

Capsule no. 22, novembre 2016

Nos rivières en surchauffe, comment prévoir l'avenir? ^a

par Sébastien Ouellet-Proulx ^b

La température de l'eau et les organismes aquatiques

La ressource en eau est un élément central du débat sur l'environnement au Canada. La question de la gestion de l'eau met de l'avant des thèmes récurrents comme les inondations printanières, la contamination des sources d'eau potable ou la qualité de l'eau des lacs et des rivières. Une des variables fondamentales, quoique méconnue du public, de la qualité d'un écosystème aquatique est la température de l'eau. La température influence l'ensemble des paramètres physicochimiques des cours d'eau, ainsi que la croissance et la distribution des organismes aquatiques. Au Canada, plusieurs études sur la température de l'eau des rivières touchent de près ou de loin aux salmonidés, dont le saumon atlantique et les espèces de saumon du Pacifique, en raison de leur sensibilité aux températures élevées et de leur grande valeur socioéconomique.

La grande majorité des poissons sont ectothermes, c'est-à-dire que leur température corporelle dépend de celle de leur environnement. La condition physique de ces espèces se dégrade lorsque la température de l'eau excède les limites de leur enveloppe de tolérance thermique. Dans ce cas, leur énergie disponible est entièrement dirigée vers le maintien de leurs fonctions vitales (figure 1). La capacité aérobie qui se trouve

au-dessus de ce seuil constitue l'énergie disponible pour les autres fonctions comme la nage, la croissance et l'alimentation. Si la capacité aérobie descend sous ce seuil, une détérioration de la capacité de nage, une perte de poids, un risque accru de maladie, ou même, dans des conditions extrêmes, la mortalité, peuvent survenir. De plus, certains stressseurs secondaires tels que la pêche avec remise à l'eau, la perte d'habitats ou la présence de certains pathogènes peuvent réduire la capacité aérobie des poissons et les rendre plus vulnérables aux hausses de température (figure 1). Est-il possible d'atténuer ces effets?

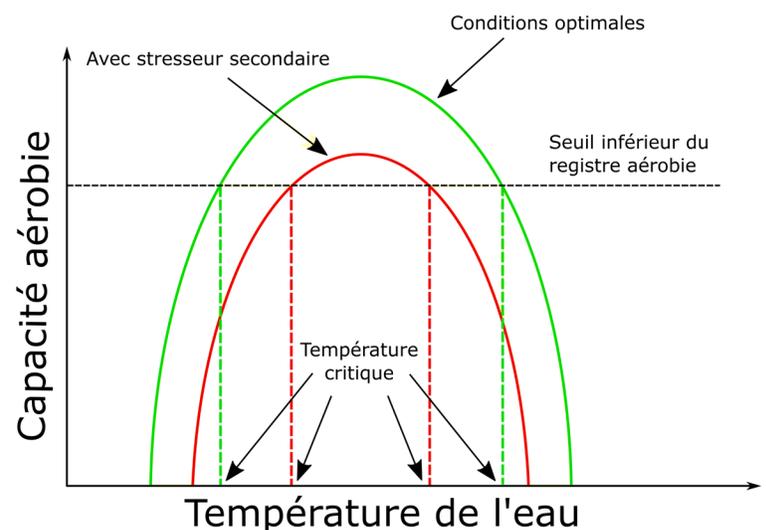


Figure 1: Capacité aérobie en fonction de la température de l'eau avec (rouge) et sans (vert) stressseurs secondaires (adapté de Cooke et coll., 2012).

^a Cette capsule est disponible en ligne à l'adresse suivante : www.ete.inrs.ca/ete/publications#CapsulesINRSciences

^b Étudiant au doctorat au Centre Eau Terre Environnement de l'INRS sous la direction du professeur André St-Hilaire.

Contact : sebastien.ouellet-proulx@ete.inrs.ca

La prévision thermique fait partie de la réponse. Toutefois, pour bien répondre à cette question, il faut d'abord comprendre la dynamique hydrologique et thermique d'une rivière.

