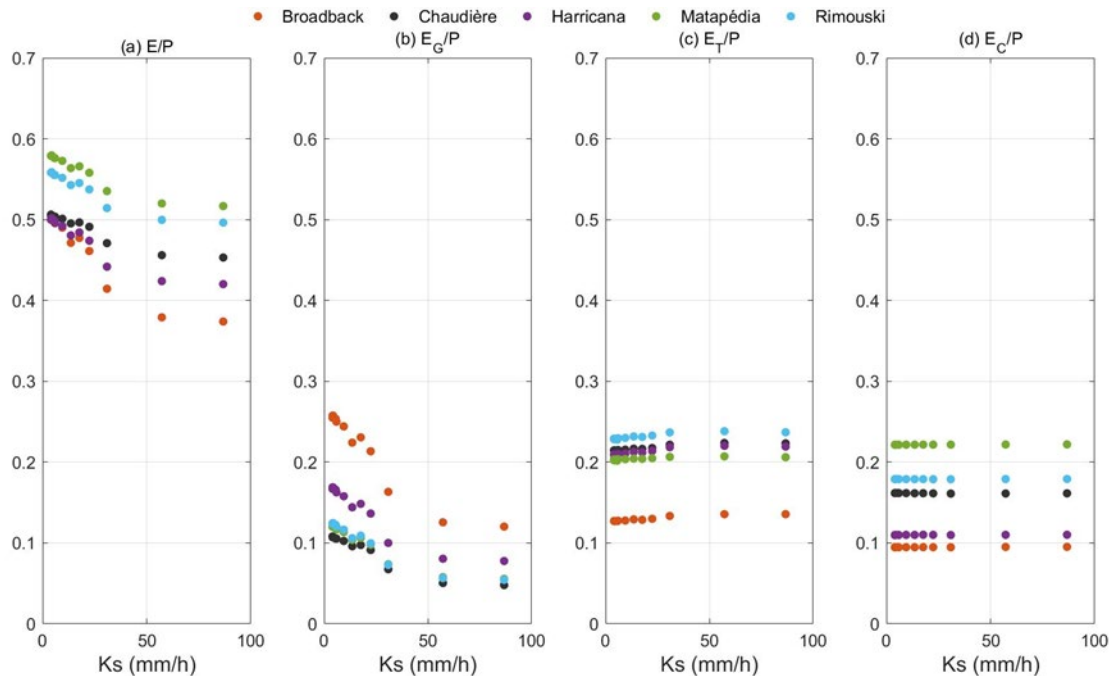


Figure 17. (a) Ratio entre l'évaporation totale et la précipitation totale. (b) Ratio entre l'évaporation du sol et la précipitation totale. (c) Ratio entre la transpiration et la précipitation totale. (d) Ratio entre l'évaporation interceptée et la précipitation totale. Le tout en fonction de la conductivité hydraulique (mm/h) des sols présentés au tableau 2 (tiré de Marjanovic 2024).

4.6.2. Sensibilité du modèle MRCC à la texture du sol

Les résultats (figure 18) indiquent que les différences de texture du sol (SIIGSOL moins ECOCLIMAP) modifient considérablement la répartition du rayonnement net dans ses flux constitutifs pendant les mois d'été critiques, avec des augmentations notables du flux de chaleur latente (jusqu'à $+18,5 \text{ W m}^{-2}$), des réductions du flux de chaleur sensible (jusqu'à $-3,5 \text{ W m}^{-2}$), et une augmentation du rayonnement net (jusqu'à $+16,5 \text{ W m}^{-2}$) par rapport à la moyenne saisonnière JJA d'ECOCLIMAP. Malgré l'augmentation du refroidissement par évaporation, les températures de l'air près de la surface présentent un réchauffement modeste mais persistant (jusqu'à $0,2 \text{ }^\circ\text{C}$), attribué à l'augmentation de la rétention nocturne de la chaleur dans les sols riches en argile présents dans l'ensemble de données SIIGSOL. En revanche, les précipitations ont montré une sensibilité minimale, soulignant la prédominance de la dynamique atmosphérique à grande échelle sur les conditions pédologiques localisées dans la formation des précipitations. Cependant, la séquence temporelle des précipitations a divergé entre les données SIIGSOL et les données SIIGSOL.

