

Prévision thermique d'ensemble en rivière avec assimilation de données

Sébastien Ouellet-Proulx

Réponses aux commentaires des évaluatrices

Les corrections mineures proposées par les évaluatrices ont été effectuées directement dans la thèse sans être documentées ici. Les commentaires les plus substantiels sont traités dans le présent document.

Réponses aux commentaires de Sophie Duchesne :

- P.95 *Besoin d'une flèche dans l'autre sens pour l'apport de la fonte vers les lacs ?*

La flèche située à l'extrémité gauche de la ligne représente le ruissellement direct qui vient des précipitations liquides et de la fonte. L'ajout d'une flèche additionnelle vient alourdir le schéma inutilement, à mon avis.

- P.101 *Est-ce que des sigma constants ont été considérés ou seulement des sigmas calculés par l'équation 5.21 ? Oui. Dans ce dernier cas, j'écrirais : « Several values of alpha, beta and, consequently, sigma ». OK je vois plus loin qu'une variation linéaire de sigma est considérée pour les débits, mais qu'un sigma fixe est utilisé pour les températures; est-ce que c'est dit explicitement qqart ?*
-

Au paragraphe précédent, il est dit que sigma varie en fonction du débit :

In this study, the conditional probability $p(y_t | X_t^i)$ is considered as a Gaussian function centered on the simulated value y_t with a standard deviation of σ . In the case of discharge assimilation, Salamon and Feyen (2010) suggested error-dependent values of σ in the form of [...]

Pour clarifier le fait qu'un sigma constant est utilisé pour l'assimilation de la température de l'eau, la phrase suivante a été ajoutée :

With regards water temperature assimilation, a constant σ was used.

- p. 141 *Étrange que les unités soient les mêmes pour beta que pour alpha, puisque beta est multiplié par la vitesse du vent.*

En fait, ce sont les unités de la fonction de vent et ce n'est donc pas totalement juste d'inscrire ces mêmes unités en dessous des deux coefficients. J'ai donc retiré les unités du tableau.

- P.143 *Il serait bien de préciser le sens d'écoulement d'un BV à l'autre. (i.e. quelle est la séquence des BV ?)*

Cette phrase a été ajoutée :

The three main subwatersheds (SWM, LSWM and NWM) merge together downstream of the hydrological stations. They can be considered as independent watersheds. However, Catamaran Brook is a tributary of the LSWM.

- P. 145 : *Il me semble qu'il est dit plus haut que seulement 12 des 28 paramètres doivent être calés.*

Il y a 16 paramètres qui ont une base physique mais les 28 ont été calés à l'aide de l'algorithme CMA-ES.

- p. 148 *Pas vraiment un bon indicateur si le biais est important ?*

Effectivement, mais le biais est aussi utilisé comme indicateur de performance dans ce cas-ci. Les valeurs de biais sont d'ailleurs présentées un peu plus loin dans le même paragraphe et apparaissent dans le tableau 5.11.

- p.158 *Pourquoi peu de variation entre les méthodes en ce point ?*

La station de mesure représentée sur le graphe en est une située tout juste en aval d'un ouvrage de rétention. Le débit mesuré ainsi que celui modélisé dépendent majoritairement des opérations au barrage et sont très peu influencés par la méthode d'estimation de l'évapotranspiration. En modélisation, le débit relâché au barrage est tout simplement imposé au modèle comme une condition initiale.

Réponses aux commentaires de Pascale Biron :

- *p. 17 : Il me semble que le rôle de la turbulence en rivière mériterait un peu plus d'attention. La référence utilisée ici (Benner, 1999) est un mémoire de maîtrise. N'y a-t-il pas des articles dans des revues avec évaluation par les pairs qui pourraient être cités ici? C'est le seul endroit dans la thèse où il est question de turbulence, ce qui semble un peu étonnant.*

Il semble y avoir très peu de littérature qui évalue l'influence de la turbulence de l'eau sur l'évaporation. Le mémoire de maîtrise cité dans la thèse est le seul que nous avons trouvé sur le sujet. D'autres articles tels que Guenther et al. (2012) et Maheu et al. (2014) font mention du rôle de la turbulence dans l'évaporation en rivière, mais se réfèrent aussi aux travaux de Benner (1999).