La thermie des rivières

La température de l'eau d'une rivière est dictée par la quantité d'énergie qui y est emmagasinée. Celle-ci est influencée par des facteurs externes qui gouvernent la quantité d'énergie échangée entre la rivière et son environnement et de ses structures internes qui modulent la façon dont ces échanges surviennent. La figure 2 schématise les principaux échanges thermiques d'une rivière. Les conditions météorologiques dictent la quantité d'énergie et d'eau de ruissellement reçue par la rivière. Le rayonnement solaire constitue la majeure partie (plus de 70 %) des apports en énergie. Les 30 % restant sont partagés entre la radiation réémise par l'atmosphère et les apports convectifs (déplacements d'air chaud au-dessus

de la rivière). Ces deux derniers types d'échanges peuvent aussi constituer une perte d'énergie sous certaines conditions, notamment lorsque la température de l'eau excède celle de l'air. Les pertes d'énergie estivales sont toutefois dominées par les échanges associés à l'évaporation. Pour ce qui est du ruissellement occasionné par les précipitations, il vient bien sûr augmenter le volume d'eau qui transite par le chenal de la rivière. La capacité thermique d'une rivière, c'est-à-dire l'énergie nécessaire pour augmenter sa température, est proportionnelle à son volume. Une rivière à faible volume d'eau réagira naturellement davantage aux échanges d'énergie qu'une rivière à plus grand volume. Donc, dans des conditions propices à une hausse des températures de l'eau, une rivière à faible débit se réchauffe plus rapidement qu'une rivière à débit élevé.

La thermie en rivière est un processus complexe influencé non seulement par les conditions météorologiques, mais aussi par les caractéristiques du bassin versant qui modifient la manière

