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

APPORT DE LA MODÉLISATION HYDRAULIQUE ET ÉVALUATION DES INCERTITUDES SUR LES DÉBITS ESTIMÉS DANS LES PARTIES EXTRAPOLÉES DES COURBES DE TARAGE

PAR
Alain MAILHOT
Samuel BOLDUC
Guillaume TALBOT

RAPPORT FINAL

AVRIL 2024

Ouranos

Environnement et Lutte contre les changements climatiques
Québec

REMERCIEMENTS

Un grand merci d'abord aux intervenants d'Ouranos impliqués dans ce projet, Mme Alexandrine Bisaillon, M. Alexandre Gagnon, ainsi qu'aux intervenants de la Direction de l'expertise hydrique du MELCCFP, Mme Claudine Fortier et M. Richard Turcotte.

Les auteurs tiennent également à remercier les membres du comité de suivi pour leurs suggestions et leurs contributions au projet. Merci donc à M. Jérôme Le Coz (INRAE) et M. Pascal Matte (ECCC).

Nos remerciements vont aussi à M. Simon Rochette, Mme Françoise Tardif et M. Vincent Tremblay (MELCCFP) pour nous avoir fourni les données des modèles hydrauliques et répondu à nos nombreuses questions.

Les auteurs soulignent la participation d'Ouranos à titre de partenaire scientifique et financier et souhaitent également remercier le gouvernement du Québec pour son soutien financier au projet.

Table des matières

REMERCIEMENTS ..... **iii**

Liste des figures ..... **ix**

Liste des tableaux ..... **xiii**

Abréviations ..... **xv**

Chapitre 1. Introduction **1**

Chapitre 2. données hydrométriques et dates des jaugeages **3**

2.1 Données hydrométriques 3

2.2 Dates des jaugeages et débits spécifiques 3

Chapitre 3. Méthode révisée d'ajustement des courbes de tarage **7**

3.1 Courbes de tarage 7

3.2 Modèles d'incertitudes des courbes de tarage 9

3.3 Cas particuliers 13

3.4 Courbes de tarages et modèles d'incertitudes : conclusions et perspectives 16

Chapitre 4. Exposants hydrauliques **19**

4.1 Distribution des exposants hydrauliques 19

4.2 Exposants hydrauliques atypiques 19

4.3 Exposants hydrauliques : conclusions et perspectives 22

Chapitre 5. Effet de l'écoulement en régime non permanent **23**

5.1 Considérations générales 23

5.2 Impacts des régimes non permanents sur les courbes de tarage 24

5.3 Impacts des régimes non permanents : conclusions et perspectives 25

Chapitre 6. Effet de la saisonnalité **27**

6.1 Considérations générales 27

6.2 Identification des CT affectées par la saisonnalité 28

6.3 Effet de saisonnalité : conclusion et perspective 31

Chapitre 7. Incertitudes sur les débits estimés en extrapolation des CT 33

7.1 Rééchantillonnage aléatoire des jaugeages 33

7.2 Résultats 35

7.3 Incertitudes sur les débits extrapolés des CT : conclusion et perspective 37

Chapitre 8. Modélisation hydraulique 39

8.1 CT jaugée et simulée similaires – Cas de la rivière Aux Sables (061029) 39

8.2 Complémentarité des CT jaugées et simulées – Cas de la rivière Du Diable (040238) 40

8.3 Niveau de confiance des MH 41

8.3.1 Cas des rivières Chicoutimi (061004) et Bulstrode (030106) 42

8.3.2 Cas de la rivière Yamaska (Farnham, 030302 et Saint-Hyacinthe, 030345) 42

8.3.3 Cas de la rivière des Anglais (030907) 45

8.3.4 Cas de la rivière Etchemin (023303) 45

8.4 Modélisation hydraulique : conclusions et perspectives 46

Chapitre 9. Application de la méthode BaRatin 49

9.1 Application à des SH avec modifications majeures de la section de contrôle 50

9.2 Application à des SH en amont de barrages 53

9.3 Application à une SH avec géomorphologie variable 56

9.4 Application à une SH avec un profil de section de contrôle complexe 56

9.5 Application à des SH avec de longs historiques 58

9.6 Application de la méthode BaRatin : conclusions et perspectives 61

Chapitre 10. Modèles d'incertitudes simplifiés des courbes de tarage 63

10.1 Modèles d'incertitudes proposés.....63

10.2 Performance des modèles 64

10.3 Modèles d'incertitudes simplifiés : conclusions et perspectives.....67

Chapitre 11. Conclusions et perspectives.....69

Bibliographie.....75

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 - Histogramme de la fraction de stations hydrométriques avec un nombre donné de jaugeages en eau libre. 4