- *p. 22 : Que représentent les lignes noires sur la Figure 3.3B? Et pourquoi y a-t-il des discontinuités dans ces lignes entre les carreaux partiels? Est-ce que la ligne bleue représente le cours d'eau? Cette figure n'est pas entièrement claire.*

Plus d'information a été ajouté à la légende afin de mieux comprendre la figure : Les flèches indiquent le sens de l'écoulement, les lignes noires sont les limites de carreaux partiels et la ligne bleue est la rivière.

- *p. 22 : Est-ce que ce ratio (16 paramètres avec un sens physique, 12 coefficients ajustés en fonction de la minimisation de l'erreur de débit simulé) est conforme à ce que l'on retrouve dans la plupart des modèles hydrologiques couramment employés? Le modèle CEQUEAU est, à ma connaissance, principalement utilisé au Québec, et principalement par les chercheurs de l'INRS-ETE. Ce modèle a-t-il été comparé à d'autres modèles plus fréquemment employés à travers le monde (e.g. SWAT, MIKE-SHE, TOPMODEL)? Il serait utile de brièvement indiquer en quoi ce modèle diffère (ou pas) des autres modèles hydrologiques plus fréquemment cités dans la littérature. Il y a aussi des modèles de prédiction de température en rivière utilisés ailleurs dans le monde (e.g. Van Vliet et al. 2012, modèle VIC-RBM), et il serait utile de savoir comment CEQUEAU s'y compare.*

Dans le cas présent, le modèle utilisé n'était pas un choix puisque le projet a été effectué en collaboration avec Rio Tinto. Ils utilisent le modèle hydrologique CEQUEAU de façon opérationnelle pour faire des prévisions hydrologiques d'apports aux réservoirs. Deux courtes phrases ont tout de même été ajoutées pour indiquer que les modèles distribués et semi-distribués ont toujours plusieurs paramètres à ajuster :

Les modèles distribués ou semi-distribués tel que CEQUEAU sont en général fortement paramétrés (e.g Khakbaz et al., 2012). Cette caractéristique fait en sorte qu'une stratégie de calibration doit être mise en place afin d'estimer les paramètres du modèle.

- *p. 23 : À la p. 22, on indique qu'il y a 16 paramètres avec un sens physique et 12 coefficients ajustés pour minimiser l'erreur de débit simulé. Dans le Tableau 3.2, on trouve 24 paramètres déterminés par optimisation (dont tous ceux liés aux réservoirs sol nappe-marais), 10 paramètres déterminés selon la physique du phénomène, et 8 constantes déterminées à l'aide des caractéristiques hydrologiques et physiographiques. Est-ce normal que ces chiffres ne correspondent pas? Et quel peut être l'impact de n'utiliser que des paramètres d'optimisation pour les réservoirs sol-nappe-marais?*

Le tableau 3.2 a été modifié pour retirer l'indication sur le type de paramètre. La confusion entre le texte et le tableau vient du fait que certains paramètres, comme les paramètres SOL, NAPPE et MARAIS représentent un processus physique, mais sont, dans la plupart des cas, tout de même déterminés par optimisation.

- *p. 23 : (Tableau 3.2) La variable PANAP est décrit comme « un paramètre permettant d'ajuster la température de l'écoulement souterrain arrivant en rivière. Lorsque PANAP = 0,0, cette température vaut TNAP [température moyenne des eaux souterraines sur le bassin]; lorsque PANAP = 1,0, cette température vaut la température de l'air si positive. PANAP peut être fixé entre 0,0 et 1,0 et son influence est linéaire entre ces deux limites». Dans quel contexte est-ce que la température de l'eau souterraine devrait être égale à la température de l'air?*

Ce paramètre du modèle permet de faire varier la température de l'eau souterraine en fonction de la température de l'air. Ce paramètre, bien que décrit de la sorte dans le manuel original du modèle CEQUEAU, ne représente pas de processus physique proprement dit.