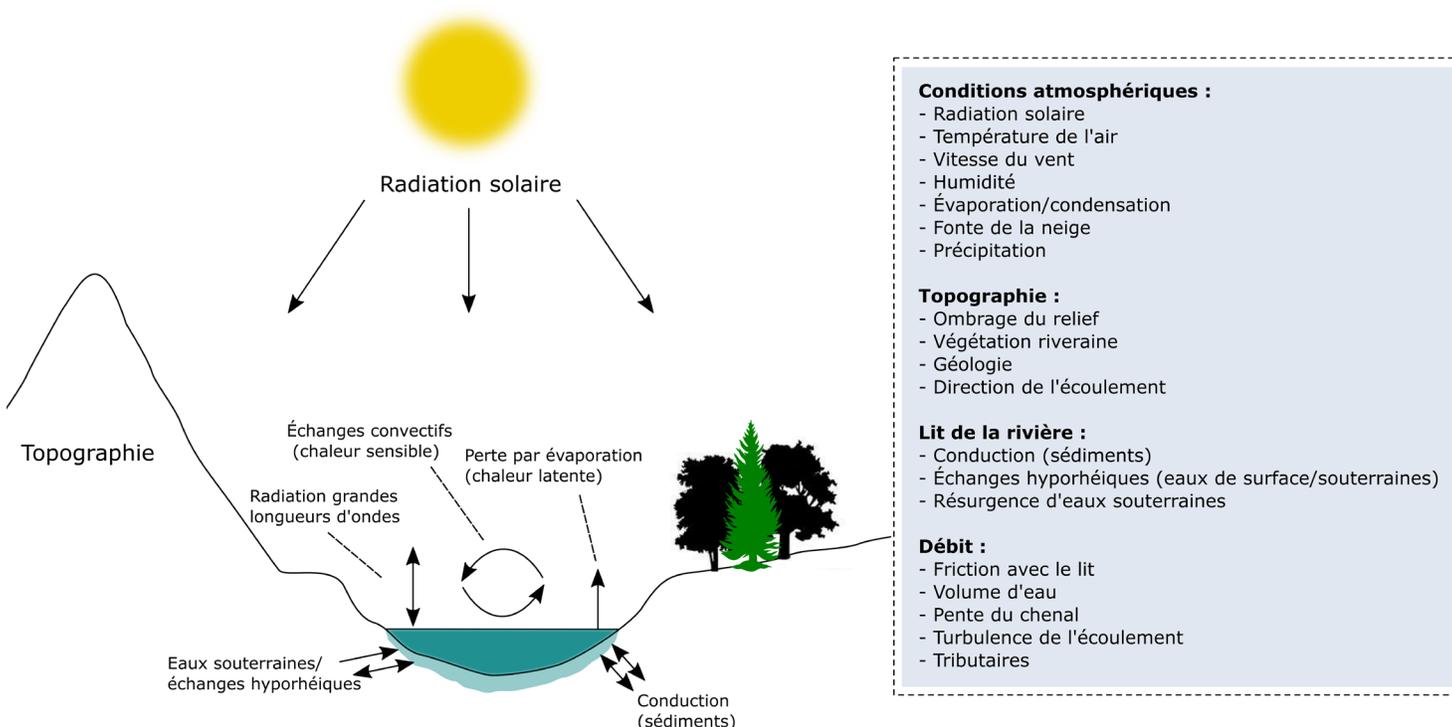


Figure 2 : Schéma simplifié des échanges thermiques d'une rivière (adapté de Caissie, 2006).

dont les échanges se produisent. Certaines caractéristiques sont constantes dans le temps (ex. topographie) alors que d'autres peuvent changer de façon naturelle (ex. morphologie de la rivière) ou par l'activité humaine (ex. développement urbain).

On peut citer en exemple, la mise en place d'un barrage sur une rivière comme étant une perturbation anthropique d'importance. Au Canada, ces ouvrages sont très nombreux et occasionnent inévitablement une modification de l'hydrologie de la rivière et, dans bien des cas, de son régime thermique. L'ampleur de cette perturbation dépend de plusieurs paramètres dont le type d'ouvrage, sa taille et son mode de gestion. L'une des conséquences potentielles est la diminution du débit de la rivière en aval du barrage. Dans ce cas, un volume d'eau réduit est soumis à la même quantité d'énergie, ce qui peut entraîner une augmentation de la température de l'eau. Cependant, la relation entre le volume d'eau relâché d'un barrage et la température de l'eau en aval de celui-ci n'est pas aussi simple que cela. En raison de cette dynamique complexe, le recours à des outils de modélisation est nécessaire afin d'assurer une gestion optimale des ouvrages tout en garantissant la qualité du milieu aquatique.

Choix du modèle prévisionnel

Il existe plusieurs méthodes et outils de modélisation pour simuler la température en rivière. Le défi réside donc dans le choix d'une technique adaptée à la problématique ciblée. Les modèles thermiques se divisent en deux grandes catégories, les modèles statistiques et déterministes (ou à base physique). Les premiers se fondent sur l'établissement d'une relation empirique entre une variable atmosphérique, souvent la température de l'air, et la température de l'eau. Ils reposent donc sur le lien entre les séries chronologiques passées des deux variables. Ils sont souvent plus

simples à mettre en place que les modèles déterministes, mais ne représentent pas explicitement les processus physiques. Ils peuvent donc difficilement être utilisés pour simuler un changement dans un système hydrologique, comme la mise en place d'un barrage.

Les modèles déterministes, quant à eux, reproduisent les processus thermiques par le calcul des échanges d'énergie d'une rivière avec un niveau de simplification qui varie selon le modèle. Leur principal inconvénient est qu'une grande quantité de données est nécessaire à leur utilisation. Les rivières sont des systèmes hiérarchiques qui dépendent des conditions en amont. Cette hiérarchie provoque un décalage spatial et temporel des événements hydrologiques qui surviennent en tête de bassin versant, par rapport à leur arrivée à l'exutoire. Pour obtenir une modélisation thermique pour un tronçon de rivière ou tout un bassin versant, une modélisation hydrologique doit être effectuée préalablement pour connaître le volume d'eau soumis aux échanges d'énergie. C'est pour cette raison que les modèles déterministes thermiques couplés à des modèles hydrologiques sont souvent préférés aux modèles statistiques pour les études où les considérations spatiales sont importantes. Quel que soit le modèle choisi, c'est grâce à celui-ci que l'on peut prévoir le futur et émettre une prévision thermique.