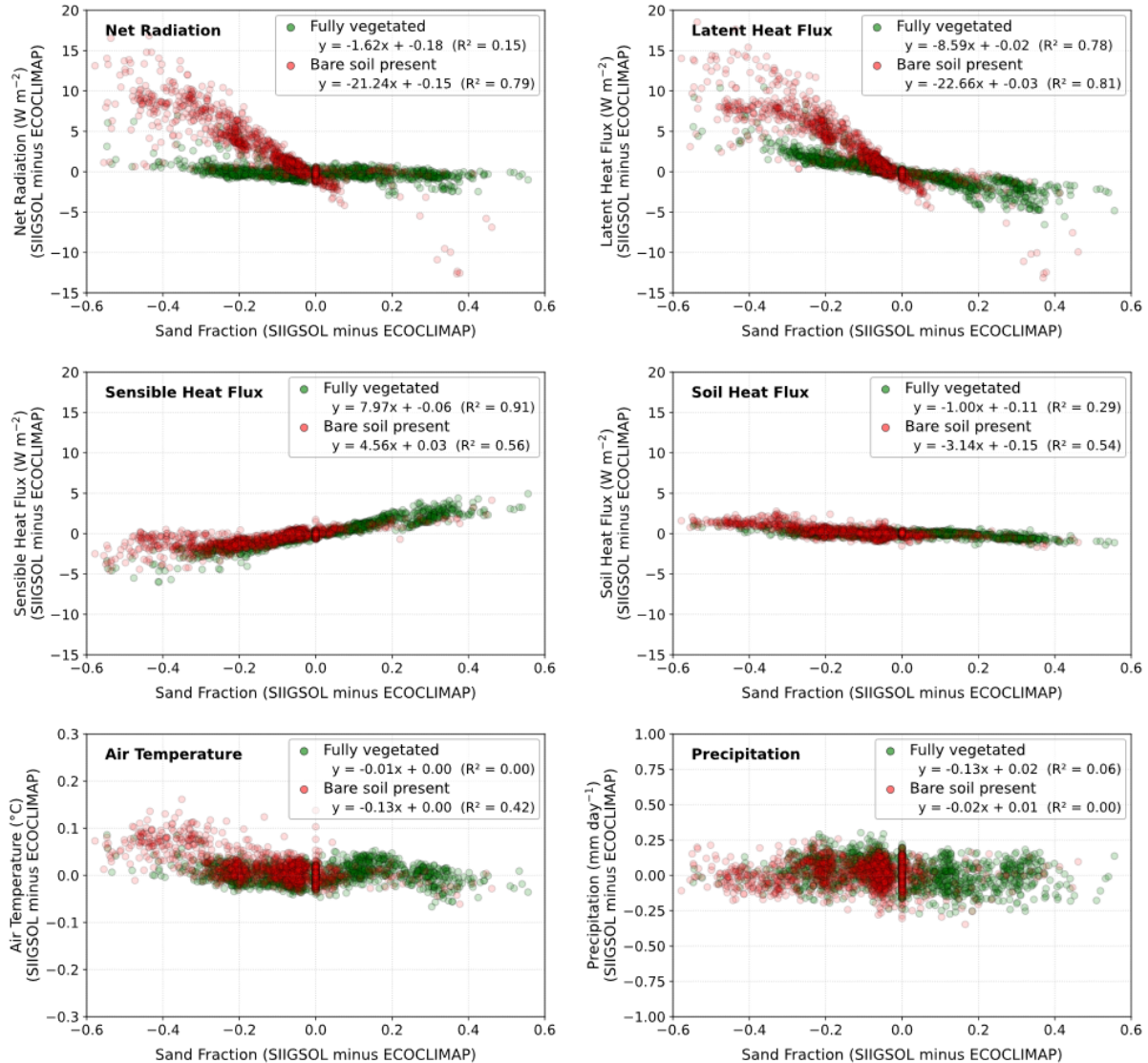


Figure 18. Sensibilité des résultats du MRCC5 aux différences de texture du sol sous différents types de couverture de surface (différences saisonnières JJA, 1982-2021) (tirée de Hayati et al. 2026).

5. Conclusion

Les conclusions et retombées présentées ici succinctement découlent des réalisations étudiantes au sein de chaque équipe.