Figure 2.2 - Histogramme de la fraction de stations hydrométriques ayant un nombre donné d'années de jaugeages. 4

Figure 2.3 - Débit spécifique ($m^3/sec/km^2$) pour l'ensemble des jaugeages aux stations retenues en fonction de la date du jaugeage. A noter l'échelle logarithmique de l'axe des y. 5

Figure 3.1 – Fonctions cumulatives des écarts types des 141 CT avec modèles d'incertitude représentées par une loi normale homoscédastique (N-M1) et les 81 CT représentées par une loi logistique homoscédastique (L-M1). Le point bleu correspond à la moyenne des ET des CT représentées par la loi normale et le triangle rouge à la moyenne des ET des CT représentées par la loi logistique. 10

Figure 3.2 – Distributions des écarts types des 57 CT avec modèles d'incertitude représentés par une loi normale hétéroscédastique (N-M2d) et les 16 CT représentés par une loi logistique hétéroscédastique (L-M2d). L'axe des x correspond au niveau h' (voir équation 3.1) subdivisé en intervalle $\Delta h' = 0.1$. A noter que l'axe des y a été tronqué à ET = 0.8. Deux valeurs supérieures à cette valeur ne sont pas présentées (ET = 1.0 et ET = 1.5). 11

Figure 3.3 – CT et intervalles de confiance 95% de la station Mitchinamecus (040619) comportant 45 jaugeages couvrant la période 1977-2019, représentée par une RH et où le modèle L-M1 a été sélectionné. A noter les échelles des x et y logarithmiques. 12

Figure 3.4 - CT et intervalles de confiance 95% de la station Du Lièvre (040624) comportant 20 jaugeages couvrant la période 1979-1990, représentée par une RH et où le modèle N-M1 a été sélectionné. A noter les échelles des x et y logarithmiques. 12

Figure 3.5 - CT et intervalles de confiance 95% de la station Décharge du lac Matapédia (011508) comportant 52 jaugeages couvrant la période 1996-2022, représentée par deux RH et où le modèle L-M1 a été sélectionné. A noter les échelles des x et y logarithmiques. 13

Figure 3.6 – Exemple de CT couvrant la période 2005-2012 à la station Saint-Pierre 052235 comportant 13 jaugeages et pour laquelle le modèle homoscédatique (N-M1) a été sélectionné. A noter les échelles des x et y logarithmiques. 14

Figure 3.7 – Exemple de CT couvrant la période 2014-2022 à la station Boyer Sud (023002) comportant 32 jaugeages et pour laquelle le modèle hétéroscédastique (N-M2d) a été sélectionné et où l'écart-type au PPNJ est de 33%. A noter les échelles des x et y logarithmiques. 15

Figure 3.8 – CT de la période 1983-2021 à la station Vermillon (050144) comportant 54 jaugeages et pour laquelle le modèle M2a (écart-type croissant avec le niveau) a été sélectionné. A noter les échelles des x et y logarithmiques. 16

Figure 4.1 - Fonctions de répartition des exposants c des 312 CT représentées par une RH (1 RH) et des 36 CT représentées par deux RH (2 RH) avec c1 l'exposant associé aux petits niveaux et c2 aux exposants des plus grands niveaux. Les lignes verticales en tiret correspondent aux valeurs de l'exposant c pour : A) déversoir de section rectangulaire (c = 3/2) ; B) écoulement uniforme permanent peu profond dans un canal de section rectangulaire (c = 5/3) ; C) déversoir de section triangulaire (c = 5/2) ; D) écoulement uniforme permanent peu profond dans un canal de section triangulaire (c = 8/3). A noter que l'axe des x a été tronqué à c = 8 par souci de lisibilité (six CT avec une RH ont des exposants supérieurs à 8 et sont indiquées en gris dans le Tableau E.2 de l'Annexe E). 20