Se projeter dans l'avenir

Plusieurs de nos décisions courantes sont prises en fonction de notre appréhension du futur. Elles se basent sur notre confiance en la réalisation d'un événement pour lequel on possède certains indices, mais aucune certitude. Par exemple, selon notre niveau de confiance envers la prévision météo consultée le matin, on choisira de prendre ou non un parapluie pour la journée. Le résultat dans ce cas n'a de conséquence que sur notre niveau de confort. Par contre, pour ce même

évènement de pluie, le choix peut osciller entre l'évacuation ou non d'un quartier résidentiel en raison d'inondations potentielles.

Tout comme la prévision météorologique, la prévision thermique est un outil indispensable à la gestion. Elle permet l'anticipation de situations problématiques potentielles pour l'écologie d'une rivière. Le mandat premier de la prévision de la température de l'eau est d'informer les gestionnaires afin de faciliter une prise de décisions rapide pour atténuer les effets de températures élevées. Cela peut se traduire par la fermeture de la pêche sportive dans un secteur à risque de réchauffement excessif, ou encore par la relâche d'eau d'un barrage pour limiter le réchauffement d'une section en aval. Continuons avec le second cas de figure.

La prise de décisions quant à la gestion d'un ouvrage à relâche sélective doit tenir compte du cheminement de l'eau dans le bassin versant, des conditions du bassin avant la relâche et des conditions météorologiques anticipées. Une relâche insuffisante combinée à une forte radiation solaire pourrait causer des hausses de températures de l'eau dommageables pour l'écosystème. Dans le cas contraire, une relâche trop importante suivie de fortes pluies pourrait entraîner des débordements incommodants pour la population locale ou simplement une perte de revenus pour l'opérateur du barrage. Pour garantir la prise en compte de ces contraintes, la prévision doit être émise pour un horizon temporel qui permet d'agir. Par exemple, si l'eau déversée d'un barrage prend cinq jours pour cheminer vers une frayère de saumons atlantiques sensibles au réchauffement qui est située en aval, la décision de relâcher ou non davantage d'eau doit être prise cinq jours avant l'évènement potentiel. Elle doit donc tenir compte des conditions atmosphériques prévues pour ces cinq jours, de la réaction hydrologique du système et des conditions thermiques qui en découlent. La prévision

de la température de l'eau se trouve donc à la fin d'une cascade prévisionnelle.

Comme on peut l'observer à la figure 3, la prévision de la température s'effectue en plusieurs étapes. On doit d'abord reproduire le plus justement possible les conditions hydrologiques du bassin versant au moment de la prévision. Cela se fait par une période de « chauffe » du modèle où l'on simule le débit de la rivière à partir d'observations météorologiques passées. À cette étape, on utilise des méthodes d'assimilation de données pour corriger certaines erreurs de simulation et mieux reproduire les états hydrologiques réels en fonction des observations. Par la suite, on fournit conjointement les conditions hydrologiques obtenues et les prévisions météorologiques au modèle hydrologique pour produire une prévision hydrologique. Cette prévision est ensuite transmise au modèle thermique grâce auquel les échanges d'énergie sont estimés. Comme pour la prévision hydrologique, les conditions initiales, thermiques dans ce cas-ci, doivent être créées et corrigées. Elles sont subséquemment fournies au modèle thermique de concert avec les prévisions météorologique et hydrologique pour produire la prévision thermique. Ces étapes sont répétées chaque fois qu'une prévision est émise.

Le processus prévisionnel décrit ici est une cascade de prévisions interreliées. Toute erreur ou incertitude générée à l'une ou l'autre des étapes se propage aux étapes subséquentes. La prévision thermique, en fin de séquence, reçoit donc la totalité de l'incertitude de la cascade. Malgré notre bonne connaissance des processus thermiques en rivière et la qualité grandissante des modèles météorologiques, hydrologiques et thermiques, cette incertitude ne peut être entièrement éliminée de la prévision. Il faut donc la quantifier pour bien la communiquer.