- *p. 27 : On indique ici que les deux bassins versants (Nechako et Miramichi) sont décrits en détail à la section 3.5.1, mais ce n'est pas le cas. Il serait important dans cette section de fournir l'information minimale sur ces bassins, en particulier leur superficie et débit moyen, ainsi que leur contexte (utilisation du sol, altitude, etc.).*

Il y a eu une erreur dans la notation. La description à laquelle on fait référence est plutôt située à la section 5.2.1.5. Le tableau 3.3. ainsi qu'une description a tout de même été ajoutés à cette section :

Tableau 3.1 Caractéristiques physiques des deux bassins versants analysés dans la thèse. Les débits sont ceux mesurés à Vanderhoof (Nechako) et Southwest Miramichi à Blackville (Miramichi) par le relevé hydrologique du Canada. Les données climatiques proviennent des stations météorologiques de Ootsa Lake (Nechako) et Miramichi A (Miramichi) d'Environnement Canada.

Caractéristique	Nechako	Miramichi
Taille du bassin versant (km ²)	47000	13000
Altitude moyenne (m)	950	210
Température de l'air annuelle moyenne (°C)	3.2	4.9
Précipitations annuelle (mm)	417	1072
Type d'écoulement	Régulé	Non-régulé
Débit moyen (m ³ /s)	121	120
Débit minimal (m ³ /s)	30	11
Débit maximal (m ³ /s)	786	2190
Pourcentage de forêt (%)	85	75

Le texte suivant a aussi été ajouté :

Le bassin de la rivière Nechako couvre une superficie de 47000 km² alors que celui de la Miramichi s'étend sur une superficie de 13000 km². Les deux bassins sont majoritairement forestiers avec un pourcentage de respectivement 85 % et 75 % de couvert forestier pour Nechako et Miramichi. Ils diffèrent par leur altitude moyenne alors que la rivière Nechako coule à travers le plateau britanno-colombien à une altitude moyenne de 950 m et la rivière Miramichi coule dans les plaines côtières de l'Atlantique à 210 m d'altitude en moyenne. Les principales caractéristiques physiques des bassins versants sont résumées dans le Tableau 3.3.

- *p. 28 : (Tableau 3.3) Il est difficile d'estimer l'ampleur du biais de débit sans connaître le débit utilisé pour la calibration et la validation pour chaque cours d'eau. Comment le biais relatif a été obtenu? Est-ce en divisant le biais par le débit moyen? Pour NECH, si on utilise les valeurs de biais absolus et relatifs, on obtient un débit qui tourne autour de 80 m³/s pour la calibration et la validation, mais pour MIR, on obtient des débits très différents pour la calibration et la validation (autour de 300 m³/s pour la calibration et 143 m³/s pour la validation).*

Le biais relatif a été obtenu en divisant la somme des différences absolues entre la somme des débits observés et celle les débits simulés, par la somme des débits observés. Une erreur s'est effectivement glissée dans le tableau de résultats pour ce qui est des biais relatifs. Les valeurs absolues sont les bonnes alors que les valeurs relatives sont plutôt celles calculées pendant la période estivale seulement. Sur le bassin de la Miramichi, les débits moyens sont

respectivement de $110 \text{ m}^3/\text{s}$ et de $139 \text{ m}^3/\text{s}$ en calibration et en validation. Les biais relatifs sont donc de 0.03 ($-3.03 \text{ m}^3/\text{s}$) et de 0.13 ($18.6 \text{ m}^3/\text{s}$). Dans le cas de la Nechako, les débits moyens sont respectivement de $111 \text{ m}^3/\text{s}$ et de $129 \text{ m}^3/\text{s}$ en calibration et en validation ce qui donne des valeurs de biais relatifs de 0.08 pour les deux périodes. La valeur erronée a été remplacée dans la thèse et les valeurs de débits moyens ont été ajoutées au texte pour éviter la confusion.