5.1. ÉQUIPE MICROMÉTÉOROLOGIE

Les données recueillies par nos montages continuent de s'accumuler en maintenant leur haut standard de qualité. Dans un futur rapproché, il est prévu de publier ces données dans une revue scientifique de haut niveau (p. ex. Earth System Science Data), et possiblement inclure nos sites dans les réseaux mondiaux de tours à flux (p. ex. FLUXNET et Ameriflux). La publicisation de ces données promet de générer des avancements importants en sciences hydrologiques, atmosphériques et autres domaines connexes. C'est

d'autant plus vrai considérant la localisation de nos sites, qui comblent un vide dans l'étude du bilan d'énergie de surface des forêts boréales du nord-est américain.

5.2. ÉQUIPE HYDROMÉTÉOROLOGIE HIVERNALE

Ce volet a montré que le couvert de neige est plus mince sous la canopée des arbres en raison de l'interception des précipitations, ce qui entraîne des gradients de température plus marqués et favorise la formation de cristaux facettés. Cela augmente la perméabilité et la conductivité hydraulique sous les arbres, facilitant la percolation de l'eau pendant la fonte, contrairement aux ouvertures forestières où les couches de regel limitent cette conductivité. L'hiver 2020-2021, plus chaud et moins neigeux, a entraîné une fonte plus lente et un refroidissement plus marqué du sol sous la canopée, augmentant la perméabilité du couvert de neige. L'eau provenant de la neige interceptée ou de la pluie hivernale peut former rapidement des couches de regel à faible conductivité hydraulique, ralentissant l'infiltration de l'eau de fonte. Les modèles probabilistes de fractionnement de la phase, intégrant diverses variables, se sont révélés plus précis que les approches classiques, avec la température de l'air à 2 m étant la variable la plus importante.

5.3. ÉQUIPE GMON-CARTO

Des centaines d'observations de neige de la forêt Montmorency ont été compilées et analysées, couvrant des données de 1996 à 2022. Celles-ci ont été comparées à plus de 2000 mesures aléatoires de 2012 à 2022. Des tendances ont été observées en fonction de caractéristiques du territoire comme l'orientation de la pente et la densité du couvert forestier. Le potentiel du CS725 comme outil de mesure à moyenne échelle a été mis en lumière, soulignant l'importance d'intégrer les caractéristiques de l'humus pour des mesures fiables. La conclusion recommande l'utilisation du CS725 dans des contextes bien caractérisés et propose un réseau de capteurs pour extrapoler les données à l'échelle du bassin versant.

5.4. ÉQUIPE AQUIFÈRE

Cette étude montre qu'il est possible d'estimer de manière fiable la recharge en eau souterraine dans un bassin boréal à l'aide de simulations hindcast du modèle HGS. Le modèle a bien reproduit les dynamiques de ruissellement, de niveaux d'eau et de recharge sur plus de 55 ans. La méthode pourrait être étendue à d'autres régions nordiques pour soutenir la gestion durable des ressources en eau sous l'effet du changement climatique. La comparaison multi-approches démontre que HGS reste la méthode la plus complète pour simuler la recharge, intégrant les processus physiques de l'ensemble du cycle hydrologique. Le bilan hydrique simple est une méthode efficace et bien corrélée. Le modèle GWHAT, malgré une sous-estimation, est utile pour les bassins enneigés. Les méthodes de baseflow, bien que courantes, sont peu adaptées au contexte boréal. L'étude souligne l'importance des données d'évapotranspiration : fixer PET diminue la recharge estimée (-4 %), alors que fixer AET (Bowen ou ERA5) l'augmente légèrement (+1 %). Il est recommandé d'utiliser plusieurs méthodes pour améliorer la robustesse des estimations de recharge en contexte nordique.

5.5. ÉQUIPE MRCC HAUTE RÉOLUTION

Cette étude démontre que le modèle à plus haute résolution avec convection profonde explicite apporte une certaine valeur ajoutée aux simulations de la saison froide et du cycle de l'eau sur l'échelle de bassin versant (figures 15 et 16).

Le MRCC6-GEM5 reproduit raisonnablement les précipitations et la température à 2 m sur le sud du Québec. La résolution plus fine produit un biais de température et de précipitation totale plus faible que la résolution plus grossière. En revanche, il est difficile de conclure que la résolution fine permet de mieux représenter la phase des précipitations. La simulation des précipitations solides et liquides varient en fonction des températures à 2 m et des résolutions utilisées. Les deux résolutions sous-estiment les précipitations solides et surestiment la

quantité de précipitations mixtes et produisent ces précipitations à des températures plus froides. Plus de détails sont donnés dans Chalifour (2023).

