

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC
INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
CENTRE EAU TERRE ENVIRONNEMENT

ÉVALUATION DES INCERTITUDES SUR LES DÉBITS ESTIMÉS AUX STATIONS HYDROMÉTRIQUES DU QUÉBEC MÉRIDIONAL

PAR
Alain MAILHOT
Samuel BOLDUC
Guillaume TALBOT

RAPPORT FINAL RÉVISÉ

Août 2022



Table des matières

1. Introduction	2
2. Contexte / objectifs.....	2
3. Cadre théorique / compte-rendu de la revue de la littérature	2
4. Méthodologie / données	3
5. Résultats.....	4
6. Analyse et discussion	6
7. Conclusion et recommandations	6
8. Références	7
Annexes.....	Erreur ! Signet non défini.

1. Introduction

Le présent texte rend compte des travaux réalisés dans le cadre du projet *Évaluation des incertitudes sur les débits estimés aux stations hydrométriques du Québec méridional* financé par le gouvernement du Québec dans le cadre de l'initiative INFO-Crue. Ce projet avait pour principal objectif de développer une méthodologie permettant de quantifier les incertitudes sur les débits estimés à partir des courbes de tarage (CT) aux stations hydrométriques (SH) du Québec méridional opérées par la Direction de l'Expertise Hydrique (DEH). Ce travail a également permis de documenter les pratiques actuelles de la DEH et d'identifier de possibles pistes d'améliorations de ces pratiques.

2. Contexte / objectifs

Les débits des cours d'eau constituent l'une des données nécessaires à la caractérisation de l'aléa inondation et de ce fait, à la cartographie des zones inondables. Les débits sont estimés à partir de la mesure des niveaux d'eau aux SH opérées par le ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les Changements Climatiques (MELCC). Une relation entre le niveau mesuré et le débit, appelée courbe de tarage (CT), est ensuite utilisée pour estimer les débits à partir du niveau. Ces courbes sont construites à partir de jaugeages, c'est-à-dire de mesures conjointes des niveaux et des débits à une section dite de contrôle. Ces jaugeages sont réalisés par les techniciens de la DEH. Les incertitudes sur les débits estimés à partir de ces courbes sont toutefois inconnues. La quantification de ces incertitudes est cependant cruciale pour une estimation adéquate des débits de crues utilisés pour la délimitation des zones inondables. Le projet avait pour objectif d'estimer les incertitudes sur les débits estimés à partir des CT et ainsi offrir aux utilisateurs de ces données une appréciation de ces incertitudes.

3. Cadre théorique / compte-rendu de la revue de la littérature

La mesure des débits des cours d'eau est un exercice coûteux, qui demande du temps et qui demeure dans l'ensemble très complexe. Plusieurs technologies ont été développées au cours des dernières années qui permettent de simplifier et d'améliorer la qualité des mesures. Toutes ces techniques exigent toutefois de mobiliser une équipe sur le terrain et aucune ne permet de mesurer directement les débits en continu à grande échelle et à coût raisonnable.

En revanche la mesure de niveaux d'eau est beaucoup plus simple et peut être facilement mise en place à grande échelle sur plusieurs cours d'eau et à faible coût. La simplicité des mesures de niveaux peut être mise à profit pour mesurer les débits en rivière lorsque les conditions hydrauliques permettent d'établir une relation unique entre le niveau et le débit (relation h-Q). Sous ces conditions, une fois cette relation établie, le débit peut être simplement estimé à partir de la mesure du niveau à une section donnée que l'on dit de contrôle. Cette relation prend la forme d'une CT.

L'élaboration des CT pose toutefois un certain nombre de défis. Le premier concerne le choix de la représentation mathématique de cette relation. Deux grands types de représentation mathématique sont utilisés : 1) la loi de puissance (on parlera alors de régression hydraulique - RH) ; 2) fonctions d'interpolation (p. ex. splines cubiques ou polynômes). Ce dernier type est celui adopté par le MELCC qui utilise des splines cubiques pour construire les CT à partir des jaugeages.