- *p. 28 : D'après la Figure 2.1, le CRPS (Continuous Ranked Probability Score) est une probabilité comprise entre 0 et 1. Il serait bon d'expliquer comment un score de probabilité peut avoir des unités, et pourquoi il n'est pas compris entre 0 et 1.*

Le texte qui accompagne la Figure 2.1. indique que le CRPS est obtenu par le calcul de la distance entre la fonction de répartition de l'observation et celle de la prévision. Il s'agit du calcul d'une aire sous la courbe qui s'exprime dans l'unité de l'observation. Elle n'est donc pas comprise entre 0 et 1.

- *p. 29 : Où dans le Tableau 3.4 voit-on que « très peu d'incertitude ($< 1 \text{ m}^3/\text{s} [\text{hz}1]$; $6 \text{ m}^3/\text{s} [\text{hz}5]$) est transmise de la prévision météorologique à la prévision du débit dans le système régulé (Nechako) »?*

Dans cette phrase, je réfère à la figure 5.4. pour démontrer la faible incertitude transmise au débit.

p. 29 : Le débit moyen estival des deux bassins aurait dû être fourni plus tôt. Avec une valeur de $214 \text{ m}^3/\text{s}$ pour la rivière Nechako, je ne comprends pas comment les biais relatifs au Tableau 3.3 ont été calculés car, comme indiqué ci-haut, ils devraient s'approcher de $80 \text{ m}^3/\text{s}$. Pour la Miramichi, si on divise le biais en validation ($18.6 \text{ m}^3/\text{s}$) par le débit estival indiqué ici ($89 \text{ m}^3/\text{s}$), on obtient un biais relatif de 0.21 au lieu de 0.13. Quel est l'impact global d'une valeur de CRPS élevée pour les prévisions de débit sur la rivière Miramichi?

Les débits moyens sont indiqués ici pour la période de prévision (juin à septembre de 2009 à 2014) pour mieux comprendre la valeur de CRPS obtenue en résultat. On ne peut donc pas comparer les valeurs de biais des périodes de calibration et de validation aux débits mentionnés ici. Tel que mentionné plus haut, des valeurs erronées de biais relatifs s'étaient glissées dans la thèse. Ces valeurs ont été corrigées.

- *p. 30 : (Figure 3.5) Comment expliquer que les diagrammes de fiabilité soient si semblables pour les deux rivières alors que l'incertitude de la prévision hydrologique est nettement plus élevée sur la Miramichi?*

Les diagrammes de fiabilité apparaissent effectivement semblables pour les deux bassins versant. Dans le cas présent, il est difficile de spéculer quant à ce qui cause cette similarité. Selon moi, l'hypothèse la plus plausible est qu'on observe une performance plus faible du modèle sur la Miramichi, comparativement à celle de la Nechako qui tend à réduire la fiabilité. Cette performance plus faible est toutefois compensée par une plus grande dispersion de l'ensemble, et ce particulièrement pour les horizons plus grands, ce qui fait augmenter la fiabilité.

- *p. 34 : (Tableau 3.6) Ce n'est pas entièrement évident de comprendre comment comparer les valeurs de MAE et de CRPS.*

Puisque le CRPS est l'équivalent du MAE pour un ensemble, on peut comparer directement les deux valeurs. Il s'agit d'une pratique courante dans le domaine de la prévision d'ensemble. La Figure 2.1. démontre l'équivalence des deux statistiques.

- *p. 35 : (bas de page) Pourquoi alors avoir choisi de mener cette analyse sur un bassin régulé? Comment peut-on généraliser les résultats? p. 61 : Le choix d'un bassin régulé aurait pu être justifié plus en détail.*

Le projet du doctorat a été effectué en partenariat avec Rio Tinto qui opère un barrage sur la rivière Nechako. Le choix du bassin versant n'était donc pas optionnel. C'est pour cette raison que la section principale de la thèse, soit l'assimilation de données de débits et de températures de l'eau a été effectuée uniquement sur ce bassin versant. Le fait de travailler sur un bassin régulé limite effectivement la généralisation des résultats. Il n'empêche toutefois que la méthodologie proposée peut être valable pour des bassins versants non régulés.