Figure 5.1 - Impacts des conditions d'écoulement en régime non permanent (ou transitoire) sur l'évolution temporelle des vitesses moyennes d'écoulement U, des débits Q et des hauteurs d'eau h (à gauche); relation hauteur-débit en conditions transitoires et effet d'hystérésis (au centre); écarts relatifs entre débits estimés à partir des CT et débits en conditions d'écoulement transitoire (à droite). (Figure tirée de Perret *et al*. 2022). ...23

Figure 6.1 - Distribution mensuelle des dates de jaugeages.....28

Figure 6.2 - Boxplots des écarts relatifs, $[Q_{CT} – Q_j]/Q_j$, entre débits estimés à partir des CT, Q_{CT} et les débits jaugés Q_j pour les différentes mois de l'année pour les CT 1RH/30%-70% (CT avec une seule RH comportant entre 30% et 70% de jaugeages avant le 1 juillet et 20 jaugeages ou plus). Les cercles rouges correspondent aux moyennes. 29

Figure 6.3 - Valeurs des coefficients de détermination (R^2) en fonction de la pente des régressions entre jours de l'année où est réalisé le jaugeage et l'écart relatif entre débits estimés à partir des CT, Q_{CT}, et débits jaugés Q_j, ($[Q_{CT} – Q_j]/Q_j$,), pour les 143 CT 1RH/30%-70% (CT avec une seule RH comportant entre 30% et 70% de jaugeages avant le 1 juillet et 20 jaugeages ou plus représentés par les carrés rouges) et pour les 160 CT du même type ne satisfaisant pas au critère 30%-70% (CT 1RH). 30

Figure 6.4 - Écart relatif entre débits estimés à partir des CT et débits jaugés en fonction des dates des jaugeages pour la CT de la station St-François (03078) couvrant la période 1978-1990. La courbe rouge correspond à la régression linéaire entre ces valeurs (R2 = 0.36; pente = 19%).....31

Figure 7.1 - a) Moyennes et b) écarts-types (ET) des écarts relatifs (ER) après ajustements à de distributions logistiques aux valeurs de ER en fonction du niveau relatif. 36

Figure 8.1 - CT jaugée et simulée à la station Aux Sables (061029). Les lignes tiretées noires indiquent les élévations de PR 2, 5, 10, 25, 50 et 100 ans et les lignes tiretées rouges les débits utilisés pour calibrer le MH. La zone grise correspond à l'intervalle de confiance 95% autour de la CT jaugée. PGNM : Plus grand niveau mesuré. 40

Figure 8.2 - CT jaugée et simulée à la station Du Diable (040238). Les lignes tiretées rouges indiquent les débits utilisés pour calibrer le MH. La zone grise correspond à l'intervalle de confiance 95% autour de la CT jaugée. PGNM : Plus grand niveau mesuré. 41

Figure 8.3 - CT jaugée et simulée à la station Chicoutimi (061004). Les lignes tiretées noires indiquent les élévations de PR 2, 5 et 100 ans et les lignes tiretées rouges les débits utilisés pour calibrer le MH. La zone grise correspond à l'intervalle de confiance 95% autour de la CT jaugée. 43

Figure 8.4 - CT jaugée et simulée à la station Bulstrode (030106). Les lignes tiretées noires indiquent les élévations de PR 2, 5 et 100 ans et les lignes tiretées rouges les débits utilisés pour calibrer le MH. La zone grise correspond à l'intervalle de confiance 95% autour de la CT jaugée. PGNM : plus grand niveau mesuré. 43

Figure 8.5 - CT jaugée et simulée à la station Farham (030302). Les lignes tiretées noires indiquent les élévations de PR 2, 5, 10, 25 et 50 ans et la ligne tiretée rouge le débit utilisé pour calibrer le MH. La zone grise correspond à l'intervalle de confiance 95% autour de la CT jaugée. PGNM : Plus grand niveau mesuré. 44

Figure 8.6 - CT jaugée et simulée à la station Saint-Hyacinthe (030345). Les lignes tiretées noires indiquent les élévations de PR 2, 5, 25 et 100 ans et la ligne tiretée rouge le débit utilisé pour calibrer le MH. La zone grise correspond à l'intervalle de confiance 95% autour de la CT jaugée. PGNM : Plus grand niveau mesuré. 44

