

# Prévisions des apports aux barrages hydroélectriques du Yukon sous des conditions de climats actuel et futur

Rousseau, A.N. <sup>1</sup>, Horton, B. <sup>2</sup>, Samuel, J. <sup>2</sup>, Mallory, S. <sup>3</sup>, Sreckovic, G. <sup>3</sup>, Lavigne, M.-A. <sup>3</sup>, Savary, S. <sup>1</sup>, Tremblay, S. <sup>1</sup>, Caillouet, L. <sup>1</sup>, Augas, J. <sup>1</sup>, Doumbia, C. <sup>1</sup>, Chaumont, D. <sup>4</sup>

<sup>1</sup>INRS-ETE, Québec; <sup>2</sup>Northern Climate Exchange, Yukon Research Centre, Yukon; <sup>3</sup>Yukon Energy Corporation, Yukon; <sup>4</sup>Ouranos, Montréal

## Cadre de l'étude

Dans les environnements nordiques, les gestionnaires d'hydroélectricité, tel que Yukon Energy Corporation (YEC), font face à des défis permanents pour gérer les ressources en eau à court, moyen, ou long terme, on dénote entre autres:

- Le peu de données hydrométéorologiques disponibles,
- La présence de glaciers et de pergélisol, et
- L'évolution des conditions climatiques.

Cela étant, il n'en demeure pas moins que l'on doit relever ces défis afin d'améliorer la gestion des ressources pour différents horizons temporels.

Ce projet se décline en quatre sous-objectifs spécifiques:

- **Fournir des prévisions journalières des débits aux gestionnaires d'aménagements hydroélectriques pour un horizon de 1 à 14 jours,**
- **Améliorer la planification saisonnière des débits (1-3 mois),**
- **Évaluer les tendances météorologiques et hydrologiques à long terme (horizon 2100), et**
- **Évaluer les impacts du changement climatique sur la fréquence et la sévérité des événements extrêmes.**

La première étape pour atteindre ces objectifs requiert la mise en place d'un système de modélisation hydrologique distribuée adapté aux bassins hydrographiques d'importance pour YEC. Ce système pourra ensuite être utilisé pour répondre aux autres objectifs du projet.

## Bassins hydrographiques à l'étude

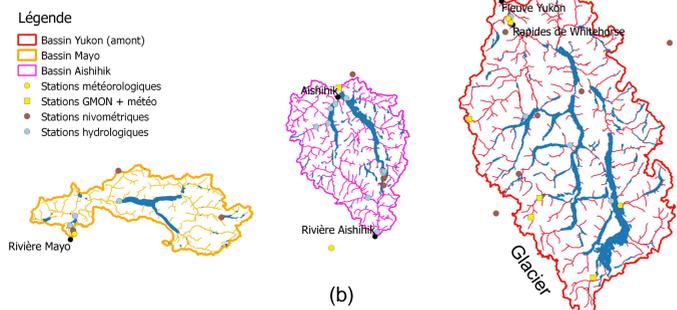
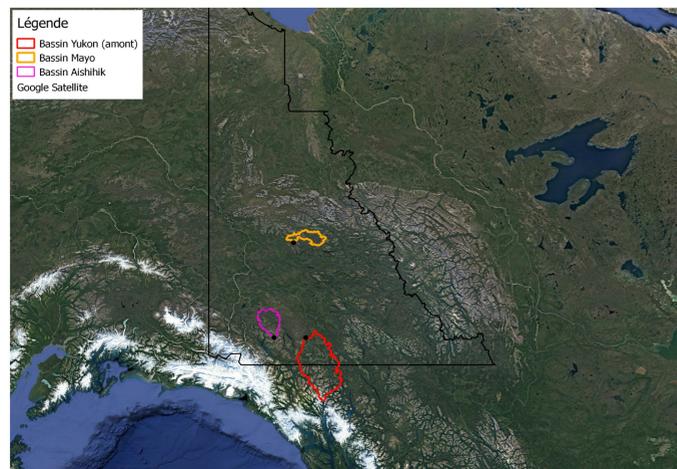