L'analyse des composantes du bilan de l'eau atmosphérique confirme que le modèle MRCC6-GEM5 reproduit raisonnablement bien la variabilité saisonnière et les ordres de grandeur des flux simulés. Toutefois, la surestimation systématique des précipitations, de l'évaporation et de la convergence de vapeur d'eau dans plusieurs configurations souligne l'importance du choix des schémas physiques. Les simulations à résolution fine (2,5 km), qui permettent une représentation explicite de la convection profonde, montrent une performance accrue, en particulier lorsqu'elles intègrent le schéma de surface CLASS et la microphysique P3. Ces résultats, observés de manière cohérente sur les trois bassins versants étudiés, suggèrent que la combinaison haute résolution – CLASS – P3 constitue une configuration prometteuse pour améliorer la représentation du cycle de l'eau dans les simulations climatiques régionales.

5.6. ÉQUIPE HYDROLOGIE MRCC

Ce volet a démontré que la base de données SIIGSOL produisait des résultats systématiquement différents dans l'hydrologie de surface, le bilan énergétique et la température de l'air près de la surface par rapport à la base de données ECOCLIMAP. Cela confirme non seulement la sensibilité du MRCC5 à la texture du sol, mais souligne également le potentiel d'amélioration de la précision du modèle et des projections climatiques régionales grâce à une représentation plus précise des données d'entrée du sol.

De plus, nos résultats mettent en évidence une dimension critique du couplage sol-climat, en soulignant le rôle clair de la couverture de surface dans la modération de cette sensibilité. Ces résultats suggèrent que les améliorations apportées aux modèles climatiques devraient prendre en compte simultanément les propriétés des sols de subsurface et l'hétérogénéité de la surface. La priorité donnée aux données de surface à haute résolution et différenciées dans l'espace peut améliorer la précision des simulations dans les zones les plus sensibles à la rétroaction entre la terre et l'atmosphère. Ces observations ont des implications directes pour la configuration des modèles et la paramétrisation de la surface terrestre, en particulier pour soutenir la planification de l'adaptation régionale et les évaluations sectorielles de l'impact sur le climat.

Références

ANTOLINEZ-QUIJANO WL, THERRIEN R, ANCTIL F. 2026a. Hindcasting simulations to estimate spatio-temporal rates of groundwater recharge in a wet boreal catchment. En préparation.

ANTOLINEZ-QUIJANO WL, HADIWIJAYAB B, THERRIEN R, ANCTIL F. 2026b. Estimating groundwater recharge: a multi-approach comparison constrained by evapotranspiration data. En préparation.

BECHTOLD P, BAZILE E, GUICHARD F, MASCART P, RICHARD E. 2001. A mass-flux convection scheme for regional and global models. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 127:869–886. DOI: 10.1002/qj.49712757309

BÉDARD-THERRIEN A, ANCTIL F, THÉRIAULT JM, CHALIFOUR O, PAYETTE F, VIDAL A, NADEAU DF. 2025. Leveraging a Disdrometer Network to Develop a Probabilistic Precipitation Phase Model in Eastern Canada. *Hydrology and Earth System Sciences* 29: 1135-1158. DOI: 10.5194/hess-2024-78

BÉLAIR S, MAILHOT J, GIRARD C, VAILLANCOURT P. 2005. Boundary layer and shallow cumulus clouds in a medium-range forecast of a large-scale weather system. *Monthly Weather Review* 133:1938–1960. DOI: 10.1175/MWR2958.1

BÉLAIR S, BROWN R, MAILHOT J, BILODEAU B, CREVIER LP. 2003. Operational implementation of the ISBA land surface scheme in the Canadian regional weather forecast model. Part II: Cold season results. *Journal of Hydrometeorology* 4:371–386. DOI: 10.1175/1525-7541(2003)4<371:OIOTIL>2.0.CO;2