Figure 8.7 - CT jaugée et simulée à la station Des Anglais (030907). La ligne tiretée noire indique l'élévation de PR 2 ans et les lignes tiretées rouges les débits utilisés pour calibrer le MH. La zone grise définit l'intervalle de confiance 95% autour de la CT jaugée. 45

Figure 8.8 - CT jaugée et simulée à la station Etchemin (023303). Les lignes tiretées noires indiquent les élévations pour les PR 2, 5, 10, 20, 50 et 100 ans et les lignes tiretées rouges les débits utilisés pour calibrer le MH. La zone grise correspond à l'intervalle de confiance 95% autour de la CT jaugée. 46

Figure 9.1 - Profil bathymétrique pour un transect situé près de la SH 022507. 50

Figure 9.2 Comparaison des CT de la méthode BaRatin (CT BaRatin) et des deux régressions hydrauliques (CT INRS) pour la SH 022507 (Du Loup) : a) pour l'ensemble des niveaux mesurés ; b) pour les niveaux inférieurs à 126.4 m. Les seuils indiquent les transitions entre les contrôles hydrauliques pour la CT BaRatin (seuil BaRatin) et entre les régressions hydrauliques (seuil INRS). PGNM : Plus grand niveau mesuré. 52

Figure 9.3 - Comparaison des CT de la méthode BaRatin (CT BaRatin) et des régressions hydrauliques (CT INRS) pour la SH 030421 (L'Acadie). Le seuil indique la transition entre les contrôles hydrauliques pour la CT BaRatin. PGNM : Plus grand niveau mesuré.....53

Figure 9.4 - Comparaison des CT de la méthode BaRatin (CT BaRatin) et des régressions hydrauliques (CT INRS) pour les SH : a) 030304 (Noire) et b) 048603 (Gordon). Le seuil indique la transition entre les contrôles hydrauliques pour les CT BaRatin et les deux RH de la CT INRS. PGNM : Plus grand niveau mesuré et PPNM : Plus petit niveau mesuré. 55

Figure 9.5 - Comparaison des CT de la méthode BaRatin (CT BaRatin) et des régressions hydrauliques (CT INRS) pour la SH Nelson (050915) pour : a) la période 20026-2016; b) 2016-2022. PGNM : Plus grand niveau mesuré. 57

Figure 9.6 - Comparaison de la CT de la méthode BaRatin (CT BaRatin) et de la régression hydraulique (CT INRS) pour la SH 030316 (David), PGNM : Plus grand niveau mesuré. 58

Figure 9.7 - Comparaison des CT estimées à partir de BaRatin (CT BaRatin) et des jaugeages (CT INRS) pour la SH 023422 (Famine), PGNM : Plus grand niveau mesuré. 59

Figure 9.8 - Comparaison des CT estimées à partir de BaRatin (CT BaRatin) et des jaugeages (CT INRS) pour la SH 050408 (Sainte-Anne) pour les périodes 1965-2001 (lignes continues) et 2005-2022 (lignes tiretées). PGNM : Plus grand niveau mesuré…60

Figure 9.9 - Comparaison des CT estimées à partir de BaRatin (CT BaRatin) et des jaugeages (CT INRS) pour la SH 050801 (Jacques-Cartier) pour les périodes 1925-1969 (lignes continues) et 1972-2022 (lignes tiretées). Le seuil indique la transition entre les RH (CT INRS). PGNM : Plus grand niveau mesuré. 61

Figure 10.1 -: Écart-types des résidus relatifs aux 332 séquences retenues en fonction de la moyenne des débits normalisés appartenant à chaque intervalle de valeurs. A noter que l'axe des x est logarithmique. La courbe bleue correspond à une moyenne mobile des différentes valeurs obtenues. La courbe en tiret noir correspond à l'équation de Coxon *et al.* (2015) ($\sigma = \pi 3\ 4.18\exp - 3.051\ \mathrm{Q} + 3.531$ où Q est le débit normalisé. La gamme de débit normalisé de cette courbe respecte les valeurs de débits normalisés considérées par Coxon *et al*. (2015). La courbe en tiret rouge correspond aux équations 10.1, 10.2 et 10.3 (les valeurs des paramètres sont présentées au Tableau 10.1).....65

Figure 10.2 - Biais des résidus relatifs aux 332 séquences retenues en fonction de la moyenne des débits normalisés appartenant à chaque intervalle de valeurs. A noter que l'axe des x est logarithmique. 66