Fig. 1. (a) Localisation des trois bassins hydrographiques à l'étude; (b) Hydrographie de ces bassins, de gauche à droite : Mayo (2670 km<sup>2</sup>), Aishihik (4551 km<sup>2</sup>), et Yukon (amont) (20553 km<sup>2</sup>)

## Approches méthodologiques

- 1 Mise en place d'un système de modélisation hydrologique distribuée et d'un système de prévision des apports et des débits (à court et moyen terme),
- 2 Amélioration du système avec un module neige multicouche et un module pergélisol,
- 3 Intégration au système d'un module glacier,
- 4 Investigation de la variabilité climatique jusqu'à l'horizon 2100 grâce aux indices de téléconnection et aux variables large échelle,
- 5 Étude de l'évolution des événements extrêmes et des tendances de débit en climat futur.

## 1 Modélisation hydrologique

Mise en place d'HYDROTEL (Fortin et al., 2001; Turcotte et al., 2007), un modèle distribué à base physique.

- Processus hydrologiques modélisés séparément pour chaque unité hydrologique relativement homogène (UHRH) et chaque segment de cours d'eau,
- Pas de temps allant de l'horaire au journalier, et
- Sol divisé en trois couches caractérisées par regroupement d'UHRH.

### a) Construction de la base de données physiographiques à l'aide de PHYSITEL

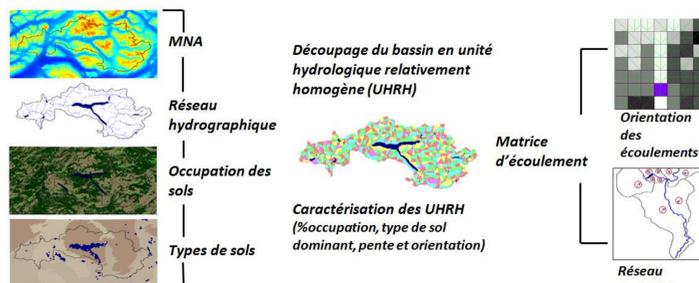


Fig. 2. Construction des données physiographiques pour HYDROTEL

- Modèle numérique d'altitude (30m, BDNT Canadienne),
- Réseau hydrographique (1:50 000 Portail Géomatique Yukon, B-C),
- Occupation des sols (30m, Couverture du sol du Canada, circa 2000), et
- Types de sols (1km, Environnement Canada, Szeto et al. 2008).

### b) Modélisation hydrologique avec HYDROTEL

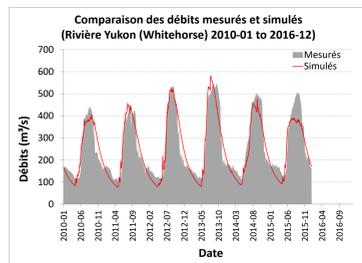


Fig. 3. Performances pour rivière Yukon

Calage avec 4/1/9 stations météorologiques opérationnelles (Aishihik/Mayo/Yukon) sur la période du 2010-01-01 au 2016-12-31.

Comparaison avec les apports reconstitués aux réservoirs Aishihik/Mayo et avec les débits mesurés à Whitehorse pour la rivière Yukon (Fig. 3) :

- Aishihik : N-S de 0,61, P-BIAIS de -8,9%
- Mayo : N-S de 0,61, P-BIAIS de -29,4%
- Yukon : N-S de 0,88, P-BIAIS de -4,13%