- *p. 67 : (Tableau 5.1) Le calcul de biais relatif ne me semble toujours pas clair compte tenu que le débit des deux rivières est assez différent (voir les commentaires ci-haut).*

Les modifications effectuées dans la synthèse ont aussi été apportées ici.

- *p. 71 (Figure 5.4) Il me semble qu'il est peu fait mention des prévisions de débit quand même assez éloignées des mesures sur la Miramichi pour une période de 5 jours (Figure 5.4D). Est-ce que l'on sait ce qui pourrait causer ces écarts importants?*

Bien que le graphique démontre que certains membres de l'ensemble prévoient des valeurs très élevées de débits, le CRPS, qui mesure la distance entre tous les membres de l'ensemble et l'observation, donne une valeur qui n'est pas excessivement grande ($35 \text{ m}^3/\text{s}$). Les membres qui sont aux extrêmes de l'ensemble peuvent biaiser la perception de la prévision lorsqu'elle est représentée sous forme de série chronologique. Par ailleurs, l'article se voulait davantage dirigé vers la prévision thermique. C'est pour ces raisons et pour assurer la concision du texte que le débit a été discuté moins longuement.

- *p. 75 (Figure 5.8) : Cette figure illustre assez bien le problème de n'avoir qu'un seul bassin dans chaque catégorie (régulé, non régulé). Peut-on généraliser que les prévisions de débit du modèle CEQUEAU seraient toujours nettement meilleures sur un bassin régulé ou est-ce spécifique à ce bassin?*

On ne peut pas généraliser et déclarer que le débit sera mieux simulé par CEQUEAU sur un bassin régulé, mais on peut reconnaître que le fait d'imposer un débit à point précis de la grille de calcul va réduire l'incertitude de la simulation. Dans le cas de la Nechako, la majeure partie du débit mesuré aux stations hydrométriques provient du barrage de Skins Lake. Il est donc honnête de croire que peu d'incertitude provient de la simulation hydrologique. On peut donc croire que dans un contexte similaire (forte régulation des débits) on pourrait s'attendre à des résultats similaires.

- *p. 110 (Figure 5.18) : Pourquoi est-ce que les observations ne sont pas les mêmes dans les deux cas (1 day ahead et 5 day ahead)?*

Cette différence est due au fait que la période de prévision n'est pas exactement la même. Dans le cas de la prévision de 5 jours, les observations sont décalées de 4 jours par rapport à la prévision d'un 1 jour.

- *p. 120 : Peut-on déterminer jusqu'à quel point les conclusions sur l'importance des conditions thermiques initiales sont spécifiques au bassin analysé? En serait-il de même dans un bassin non régulé?*

Les résultats ainsi que la littérature en prévision hydrologique (e.g. Thibault et al., 2016) portent à croire que l'on pourrait retrouver la même dynamique dans un bassin non-régulé, soit une forte influence des conditions initiales sur la prévisions à court terme. Toutefois, il demeure impossible de prédire l'importance relative des conditions initiales hydrologiques par rapport aux conditions initiales thermiques dans le cadre d'une prévision sur un bassin non-régulé. Afin de clarifier que la transférabilité à d'autres systèmes hydrologiques n'est pas possible, la passage suivant a été ajouté à la discussion :

The study was performed in a single strongly regulated river system. Therefore, its transferability to other hydrological contexts is limited. Additional work on other regulated as well as unregulated river systems would help broaden the scope on the present study.

- *p. 129 : Compte tenu que le modèle CEQUEAU est moins connu que d'autres modèles hydrologiques, il me semble que ce serait pertinent de citer quelques références de son utilisation et de la qualité de ses prédictions.*

Cette phrase a été ajoutée pour indiquer que le modèle CEQUEAU avait été utilisé avec succès dans le passé :

The model was successfully used to simulate discharge and water temperature in previous studies (e.g. St-Hilaire et al., 2000; Kwak et al., 2017; Larabi et al., 2018).