Plusieurs sources d'incertitude sont à considérer lors de la construction des CT et de l'évaluation des débits à partir de cette courbe. Ces sources d'incertitudes proviennent : 1) des mesures de niveau d'eau et de débit lors des jaugeages ; 2) de la représentativité de la CT à reproduire la relation h-Q sur toute la gamme des niveaux mesurés (p. ex. selon le nombre de jaugeages réalisés, la gamme de débits jaugés, d'éventuelle changement dans la section de contrôle, de la violation de certaines hypothèses de base

telle que l'écoulement est en régime permanent); 3) des possibles modifications géomorphologiques de la section de contrôle au cours du temps entraînant des changements dans la CT ; 4) de changements graduels, temporaires ou saisonniers du régime hydrique d'une station (p. ex. suite à la croissance des végétaux en berge).

4. Méthodologie / données

Les analyses ont porté sur 174 SH actuellement en opération au Québec. Les jaugeages en eau libre à ces SH ont été considérés. Ainsi, tous les jaugeages susceptibles d'avoir été affectés par des refoulements, des obstructions ou des effets de glace ont été éliminés. Ces jaugeages sont plus fréquemment réalisés au mois de mai pendant la crue printanière. Le nombre de jaugeages disponibles varient sensiblement d'une station à une autre.

La RH a été retenue dans le cadre de la présente étude pour représenter la relation h-Q. Elle prend la forme suivante :

$$Q = a (h - b)^c \quad (1)$$

où Q est le débit (m^3/s), h le niveau (m) et a, b et c trois paramètres à ajuster. La forme de cette équation s'inspire des équations souvent rencontrées pour décrire la relation h-Q de divers ouvrages hydrauliques. Les valeurs des paramètres de cette équation sont obtenues en minimisant la somme des valeurs absolues des écarts entre les débits estimés à partir de cette équation et les débits jaugés pour l'ensemble des niveaux jaugés.

Deux situations particulières ont été considérées lors de la construction des CT : 1) l'apparition de possibles changements des conditions hydrauliques ou géomorphologiques entraînant des modifications de la CT ; 2) l'existence de plusieurs régimes d'écoulement ou de contrôle selon la profondeur d'écoulement qui font en sorte qu'une seule RH ne permet pas de représenter adéquatement la relation h-Q sur toute la gamme des niveaux jaugés. Des approches simples et applicables à grande échelle ont été proposées pour traiter ces deux situations. Dans un premier temps, une CT 'moyenne' (CTM) a été construite à chaque SH en utilisant tous les jaugeages valides disponibles.

L'apparition de possibles changements de la CT a été détectée en appliquant un test de rupture (test de Pettitt; Pettitt 1979) aux séries temporelles des écarts relatifs entre les débits estimés en utilisant la CTM et les débits jaugés pour l'ensemble des niveaux jaugés disponibles. L'utilisation de ce test repose sur l'hypothèse qu'une modification d'une CT se manifestera par une rupture ou une tendance dans la série chronologique de ces écarts. Advenant qu'une rupture soit détectée à une date donnée, la série est partitionnée en deux séquences et les jaugeages avant et après la date de rupture sont regroupés. Ces jaugeages sont ensuite utilisés pour construire deux CT, une couvrant la période antérieure à la rupture et l'autre postérieure à la rupture. La procédure précédente est appliquée de nouveau à ces deux séquences et ainsi de suite jusqu'à ce qu'aucune rupture ne soit plus détectée (les séquences doivent cependant compter au moins 12 jaugeages).

Une fois la partition de la séquence originelle de jaugeages de chaque SH complétée, chaque sous-séquence est utilisée pour construire une CT représentative de la période correspondante, les écarts relatifs entre les débits estimés à partir des CT et les débits jaugés sont calculés pour tous les niveaux jaugés et sont ordonnés en ordre croissant des niveaux jaugés. Ces séries sont ensuite soumis à un test statistique visant à vérifier si ces elles sont aléatoires (communément appelé *run test* ; Wald et Wolfowitz, 1940). Des écarts non aléatoires autour de la CT signifient de potentielles sous-estimations ou surestimations sur certaines gammes de niveaux (p. ex. pour les petits et grands niveaux) et

suggèrent que la CT ne reproduit pas adéquatement la relation h-Q sur toute la gamme de niveaux jaugés. Deux RH (équation 1) sont alors utilisées pour représenter la relation h-Q et une condition de continuité est imposée au niveau où elles se raccordent. Le nombre maximum de RH considéré pour représenter les CT a été fixé à deux.