### c) Prévision à court et moyen terme

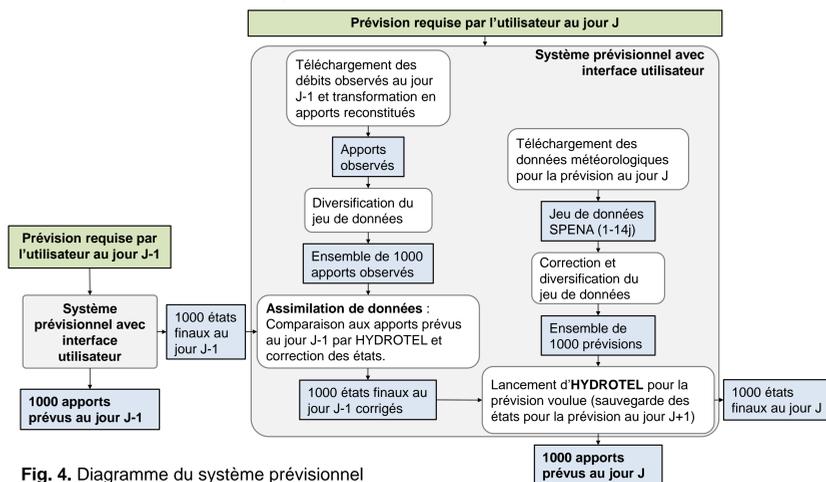


Fig. 4. Diagramme du système prévisionnel

### Assimilation de données (EnskalF)

- Mise en place sur Mayo et Aishihik,
- En cours sur Yukon amont, et
- Tests sur un sous bassin versant d'Aishihik :
  - Sekulmun (modélisation des débits et non des apports) - Pour 2016 (année difficile à modéliser)
    - N-S Aishihik : de -0,07 à 0,30
    - N-S Mayo : de 0,38 à 0,96
    - N-S Sekulmun : de 0,39 à 0,99

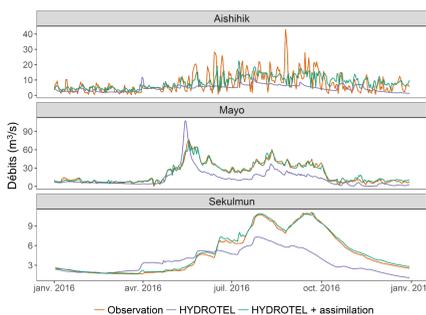


Fig. 5. Bénéfices de l'assimilation de données

### d) Prévision saisonnière

- SIPSCan (Prévisions mensuelles 1-12 mois),
- Désagrégation temporelle avec un générateur de climat, et
- Conditions initiales issues des résultats de la prévision à court terme.

## 2 Modules de neige et de pergélisol

### Module de neige

HYDROTEL est composé d'un module neige unicouche de type « bilan énergétique-degré jour », mais une inertie trop faible est constatée lors de la fonte du couvert nival.

L'objectif est d'implémenter un modèle multicouche d'équivalent en eau de la neige (ÉEN) afin de simuler une fonte sur un temps plus long, se rapprochant ainsi de l'observation.

- Campagnes de mesure de l'ÉEN sur Mayo et Aishihik qui aideront au calage et à l'évaluation du modèle (Fig. 6.).



Fig. 6. Campagne de mesures sur Aishihik

### Module de pergélisol

Dans HYDROTEL, la température du sol est actuellement prédite par la température de l'atmosphère, provoquant des gels et dégels successifs du sol.

Les objectifs portent sur:

- L'intégration d'un modèle deux couches : une active suivant les saisons, et une autre ayant plus d'inertie à l'échelle d'UHRH à dominance de pergélisol, et
- À l'aide de cartes du Yukon Géomatics (Fig. 7.) et de photos aériennes, l'étude des liens entre les conditions climatiques et l'évolution des zones de pergélisol au cours des dernières décennies.

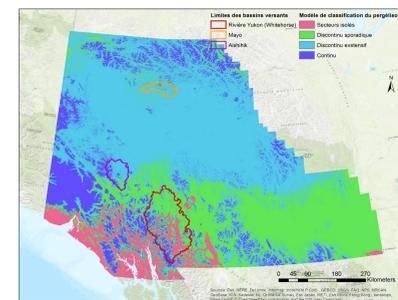


Fig. 7. Carte du pergélisol sur le Yukon

## 3 Module de glacier

Le bassin amont de la rivière Yukon est en partie alimenté par des glaciers des montagnes de la chaîne côtière. L'objectif est d'intégrer une modélisation des glaciers afin de considérer l'ensemble des processus hydrologiques pour l'amont de la rivière Yukon.