- *p. 131 : Est-ce que l'approche utilisée dans CEQUEAU d'utiliser un ratio fixe d'évaporation (80%) comparé à l'évapotranspiration potentielle est une approche communément employée dans d'autres modèles hydrologiques?*

À ma connaissance, cette approche n'est pas communément utilisée dans les modèles hydrologiques. Selon mes recherches, aucun autre modèle n'estime l'évaporation de cette façon. Parmi les autres modèles consultés, certains utilisent la même formulation pour estimer l'évapotranspiration et l'évaporation en eau libre (e.g. HBV, GR4J, SWAT, TOPMODEL) alors que d'autre, qui simulent aussi la température de l'eau, utilisent l'équation de Harbeck (1962) pour estimer le flux de chaleur latente (e.g. DHVSM-RBM, HEC-RAS, Heat source).

- *p. 132 : "The water temperature model has 12 parameters. Those parameters adjust channel geometry, the importance of each energy fluxes and the timing of freezing/thawing." Je ne suis pas certaine de comprendre comment la température de l'eau peut ajuster la géométrie du chenal.*

Il s'agit de paramètres qui permettent d'ajuster le rapport entre la profondeur et la largeur du cours d'eau. Ce rapport est estimé par le modèle, on peut les modifier par le biais de paramètres. Il en résulte une modification de la surface d'échange thermique entre l'eau et l'air qui va influencer la simulation de la température de l'eau.

- *p. 165 : Est-ce que la plus grande sensibilité de la rivière Miramichi à certaines variables est due au fait qu'elle soit non régulée ou est-ce plutôt liée à des caractéristiques de bassin? Encore ici, le fait de n'avoir qu'un cas dans des catégories très différentes (régulée versus non régulée) complique l'interprétation des résultats.*

L'ajout de bassins versants de chaque types (régulés et non régulés) permettrait effectivement de mieux comprendre les distinctions entre dans la simulation des processus hydrologiques sur chacun de ces types de cours d'eau. Dans le contexte de l'étude, il n'est toutefois pas possible d'ajouter des bassins versants.

Cependant, tout comme à l'objectif un, il est possible de s'attendre à ce que la modélisation des différents processus hydrologiques, incluant l'évapotranspiration, affectera davantage la simulation du débit sur un bassin versant non régulé comparativement à un bassin régulé. Cela viendrait expliquer du même coup la plus grande sensibilité observée à la station Nautley, sur le bassin de la rivière Nechako, qui n'est pas influencée par le barrage de Skins Lake.

Réponses aux commentaires de Florentina Moatar

- *Sur la forme, la synthèse ne correspond pas à une progression logique de la recherche, car elle suit l'ordre des articles publiés ou soumis. Il me semble que les deux articles sur l'analyse de l'incertitude dans la prévision à court terme de la température sont les plus originaux. Il n'empêche que la synthèse aurait pu suivre un ordre plus logique en présentant d'abord le travail sur la structure, les formulations des processus du modèle CEQEAU (y compris celles testées dans la thèse), et ensuite l'analyse de la propagation de l'incertitude en prévision.*

Au moment de la soutenance, Mme Moatar a indiqué qu'elle comprenait mieux la progression de la thèse et donc qu'elle ne souhaitait plus que la structure soit modifiée. La structure originale de la thèse a donc été conservée.

- *La présentation des indicateurs de performance pour la prévision aurait pu être présentée de façon plus didactique, en explicitant mieux les concepts sur des résultats de la thèse, afin qu'un lecteur peu averti dans le domaine puisse mieux comprendre et analyser les résultats obtenus.*

La description des scores a été bonifiée tout en conservant une certaine concision. Puisque cette section de la thèse se veut une synthèse des travaux de recherche, et qu'une littérature exhaustive sur les scores utilisés en prévision existe, nous avons décidé de limiter la description des scores et plutôt suggéré des références au lecteur pour approfondir sa connaissance.