Les incertitudes sur ces CT ont été établies à partir d'une analyse des écarts relatifs (ER) entre les débits jaugés et les débits estimés à partir des CT. Un examen préliminaire a permis de montrer que la distribution des ER pouvait être représentée par deux distributions à savoir la distribution normale (N) et logistique (L). La seconde se distingue de la première par un poids relatif plus important des queues de la distribution par rapport à sa partie centrale. Ces deux distributions sont par ailleurs symétriques. Les analyses ont également montré que si souvent les ER ne dépendaient pas du niveau (incertitudes homoscédastiques), il pouvait en être autrement dans certains cas. Diverses représentations des incertitudes relatives, appelées modèle d'incertitude, ont été proposées pour refléter cette diversité : M1 : modèle où les incertitudes relatives ne dépendent pas du niveau ; M2d : modèle où les incertitudes relatives augmentent pour les petits niveaux ; M2a : modèle où les incertitudes relatives augmentent pour les grands niveaux ; M3 : modèle où les incertitudes relatives augmentent pour les petits et les plus grands niveaux. Le modèle d'incertitude représentant le mieux les distributions des ER de chaque CT a ainsi pu être identifié et un modèle d'incertitude a été attribué à l'ensemble des CT des SH sous étude.

Une comparaison des relations h-Q obtenues de simulations hydrauliques à certains tronçons avec celles estimées aux SH localisées sur ces mêmes tronçons a été réalisée. L'objectif est ici de voir si les CT estimées à ces stations sont cohérentes avec celles simulées par les modèles hydrauliques et de voir si l'on ne pourrait pas tirer profit de ces simulations hydrauliques pour construire les CT notamment en conditions de crues où les jaugeages sont difficiles et peu nombreux.

5. Résultats

Les procédures précédentes ont été appliquées aux jaugeages valides des 174 SH retenues. Un total de 336 CT a ainsi été construit, chaque CT représentative de la relation h-Q d'une période donnée. Ainsi 97 SH sont représentées par une CT, 33 stations par deux CT, 19 stations par trois CT et enfin 24 stations par quatre CT ou plus.

Après application des procédures précédentes, il appert que 254 CT, soit 75.6% des CT, comptent 12 jaugeages ou plus et sont représentées par une seule RH; 51 CT (15.2%) comptent moins de 12 jaugeages et sont représentées par une seule RH ; et 20 CT (environ 6%) comptent au moins 12 jaugeages et sont représentées par deux RH. Les 11 CT restantes correspondent à des cas spécifiques qui demanderaient un examen plus spécifique. De ces 11 CT, quatre demanderaient à être ajustées par plus de deux RH.

Concernant la représentation des incertitudes relatives sur les CT, la distribution logistique est préférée à la distribution normale pour une majorité de CT (59.4% pour la distribution logistique contre 40.6% pour la distribution normale). Le modèle M1 (incertitude relative constante) a quant à lui été sélectionné pour 64.1% des CT alors que le modèle M2d (incertitudes relatives plus grandes pour les petits niveaux) a été sélectionné pour 30.5% des CT. Enfin les modèles M2a (incertitudes relatives plus grandes pour les grands niveaux) et M3 (incertitudes relatives plus grandes pour les petits et les grands niveaux) n'ont été sélectionnés que pour 3.0% et 2.4% des CT respectivement.

Au terme de ces analyses, les CT avec leurs incertitudes (intervalles 5-95%) ont été construites pour toutes les périodes de jaugeages à toutes les SH. La Figure 1 présente la CT de la station Mitchinamecus (040619) couvrant la période d'août 1988 à septembre 2019