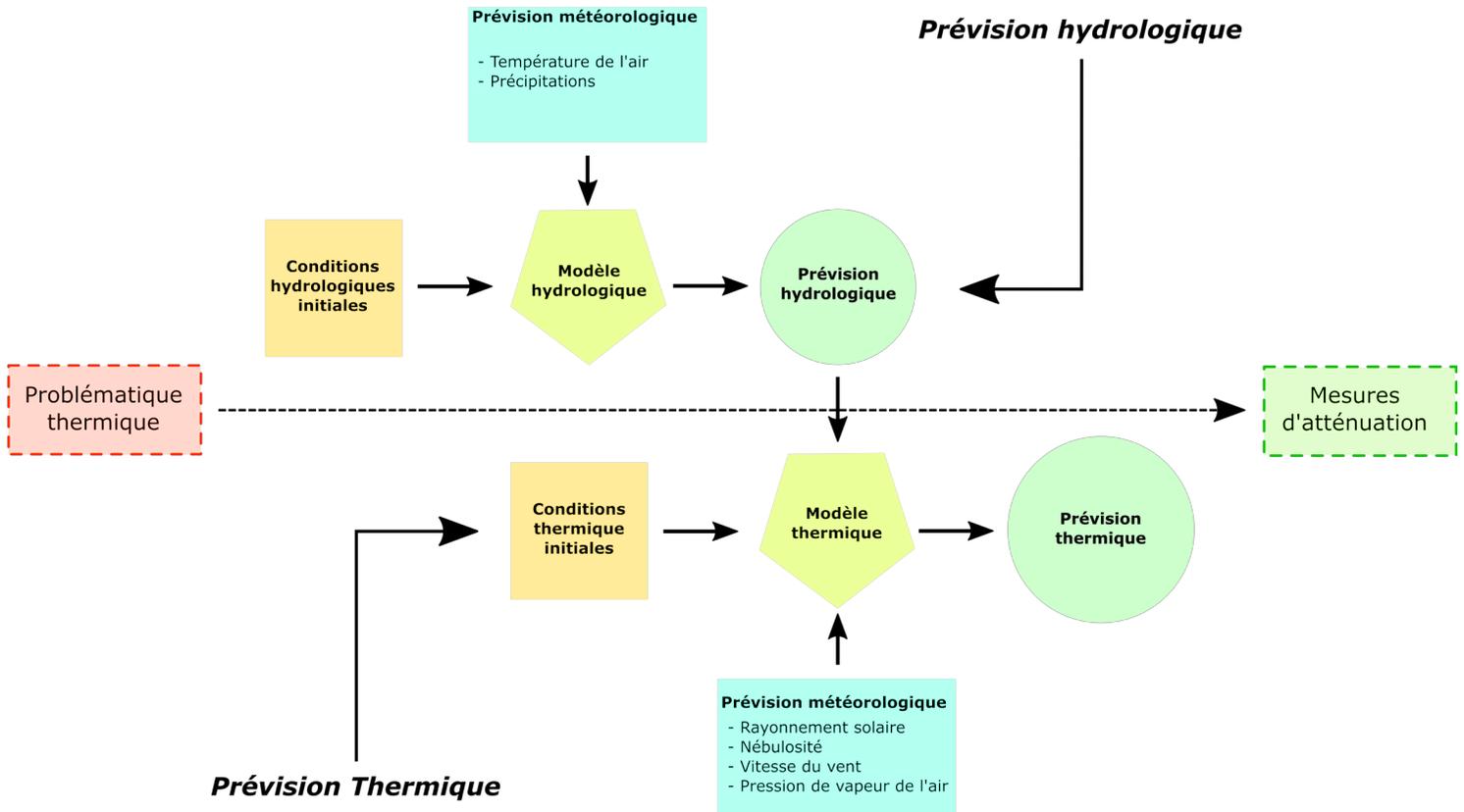


Figure 3 : Organigramme des étapes pour l'émission d'une prévision thermique.