- BOUCHARD B, NADEAU DF, DOMINE F. 2022. Comparison of snowpack structure in gaps and under the canopy in a humid boreal forest. *Hydrological Processes*, 36:e14681. DOI: 10.1002/hyp.14681
- BOUCHARD B, NADEAU DF, DOMINE F, ANCTIL F, JONAS T, TREMBLAY É. 2024a. How does a warm and low-snow winter impact the snow cover dynamics in a humid and discontinuous boreal forest? Insights from observations and modeling in eastern Canada. *Hydrology and Earth System Sciences* 28:2745-2765. DOI: 10.5194/hess-28-2745-2024
- BOUCHARD B, NADEAU DF, DOMINE F, WEVER N, MICHEL A, LEHNING M, ISABELLE PE. 2024. Impact of intercepted and sub-canopy snow microstructure on snowpack response to rain-on-snow events under a boreal canopy. *Cryosphere* 18:2783-2807. DOI: 10.5194/tc-18-2783-2024
- CARSEL RF, PARRISH RS. 1988. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. *Water resources research*, 24:755-769. DOI: 10.1029/WR024i005p00755
- CHALIFOUR O, MUSIC B, THÉRIAULT JM et al. 2025. Effects of convection-permitting grid resolution on cold-season precipitation simulated by the Canadian Regional Climate Model version 6. *Authorea*. April 24, 2025.
- CHALIFOUR O. 2023. Évaluation de la valeur ajoutée par l'augmentation de la résolution de la quantité et de la phase des précipitations simulées par le modèle régional canadien du climat version 6 (Master's thesis). Retrieved from Archipel (<https://archipel.uqam.ca/17263/>) Montréal (Québec), Canada: Université du Québec à Montréal.
- FORTIN V, ROY G, STADNYK NT, KOENIG K, GASSET N, MAHIDJIBA A. 2018. Ten years of science based on the Canadian Precipitation Analysis: A CaPA system overview and literature review. *Atmosphere-Ocean* 56:178–196. DOI: 10.1080/07055900.2018.1474728
- GOSELIN JS. 2016. Estimation de la recharge à partir de séries temporelles de la température du sol, des niveaux d'eau dans les puits et de données météorologiques: développement méthodologique et évaluation de l'incertitude. Thèse. Québec, Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique, Doctorat en sciences de la terre, 216 p.
- HAYATI E, MUSIC B, ANCTIL F. 2026. Long-term Sensitivity of Regional Climate Dynamics to Soil Data: Insights from CRCM5 Simulations. En préparation.
- HUSAIN SZ, ALAVI N, BÉLAIR S, CARRERA M, ZHANG S, FORTIN V, ABRAHAMOWICZ M, GAUTHIER N. 2016. The multibudget Soil, Vegetation, and Snow (SVS) scheme for land surface parameterization: Offline warm season evaluation. *Journal of Hydrometeorology* 17:2293-2313. DOI: 10.1175/JHM-D-15-0228.1
- HWANG HT, PARK YJ, SUDICKY EA, FORSYTH PA. 2014. A parallel computational framework to solve flow and transport in integrated surface–subsurface hydrologic systems. *Environmental modelling & software* 61:39-58. DOI: 10.1016/j.envsoft.2014.06.024
- JOUAN C, MILBRANDT JA, VAILLANCOURT PA, CHOSSON F, MORRISON H. 2020. Adaptation of the Predicted Particles Properties (P3) microphysics scheme for large-scale numerical weather prediction. *Weather and Forecasting* 35:2541–2565. DOI: 10.1175/WAF-D-20-0111.1
- KAIN JS, FRITSCH JM. 1990. A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization. *Journal of the Atmospheric Sciences* 47:2784–2802.
- MARJANOVIC M. 2024. Sensibilité du modèle de surface CLASS à la texture du sol au Québec. Mémoire de maîtrise, Université Laval, 60 p.
- MASSON V, CHAMPEAUX JL, CHAUVIN F, MERIGUET CH, LACAZE R. 2003. A global database of land surface parameters at 1-km resolution in meteorological and climate models. *Journal of Climate* 16:1261–1282. DOI: 10.1175/1520-0442(2003)16<1261:AGDOLS>2.0.CO;2
- MAYER J, MAYER M, HAIMBERGER L. 2022. Mass-consistent atmospheric energy and moisture budget data from 1979 to present derived from ERA5 reanalysis (v1.0). Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). DOI: 10.24381/cds.c2451f6b

McTAGGART-COWAN R, VAILLANCOURT PA, ZADRA A, SEPAROVIC L, CORVEC S, KIRSHBAUM D. 2019a. A Lagrangian perspective on parameterizing deep convection. *Monthly Weather Review* 147:4127–4149. DOI: 10.1175/MWR-D-19-0164.1, a.