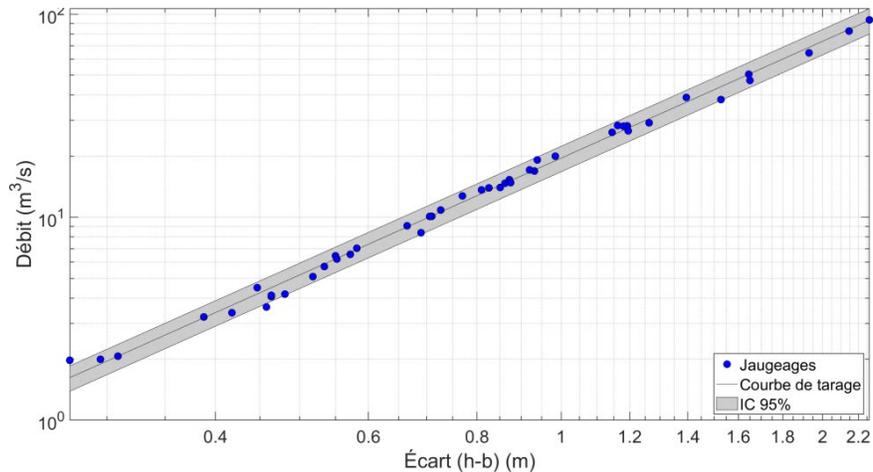


Figure 1 – Exemple de CT avec ses incertitudes (intervalles 2.5 - 97.5%) pour la station Mitchinamecus (040619) couvrant la période d'août 1988 à septembre 2019. A noter les échelles logarithmiques en x et en y.

Les modèles d'incertitudes précédents ont été développés à partir des ER des parties interpolées des CT, c.-à-d. des parties comprises entre le plus petit niveau jaugé (PPNJ) et le plus grand niveau jaugé (PGNJ). La question de l'extrapolation de la CT et du modèle d'incertitude dans les parties non jaugées des CT se pose donc. L'hypothèse la plus simple, et souvent implicitement posée, consiste à supposer que la CT, et les incertitudes associées, associées à la partie interpolée, peuvent être appliquées aux parties non jaugées. Une telle hypothèse pourra toutefois s'avérer hasardeuse dans les cas où le type de contrôle ou la nature du contrôle change avec le niveau ce qui arrivera inévitablement dans des conditions de très forts ou de très faibles débits.

Cette question de l'extrapolation des CT a été examinée dans le cadre de la présente étude en identifiant divers niveaux critiques (NC) correspondant à des changements majeurs des profils des sections de contrôles à certaines SH. Ces profils et NC ont été établis sur la base de données LiDAR disponibles. Seul le premier niveau critique (NC1) a été considéré et a été comparé au PGNJ et au plus grand niveau mesuré (PGNM). Divers cas types ont ainsi été identifiés en fonction des positions relatives du NC1, du PGNJ et du PGNM de chaque CT. Les cas-types les plus fréquemment rencontrés sont : PGNJ < PGNM < NC1 (36.5% des CT) ; NC1 < PGNJ < PGNM (32.3%); PGNJ < NC1 < PGNM (29.1%). On constate donc que le PGNJ est inférieur au NC1 et au PGNM dans plus de 65.6% des cas.

Bien que cette catégorisation des inégalités entre PGNJ, PGNM et NC1 demeure essentiellement qualitative, elle donne une appréciation du niveau de confiance qui peut être accordé aux débits estimés dans la partie extrapolée des CT. Ainsi lorsque PGNJ < PGNM < NC1, les débits estimés historiquement à partir de la partie extrapolée pourrait être fiable puisqu'au NC1. En revanche lorsque PGNJ < NC1 < PGNM, certains débits estimés dans la partie extrapolée pourraient être plus incertains puisque les niveaux recoupent une partie non jaugée de la CT possiblement influencée par la présence du NC1.

Dans tous les cas de figures, à défaut de donner une estimation quantitative des incertitudes sur les débits estimés dans les parties extrapolées des CT, il serait utile d'indiquer aux utilisateurs les cas où les débits ont été estimés à partir des parties extrapolées des CT, c.-à-d. lorsque le niveau mesuré est plus grand que le PGNJ ou plus petit que le PPNJ.

Concernant la comparaison des relations h-Q issues des modélisations hydrauliques à celles estimées aux SH, cinq tronçons où se trouvent des SH ont été utilisés. Cette comparaison montre des accords variables et les écarts observés sont expliqués (p. ex. utilisation d'un jaugeage avec présence de glace dans un cas pour l'étalonnage du modèle hydraulique). Ces résultats ont montré l'intérêt d'utiliser la modélisation hydraulique pour le développement des CT notamment dans les parties extrapolées des CT. Ces analyses offrent également la possibilité de mieux comprendre l'hydraulique de la section de contrôle.