Incertitudes et communication

Reprenons l'exemple du parapluie. Pour prendre cette décision, on s'appuie entièrement sur une prévision météo qui comprend une probabilité facilitant notre interprétation. Par exemple, s'il y a 30 % de chances qu'il pleuve à l'endroit où l'on se trouve, on court un risque plutôt faible si l'on part sans parapluie. Ce pourcentage représente la probabilité d'occurrence de précipitation selon divers scénarios météorologiques. Ces scénarios sont construits à partir de perturbations imposées au modèle prévisionnel. La prévision résultante est appelée *prévision d'ensemble* et est constituée d'un groupe de prévisions que l'on nomme *membres*. Elle permet de passer d'une prévision déterministe, où seules deux réponses sont possibles, soit la réalisation ou non d'un évènement, à une prévision probabiliste exprimée par une probabilité d'occurrence. Dans le

modèle météorologique canadien, la prévision d'ensemble compte 20 membres.

La littérature scientifique démontre que les conditions initiales représentent la principale source d'incertitude pour la prévision hydrologique à court terme alors que pour une prévision de trois jours ou plus, c'est aux intrants météorologiques qu'est attribuable la majeure partie de l'incertitude. L'incertitude due au modèle est quant à elle présente tout au long de la prévision.

Au cours de la dernière décennie, on s'est beaucoup intéressé aux façons de quantifier correctement ces sources d'incertitude. Un ensemble d'outils est donc disponible pour inclure l'incertitude relativement aisément lors d'une prévision hydrologique. Du côté de la prévision thermique, peu de travaux ont été faits sur la quantification et l'inclusion de l'incertitude. C'est pour cette raison

que nous nous sommes penchés sur la question dans le cadre du présent projet doctoral. Nos objectifs sont de mieux comprendre la contribution des trois sources d'incertitude dans la prévision de la température de l'eau, soit les conditions initiales, les intrants météorologiques et la formulation du modèle utilisé, et ce, par le biais de la production de prévisions d'ensemble.

La figure 4 présente un exemple de prévision thermique où trois niveaux d'alerte sont pris en compte et leur probabilité de dépassement est quantifiée en fonction de l'horizon de la prévision. On peut observer que, grâce aux divers scénarios de prévision, l'incertitude liée à un dépassement de seuil peut être évaluée et communiquée explicitement. Par la suite, grâce à une simple mesure de la température de l'eau, on peut évaluer la qualité de la prévision émise. Un tel système permet d'établir des niveaux d'alerte en fonction de la tolérance thermique des espèces présentes dans le cours d'eau et de mettre en place des mesures

d'atténuation dans les délais requis. Tout comme pour la prévision météorologique, un système de prévision thermique d'ensemble permet une prise de décision qui tient compte de l'incertitude et qui est plus transparente et donc plus facile à communiquer.

Dans un contexte climatique et hydrologique en pleine mutation, la température de l'eau des rivières s'impose comme une variable de première importance. Bien en comprendre la dynamique permettra d'adapter nos stratégies de gestion des ressources et d'assurer le maintien des activités socioéconomiques associées aux rivières. Pour ce faire, des prévisions de qualité, dont l'incertitude est quantifiée et correctement communiquée, sont essentielles. L'utilité de la prévision thermique pour la conservation des écosystèmes aquatiques est probante et son potentiel de gestion a été démontré. Voilà donc un outil des plus intéressants pour une bonne gestion de nos rivières.