Deux modèles empiriques possibles :

- Modèle utilisant un facteur degré jour (forte corrélation entre la température de l'air et la fonte des glaciers), et
- Modèle à bilan d'énergie (équation paramétrique liant énergie de fonte, chaleur latente et densité de l'eau).

Pour caler et valider les modèles :

- Relation empirique volume-surface de Chen et Ohmura (1990), et
- Mesures de GRACE transformées en répartition des masses et épaisseur équivalente en eau (ÉÉE).

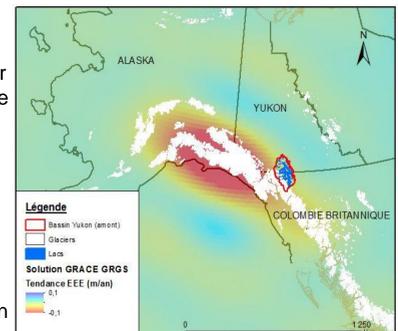


Fig. 8. Tendence de l'ÉÉE par GRACE

Les volumes d'eau issus de la fonte des glaciers et contribuant au débit à l'exutoire à Whitehorse seront combinés aux autres apports modélisés par HYDROTEL.

## 4 Variabilité climatique à long terme

Des liens entre variables grande échelle et variables locales ont pu être établis dans la région du Yukon (Cassano and Cassano, 2010, Wang et al., 2006).

L'objectif est d'approfondir ces liens afin de prévoir les tendances hydrométéorologiques locales à long terme grâce aux variables atmosphériques et/ou océaniques.

Approche méthodologique :

- Choix des données en comparant différents jeux de données entre eux (observations, réanalyses, projections climatiques),
- Réduction des données large-échelle en variables de moindre dimension (indices, analyse en composantes principales, cartes auto adaptatives, etc.),
- Mise en place d'une relation entre variables large-échelle réduites et débits (Yukon amont) et précipitations / températures (Mayo / Aishihik), et
- Vérification de la transférabilité temporelle des relations (données CMIP5 1901-1999 puis CMIP5 2000-2100).

Une évaluation à plus long terme des ressources disponibles sera ainsi possible. En perspective, il sera possible d'intégrer des variables large échelle dans le système prévisionnel pour améliorer les prévisions d'ensemble saisonnières.

## 5 Évolution d'indicateurs de débit

Deux scénarios relatifs à l'évolution de la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère seront utilisés pour évaluer les impacts du changement climatique sur les débits prévus des bassins (horizon 2010-2040).

- HYDROTEL à nouveau utilisé avec les simulations issues de CMIP5, et
- Accent sur l'identification à long terme des événements extrêmes.

## Références

1. Cassano, E. N., Cassano, J. J., 2010. Synoptic forcing of precipitation in the Mackenzie and Yukon River basins, *International Journal of Climatology*, 30: 658-674.
2. Chen, J., Ohmura, A., 1990. Estimation of Alpine glacier water resources and their change since the 1870s. In: *Hydrology in Mountainous areas. I. Hydrological Measurements; The Water Cycle. Proceedings of the two Lausanne Symposia, Août 1990. IAHS Publ. 193*, pp. 127-135.
3. Fortin, J.-P., Turcotte, R., Massicotte, S., Moussa, R., Fitzback, J., Villeneuve, J.-P., 2001. A distributed watershed model compatible with remote sensing and GIS data. Part I: Description of the model. *Journal of Hydrologic Engineering*, 6(2): 91-99.
4. Szeto, K.K., Motchalova, T., Vivier, P. (Updated by M. Law); 2000. (update 2008). On the preparation of a 1-km resolution gridded soil texture dataset - A CRB internal report. Environment Canada, Downview, Ontario.
5. Turcotte, R., Fortin, L.-G., Fortin, V., Villeneuve, J.-P., 2007. Operational analysis of the spatial distribution and the temporal evolution of the snowpack water equivalent in southern Quebec. *Nordic Hydrology*, 38(3), 211-234.
6. Wang, J. Y., Whitfield, P. H., Cannon, A. J., 2006. Influence of Pacific Climate Patterns on Low-Flows in British Columbia and Yukon, Canada, *Canadian Water Resources Journal*, 31 (1):155-164.