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1 - Nombre de stations avec un nombre donné de séquences 9

Tableau 3.2 - Nombre de séquences (%) selon les diverses combinaisons des catégories (A1, A2, A3) et (B1, B2, B3, B4, B5). 9

Tableau 3.3 - Nombre de CT (%) selon le modèle d'incertitude sélectionné. À noter que le modèle M3 n'est jamais sélectionné. 10

Tableau 7.1 - Nombre de CT disponibles avec un nombre minimal de jaugeages donnée et nombre moyen de jaugeages par CT correspondante. Seules les 264 CT représentées par 1 RH sont considérées. 34

Tableau 10.1 - Valeurs des paramètres des équations 10.1, 10.2 et 10.3 après ajustements à la courbe de ET en fonction du débit normalisé (Figure 10.1). Les ET sont exprimés en pourcentages. 65

Tableau 10.2 - Fractions des CT où les différents modèles d'incertitude proposés représentent adéquatement les distributions empiriques des écarts relatifs entre CT et débits jaugés selon le test de Kolmogorov-Smirnov (seuil de 95%). 66

ABRÉVIATIONS

BV : Bassin versant

CT : Courbe de tarage

ECCC : Environnement et Changements Climatiques Canada

ER : Écart relatif

ET : Écart-type

MARE : *Mean absolute relative error*

MELCCFP : ministère de l'Environnement, de la Lutte aux Changements Climatiques, de la Faune et des Parcs

MH : Modèle hydraulique

MSRE *: Mean square relative error*

PGNJ : Plus grand niveau jaugé :

PPNJ : Plus petit niveau jaugé

RH : Régression hydraulique

RR : Résidu relatif

SH : Station hydrométrique

CHAPITRE 1. INTRODUCTION

Le présent rapport rend compte des travaux réalisés dans le cadre du projet *Apport de la modélisation hydraulique et évaluation des incertitudes sur les débits estimés dans les parties extrapolées des courbes de tarage*. Ce projet s'inscrit dans la foulée d'un premier projet intitulé *Évaluation des incertitudes sur les débits de crue maximales estimés à partir des données hydrométriques pour les bassins du Québec méridional*, réalisé du 1 septembre 2020 au 30 juin 2022 (21 mois) dans le cadre d'Info-Crue (Mailhot *et al*., 2022).

Le principal objectif de ce projet est de quantifier les incertitudes sur les débits estimés dans les parties extrapolées des courbes de tarage (CT). Les objectifs spécifiques du projet sont les suivants : 1) évaluer l'apport potentiel de la modélisation hydraulique au développement des CT et à l'estimation des incertitudes des débits de crue estimés en extrapolation des CT, c.-à-d. dans la partie au-delà du plus grand niveau jaugé (PGNJ); 2) développer des versions simplifiées des modèles d'incertitudes proposés dans la première partie du projet; 3) procéder à différentes analyses complémentaires afin d'évaluer de potentiels effets de la saisonnalité et des conditions d'écoulement non permanents sur les CT.

Le rapport est structuré de la façon suivante. À noter que chaque chapitre se termine par une section 'Conclusion et perspective' qui présente les principales conclusions et discute des perspectives de recherche.

Le Chapitre 2 brosse un portrait de l'ensemble des données hydrométriques utilisées dans le projet et présente quelques analyses préliminaires de ces données.

La métrique d'ajustement des CT présentée à la Section 7.1 de Mailhot *et al*. (2022) a été revue. En effet, un examen plus approfondi des résultats alors obtenus a révélé l'existence de certains problèmes lorsque les CT sont ajustées en minimisant l'erreur moyenne relative absolue (*Mean Absolute Relative Error* ou MARE). Les CT ont donc été ajustées en minimisant les erreurs quadratiques relatives moyennes (*Mean square relative error* ou MSRE). Le Chapitre 3 présente les CT et les modèles d'incertitudes après révision de la méthode d'ajustement.

Le Chapitre 4 porte sur les exposants hydrauliques obtenus pour les diverses CT. La distribution de ces valeurs est comparée aux valeurs typiques de plusieurs ouvrages hydrauliques standards (p. ex. déversoirs avec différents profils). Les exposants 'atypiques', définis comme les exposants supérieurs à 3 ou inférieurs à 1, sont ensuite plus spécifiquement examinés afin d'identifier les conditions spécifiques de ces sites de mesure qui pourraient expliquer ces exposants hors-normes.