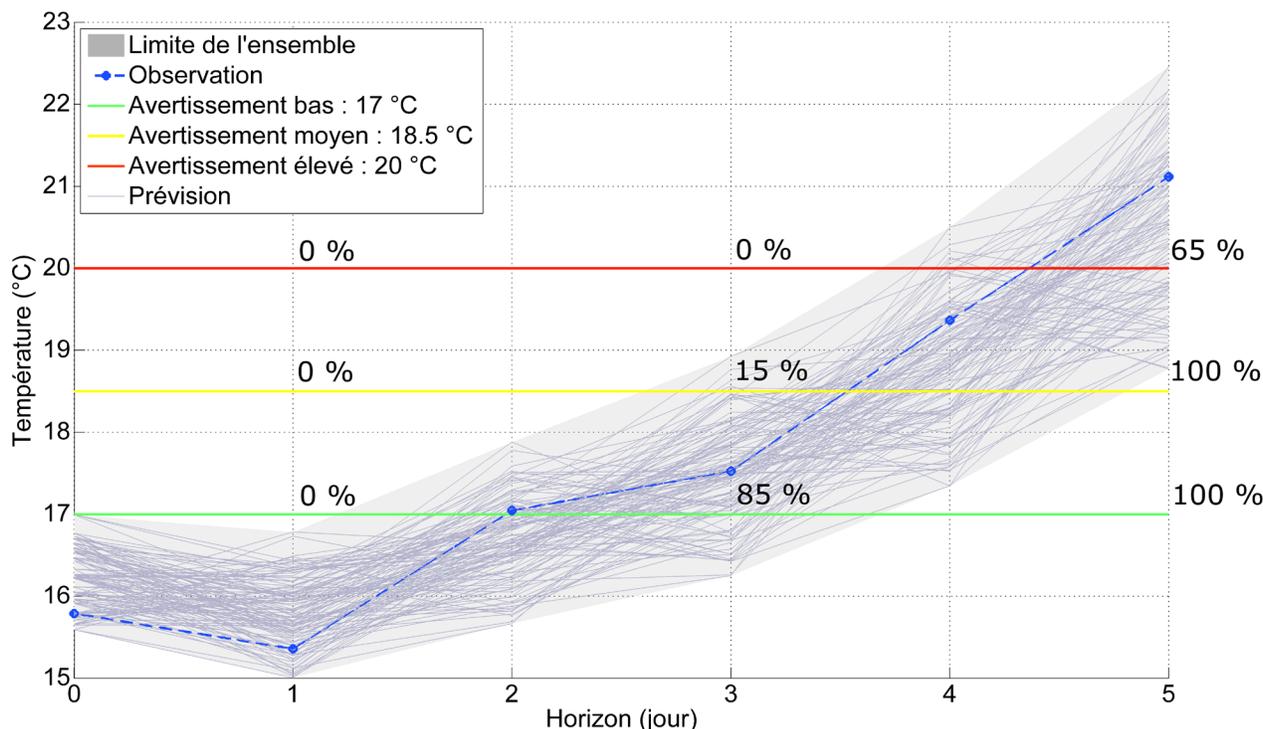


Figure 4 : Exemple de prévision d'ensemble pour un horizon de cinq jours. Les pourcentages correspondent aux probabilités de dépassement des trois seuils pour un, trois et cinq jours.

Pour en savoir plus...

Base de données de la température de l'eau de l'est du Canada

<http://rivtemp.ca/rivtemp-data/>

Rapport de Pêches et Océans Canada sur les seuils de température pour le saumon atlantique

http://www.dfo-mpo.gc.ca/csas-sccs/Publications/SAR-AS/2012/2012_019-fra.pdf

Rapport de Pêches et Océans Canada sur la prévision hydrologique et thermique sur le fleuve Fraser

<http://www.dfo-mpo.gc.ca/Library/315664.pdf>

Prévision hydrologique d'ensemble (en anglais)

<https://hepex.irstea.fr/>

Quelques articles scientifiques pertinents (en anglais)

Caissie, D. 2006. The thermal regime of rivers: a review. *Freshwater Biology*, 51, 1389–1406.

DOI : 10.1111/j.1365-2427.2006.01597.x

Maheu, A., St-Hilaire, A., Caissie, D., El Jabi, N., Bourque, G. et Boclair, D. 2016. A regional analysis of the impact of dams on water temperature in medium-size rivers in eastern Canada. *Can. J. Fish. Aquat. Sci. / J. Can. Sci. Halieut. Aquat.*, EN LIGNE.

DOI : 10.1139/cjfas-2015-0486

Olden, J.D. et Naiman, R.J. 2010. Incorporating thermal regimes into environmental flows assessments: modifying dam operations to restore freshwater ecosystem integrity. *Freshwater Biology*, 55, 86-107.

DOI : 10.1111/j.1365-2427.2009.02179.x