McTAGGART-COWAN R, VAILLANCOURT PA, ZADRA A, CHAMBERLAND S, CHARRON M, CORVEC S, MILBRANDT JA, PAQUIN-RICARD D, PATOINE A, ROCH M, SEPAROVIC L, YANG J. 2019b. Modernization of atmospheric physics parameterization in Canadian NWP. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 11(11), 3593–3635. <https://doi.org/10.1029/2019MS001781>, b.

MIRONOV D, HEISE E, KOURZENEVA E, RITTER B, SCHNEIDER N et al. 2010. Implementation of the lake parameterisation scheme FLake into the numerical weather prediction model COSMO. *Boreal Environment Research* 15:218–230.

MORRISON H, MILBRANDT JA. 2015. Parameterization of cloud microphysics based on the prediction of bulk ice particle properties. Part I: Scheme description and idealized tests. *Journal of the Atmospheric Sciences* 72:287–311. DOI: 10.1175/JAS-D-14-0065.1

MUÑOZ-SABATER J, DUTRA E, AGUSTÍ-PANAREDA et al. 2021. ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth System Science Data* 13:4349–4383. DOI: 10.5194/essd-13-4349-2021

ISABELLE PE, NADEAU DF, ANCTIL F, ROUSSEAU AN, JUTRAS S, MUSIC B. 2020. Impacts of high precipitation on the energy and water budgets of a humid boreal forest. *Agricultural and Forest Meteorology* 280:1-13. DOI: 10.1016/j.agrformet.2019.107813

ROBERGE F, DI LUCA A, LAPRISE R, LUCAS-PICHER P, THÉRIAULT JM. 2024. Spatial spin-up of precipitation in limited-area convection-permitting simulations over North America using the MRCC6/GEM5.0 model. *Geoscientific model development* 17:1497-1510. DOI: 10.5194/gmd-17-1497-2024

SUNDQVIST H, BERGE E, KRISTJÁNSSON J. 1989. Condensation and cloud parameterization studies with a mesoscale numerical weather prediction model. *Monthly Weather Review* 117. DOI: 10.1175/1520-0493(1989)117<1641:CACPSW>2.0.CO;2

SYLVAIN JD, ANCTIL F, THIFFAULT É. 2021. Using bias correction and ensemble modelling for predictive mapping and related uncertainty: A case study in digital soil mapping. *Geoderma* 403:115153. DOI: 10.1016/j.geoderma.2021.115153

VERSEGHY D, MCFARLANE N, LAZARE M. 1993. CLASS: A Canadian land surface scheme for GCMs, II. Vegetation model and coupled runs. *International Journal of Climatology* 13:347-370. DOI: 10.1002/joc.3370130402

VERSEGHY D. 2000. The Canadian land surface scheme (CLASS): Its history and future. *Atmosphere-Ocean* 38:1–13. DOI: 10.1080/07055900.2000.9649637

Liste des figures

Figure 1. Carte du BEREV et localisation des trois tours à flux	9
Figure 2. Le domaine des simulations MRCC6-GEM5 utilisées dans cette étude. Le domaine de simulation à 12 km est délimité en noir, tandis que celui à 2,5 km est en bleu. Le réseau d'observation des stations est représenté dans la carte de droite par les carrés bleus. Le site NEIGE de la Forêt Montmorency est représenté par l'étoile rouge et la station UQAM-PK est représentée par le cercle jaune. Les stations de sondage situées à l'intérieur de la zone d'étude sont représentées par des triangles. La vallée du Saint-Laurent (VSL), la Côte-Nord et la Gaspésie sont identifiées (adapté de Chalifour et al. 2025). Les bassins versants utilisés pour l'étude du bilan de l'eau.....	14
Figure 3. Domaine de simulation MRCC5.....	18