Le texte suivant apparaît dans la thèse :

Bien qu'une description exhaustive de ces scores dépasse le cadre de cette thèse, les plus couramment utilisés sont brièvement décrits ici. Le CRPS (continuous ranked probability score) a été utilisé pour évaluer la justesse de la prévision, c'est-à-dire la distance entre la prévision et l'observation. Le diagramme de fiabilité a été utilisé pour évaluer la fiabilité de la prévision, c'est-à-dire la qualité de la dispersion de l'ensemble prévisionnel autour de l'observation. La statistique la plus répandue pour évaluer l'exactitude d'une prévision d'ensemble est le CRPS. Il représente la distance entre la fonction de répartition de la prévision (Figure 2.1 – ligne bleue) et celle de l'observation (Figure 2.1 – ligne noire). L'aire de la partie illustrée en gris sur la Figure 2.1 correspond donc à la valeur du CRPS de la prévision. Sa popularité tient notamment du fait qu'il est l'analogie probabiliste de l'erreur moyenne absolue (MAE) d'une prévision déterministe (p. ex. Boucher et al., 2011; Figure 2.1) et qu'il s'exprime dans l'unité de la variable d'intérêt. Il s'agit d'un score global et juste, qui tient compte de l'ensemble de la distribution (Gneiting et Raftery, 2007). Un score est dit « juste », ou « proper » en anglais, lorsqu'on peut démontrer mathématiquement que la seule façon pour un prévisionniste d'optimiser son score est d'émettre une prévision qui correspond vraiment à ce qu'il croit. La distribution de cette prévision se doit d'en maximiser la précision et représenter son incertitude réelle, donc d'être centrée sur l'observation (Gneiting & Raftery, 2007). Par exemple, une telle démonstration pour le score de Brier (Brier, 1950) est disponible dans Wilks (2010). Lorsqu'un score n'est pas juste, par exemple le score linéaire (Wilson et al., 1999), il existe une façon de le « déjouer ». Dans un tel cas, le risque existe qu'une prévision calibrée à partir de ce score ne soit pas la plus performante. Le prévisionniste a alors avantage à faire fi de ce qu'il croit être la vérité et émettre systématiquement certains types de prévisions.

L'une des caractéristiques importantes d'une prévision d'ensemble est sa fiabilité. Elle informe l'utilisateur quant à la qualité de la dispersion de l'ensemble ainsi que, comme son nom l'indique, sa fiabilité. La fiabilité peut être décrite comme la cohérence statistique entre les propriétés d'une prévision probabiliste et des observations correspondantes (Bröcker et Smith, 2007; Hersbach, 2000b). Le diagramme de fiabilité (Figure 2.2) est l'outil le plus communément utilisé pour représenter cette caractéristique (p. ex. Bröcker et Smith, 2007; Franz et al., 2003; Thiboult et al., 2016; Velázquez et al., 2011). Il met en relation la fréquence relative d'occurrence d'un événement et la fréquence relative de sa prévision. Son fonctionnement se résume par le calcul d'intervalles de confiance pour divers niveaux de confiance (souvent par incrément de 10 %). On calcule ensuite dans quelle proportion l'observation est comprise à l'intérieur de l'intervalle de confiance. Une prévision est considérée comme étant sur-confiante (et sous dispersée) lorsque la probabilité prévue est supérieure à la probabilité observée. Dans le cas contraire, lorsque la probabilité prévue est inférieure à la probabilité observée, on considère la prévision comme étant sous-confiante (et sur dispersée).

- Ainsi, une meilleure description du modèle aurait été intéressante (par exemple montrer sur la figure 3.2 les paramètres du modèle et mettre le tableau 3.2 en annexe).

L'idée de mettre les paramètres du modèle sur le schéma de la Figure 3.2 a été considérée lors de la rédaction. Toutefois, nous avons jugé que la figure devenait trop chargée et donc difficile à lire. Nous avons décidé de conserver le Tableau 3.2 et la Figure 3.2 tel qu'elles l'étaient au moment du dépôt pour évaluation.