6. Analyse et discussion

Une contribution importante du projet a été de mieux documenter les pratiques et procédures actuelles de la DEH. Ainsi la procédure de mise à jour des CT et les hypothèses concernant la représentation des CT par des splines cubiques ont pu être détaillées au bénéfice même de la DEH.

Une des pierres angulaires de la présente étude est l'utilisation de la RH pour représenter la relation h-Q. Cette approche diffère de celle actuellement utilisée par la DEH qui repose sur l'utilisation de splines cubiques. La mise en place de ce type d'approche repose sur l'identification de 'points pivots'. Ces derniers sont fixés de façon arbitraire par les hydrologues de la DEH et les splines cubiques ajustés de façon à passer par ces points pivots. Cet arbitraire dans le choix des points pivots constitue la principale raison justifiant l'utilisation des RH. Même si cette dernière approche n'est pas sans défaut, elle présente plusieurs avantages et repose sur des assises techniques plus solides. Cela dit, son utilisation sans discernement est risquée. Un examen critique des CT développées sur la base de la connaissance terrain est fondamentale et l'expertise de l'hydrologue et du personnel technique responsables des jaugeages et de l'entretien des SH de première importance.

L'utilisation des résultats de la présente étude dans un contexte opérationnel exigera une refonte majeure des approches de la DEH. Les auteurs de la présente étude en sont pleinement conscients. Loin d'eux l'idée toutefois de prétendre que les CT développées par la DEH sont 'inadéquates' ou 'incorrectes'. Au contraire, les résultats de la présente étude suggèrent, même si une analyse détaillée en ce sens n'a pas été réalisée dans le cadre de cette étude, que dans les parties interpolées des CT, c.-à-d. entre le PPNJ et le PGNJ, les CT produites par la DEH et les CT issues des RH sont très similaires. Les écarts entre ces courbes risquent toutefois d'augmenter dans les parties extrapolées. Dans ce cas, l'extrapolation de la CT basée sur les RH repose sur l'hypothèse que les conditions d'écoulement et de contrôle (type de contrôle, profils des sections, coefficient de friction) demeurent inchangées lorsque l'on transite vers la partie non-jaugée et donc que la relation h-Q construite sur la base de la partie jaugée peut être étendue à la partie non jaugée. Cette hypothèse peut être en partie, dans un premier temps, qualitativement vérifiée lorsque l'on dispose d'information sur le profil de la section de contrôle. Cette avenue a été partiellement explorée dans le cadre de la présente étude mais mériterait très certainement d'être examinée plus attentivement.

7. Conclusion et recommandations

Diverses procédures ont été proposées pour la construction des CT et l'estimation des incertitudes associées. Une application de ces procédures à l'ensemble des SH actuellement en opération a été réalisée. Une ou plusieurs CT, basées sur l'utilisation de RH ont été produites pour chaque SH. Chaque

CT est élaborée à partir des jaugeages réalisés pendant une période donnée et est considérée représentative de la relation niveau-débit (h-Q) pendant cette période. Les incertitudes pour chacune de ces CT ont été estimées à partir d'une analyse des écarts relatifs entre les CT et les couples niveaux-débits des jaugeages.

Les travaux de la présente étude laissent entrevoir plusieurs avenues futures de recherches prometteuses. La plus importante est sans doute liée à l'intégration de considérations hydrauliques dans le développement des CT. La modélisation hydraulique permet d'obtenir plus d'informations sur les parties de la CT en conditions de crue, toujours beaucoup plus difficiles à jauger. Une analyse des résultats de simulations hydrauliques sur certains tronçons a permis d'apprécier la valeur ajoutée de ce type d'information. Le faible nombre de tronçons modélisés n'a toutefois pas permis une analyse complète. Plusieurs tronçons étant actuellement en voie d'être modélisés dans le cadre du projet INFO-Crue, une étude à plus grande échelle sur plusieurs tronçons où se trouvent des SH sera très utile.

8. Références

- Pettitt A.N. (1979). A non-parametric approach to the change-point problem. *J. R. Stat. Soc. Series C (Appl. Stat.)*, 28;(2):126–135.
- Wald A., Wolfowitz J. (1940). On a test whether two samples are from the same population, *Ann. Math Statist.*, 11, 147-162.