Figure 4. Séries temporelles de variables météorologiques à la forêt Montmorency (station Juvénile). Les variables présentées (température de l'air T, humidité spécifique de l'air q, pression atmosphérique Pa, précipitation totale P) sont au pas de temps demi-horaire.	19
Figure 5. Séries temporelles des flux d'énergie aux trois sites de mesure. Les flux (chaleur sensible H, chaleur latente LE et rayonnement net Rn) sont agrégés en sommes mensuelles.....	20
Figure 6. Résumé des différences entre un couvert de neige sous les arbres (haut) et dans les ouvertures forestières (bas), résultant de l'analyse effectuée lors de l'hiver 2018-19 (tiré de Bouchard et al. 2022).....	21
Figure 7. Une fonte plus hâtive du couvert de neige est plus lente, car elle survient à un moment où l'énergie disponible est limitée. Cette figure contraste l'évolution de l'équivalent en eau de la neige (SWE) lors de l'hiver chaud et peu de neigeux de 2020-21 à l'hiver plus normal de 2021-22, dans trois environnements forestiers : (a) ouverture forestière de moyenne taille; (b) ouverture de petite taille; (c) sous les arbres (tiré de Bouchard et al. 2024a).	22
Figure 8. Le nouveau module d'interception (c) permettant l'évolution de la neige interceptée (métamorphisme, densification) reproduit plus fidèlement la structure du couvert de neige sous les arbres observés (a) que le module d'interception par défaut (b) (tiré de Bouchard et al. 2024b).....	23
Figure 9. Les approches de fractionnement de la phase de la précipitation développées dans l'étude (colonne de droite, avec un niveau croissant de variables d'entrée du haut vers le bas), arrivent à mieux reproduire les observations que les approches classiques (colonne de gauche), qui elles tendent à surestimer la présence de précipitations mixtes (tiré de Bédard et al. 2025).....	24
Figure 10. Distribution spatiale et intensité (mm) de la recharge mensuelle moyenne pour la période 1965-2020, pour le bassin 7a du BEREV, à la forêt Montmorency (tiré de Antolinez-Quijanoa et al. 2026a).	26
Figure 11. Matrice de corrélation entre les différentes approches de modélisation de la recharge (tiré de Antolinez-Quijano et al. 2026b).....	27
Figure 12. Comparaison des quantités de précipitations simulées et observées aux stations hydrométéorologiques pour les précipitations liquides, solides et mixtes (a, b, e, f), ainsi que la température de l'air à 2 m correspondante à laquelle ces types de précipitations se produisent (c, d, g, h). Les panneaux des première et troisième colonnes (a, e, c, g) représentent la simulation MRCC6-12km, tandis que les panneaux des deuxième et quatrième colonnes (b, f, d, h) représentent la simulation MRCC6-2.5km.	28
Figure 13. Le nombre d'heures de chaque type de précipitations et les biais correspondants en fonction de la température de l'air à 2 m pour (a) les observations, (b-c) MRCC6-12km, et (d-e) MRCC6-2.5km. La ligne verticale noire indique le seuil de 50 % de la température pluie-neige (T50). Chaque distribution est codée en couleur selon le type de précipitations, avec un contour ajouté pour faciliter la comparaison lorsque les distributions se chevauchent.....	28
Figure 14. Nombre cumulé d'heures de précipitations en fonction de la température de l'air à 2 m pour les observations (rouge), MRCC6-12km (bleu), et MRCC6-2.5km (vert), pour (a) les précipitations solides, (c) les précipitations liquides, et (e) les précipitations mixtes. Les biais de simulation correspondants pour MRCC6-12km et MRCC6-2.5km sont présentés pour les précipitations (b) solide, (d) liquide et (f) mixte.	29

Liste des tableaux

Tableau 1. Les six jeux de configurations du MRCC6-GEM5 employés pour étudier le cycle de l'eau atmosphérique.	15
Tableau 2. Moyenne annuelle des cinq sites à l'étude sur la période de 1990 à 2022.....	16
Tableau 3. Valeur moyenne du sable et l'argile (Carsel et Parrish, 1988) avec leurs valeurs de porosité et de conductivité hydraulique.....	17

Liste des abréviations, sigles et acronymes

ABRÉV.	Abréviation
BEREV	Bassin expérimental du ruisseau des Eaux-Volées
CLASS	Canadian land surface scheme
ECOCLIMAP	Base de données mondiale des sols
FM	Forêt Montmorency
KGE	Métrique développée par Kling et Gupta
GMON	Nom courant du capteur CS725 de Campbell Scientific
HGS	Modèle HydroGeoSphere
MEP	Modèles reposant sur le principe de la production maximale d'entropie
MRCC	Modèle Régional Canadien du Climat
SIIGSOL	Base de données locale des sols, pour le QUébec
SVS	Soil, Vegetation, and Snow
SWE	Équivalent en eau de la neige
TDR	Time Domain Reflectometry



Ouranos

Consortium sur les changements climatiques

550, rue Sherbrooke O, Tour Ouest, 19^e étage
Montréal (Québec) H3A 1B9

ouranos.ca