- *Il n'est pas clair par exemple de savoir si la température de l'eau simulée est une moyenne journalière ou une valeur horaire qui permet l'extraction des valeurs maximales et minimales journalières qui seront ensuite comparées aux valeurs seuils à ne pas dépasser.*

Ces phrases ont été ajoutées pour clarifier ce point :

Dans le cadre de la thèse, l'ensemble des simulations et des prévisions qui ont été réalisées, l'ont été fait à un pas de temps journalier. Les débits et les températures de l'eau sont donc des moyennes journalières.

- *La taille des bassins versants manque; quelques données physiographiques, climatiques et hydrologiques auraient pu permettre de mieux comprendre les résultats sans forcément chercher les informations dans les articles. Des données sur la régulation des débits dans le bassin de Neshako auraient pu être fournies dans la synthèse, ainsi qu'un argumentaire sur la raison pour laquelle l'assimilation de données de température et de débit pour la prévision thermique a été réalisée sur ce bassin.*

Le tableau suivant a été ajouté afin de mieux décrire les bassins versants dans la synthèse :

Tableau 3.2 Caractéristiques physiques des deux bassins versants analysés dans la thèse. Les débits sont ceux mesurés à Vanderhoof (Nechako) et Southwest Miramichi à Blackville (Miramichi) par le relevé hydrologique du Canada. Les données climatiques proviennent des stations météorologiques de Ootsa Lake (Nechako) et Miramichi A (Miramichi) d'Environnement Canada.

Caractéristique	Nechako	Miramichi
Taille du bassin versant (km ²)	47000	13000
Altitude moyenne (m)	950	210
Température de l'air annuelle moyenne (°C)	3.2	4.9
Précipitations annuelle (mm)	417	1072
Type d'écoulement	Régulé	Non-régulé
Débit moyen (m ³ /s)	121	120
Débit minimal (m ³ /s)	30	11
Débit maximal (m ³ /s)	786	2190

Pourcentage de forêt (%)

85

75

Le texte suivant a aussi été ajouté :

Le bassin de la rivière Nechako couvre une superficie de 47000 km² alors que celui de la Miramichi s'étend sur une superficie de 13000 km². Les deux bassins sont majoritairement forestiers avec un pourcentage de respectivement 85 % et 75 % de couvert forestier pour Nechako et Miramichi. Ils diffèrent par leur altitude moyenne alors que la rivière Nechako coule à travers le plateau britanno-colombien à une altitude moyenne de 950 m et la rivière Miramichi coule dans les plaines côtières de l'Atlantique à 210 m d'altitude en moyenne. Les principales caractéristiques physiques des bassins versants sont résumées dans le Tableau 3.3.

Références

- Benner, D.A., 1999. Evaporative Heat Loss of the Upper Middle Fork of the John Day River, Northeastern Oregon. Oregon State University.
- Guenther, S.M., Moore, R.D., Gomi, T., 2012. Riparian microclimate and evaporation from a coastal headwater stream, and their response to partial-retention forest harvesting. *Agric. For. Meteorol.* 164, 1–9. doi:10.1016/j.agrformet.2012.05.003
- Harbeck, G.E., 1962. A practical field technique for measuring reservoir evaporation utilizing mass-transfer theory. *United States Geol. Surv. Prof. Pap.* 272–E, 101–105.
- Maheu, A., Caissie, D., St-Hilaire, A., El-Jabi, N., 2014. River evaporation and corresponding heat fluxes in forested catchments. *Hydrol. Process.* 28, 5725–5738. doi:10.1002/hyp.10071
- Salamon, P., Feyen, L., 2010. Disentangling uncertainties in distributed hydrological modeling using multiplicative error models and sequential data assimilation. *Water Resour. Res.* 46. doi:10.1029/2009WR009022
- Thibault, A., Anctil, F., Boucher, M.A., 2016. Accounting for three sources of uncertainty in ensemble hydrological forecasting. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 20, 1809–1825. doi:10.5194/hess-20-1809-2016