Le Chapitre 5 s'intéresse aux possibles effets d'hystérésis liés aux conditions d'écoulement en régime non permanent sur les CT. Une procédure est proposée afin de détecter ces effets et identifier les sites où ils sont le plus susceptibles de se produire.

Les impacts de la saisonnalité sur les débits estimés à partir des CT sont analysés au Chapitre 6. Cette saisonnalité se manifeste par un déplacement des CT au cours de l'année résultant d'une modification des coefficients de rugosité attribuable à la croissance de la végétation dans le lit et sur les berges des cours d'eau.

L’estimation des incertitudes dans les parties extrapolées des CT est abordée au Chapitre 7. Une méthode de rééchantillonnage des jaugeages est proposée afin d’explorer les incertitudes dans les parties interpolées et extrapolées des CT.

Le Chapitre 8 traite de l’apport de la modélisation hydraulique afin de mieux comprendre les contrôles hydrauliques et améliorer les CT notamment dans les parties en extrapolation. Les modélisations hydrauliques de divers tronçons de rivières développées dans le cadre du projet INFO-Crue ont été utilisées. Les divers secteurs considérés sont présentés et analysés et les CT construites à partir des débits simulés sont comparées aux CT développées dans le cadre du présent projet.

La méthode *Bayesian rating curve framework* (BaRatin), développée par l’équipe de Jérôme Le Coz de l’Irstea à Lyon (Le Coz *et al*., 2014) a été appliquée à certains sites. Le Chapitre 9 rend compte de ces travaux. Il convient de noter que ces travaux ont été plus importants qu’initialement prévus. Une rencontre avec Jérôme Le Coz et Benjamin Renard a d’ailleurs eu lieu le 14 février 2024 afin de leurs présenter et de discuter des résultats.

Le Chapitre 10 propose des modèles d’incertitudes simplifiés et enfin les principales conclusions et les perspectives de recherche sont énumérées au Chapitre 11.

Ayant été informé de travaux similaires réalisés par une équipe d’Environnement et Changements Climatiques Canada (ECCC), une rencontre avec les membres de cette équipe a été organisée le 7 décembre 2023. Chacune des équipes a pu ainsi présenter les travaux en cours. Bien que cette rencontre ait démontré des intérêts de recherche très similaires, elle est malheureusement restée sans suite.

CHAPITRE 2. DONNÉES HYDROMÉTRIQUES ET DATES DES JAUGEAGES

Le présent chapitre brosse un portrait des données hydrométriques utilisées dans le cadre du projet. Le lecteur est invité à consulter le Chapitre 2 de Mailhot *et al*. (2023) pour plus de détails sur les analyses préliminaires et la validation de ces données.

2.1 Données hydrométriques

Les données de jaugeages jusqu'en 2023 ont été rendues disponibles par la *Direction de l'hydrométrie et des prévisions hydrologiques* du MELCCFP (*Ministère de l'Environnement, de la Lutte aux Changements Climatiques, de la Faune et des Parcs*). Seules les stations hydrométriques (SH) ayant au minimum 6 jaugeages et toujours en opération ont été retenues pour un total de 173 stations. Aussi, seuls les jaugeages en eau libre ont été considérés pour un total de 10 087 jaugeages à savoir une moyenne de 58.3 jaugeages par station (minimum de 9 et maximum de 197 jaugeages). Les années d'opération vont de 1925 à 2023, pour une durée de 3 à 98 années (moyenne de 37.7 années). La Figure 2.1 présente l'histogramme du nombre de jaugeages disponibles aux SH alors que la Figure 2.2 présente l'histogramme du nombre d'années avec des jaugeages.

2.2 Dates des jaugeages et débits spécifiques

Un volet important pour la suite des analyses et l'interprétation des divers résultats concerne les dates où sont effectués les jaugeages et les valeurs des débits jaugés. Les débits spécifiques, correspondant aux débits par unité de surface des bassins versants (BV), ont été considérés afin de permettre une comparaison des débits jaugés aux diverses SH. La Figure 2.3 présente les débits spécifiques jaugés pour l'ensemble des jaugeages à toutes les SH en fonction de la date du jaugeage. Cette figure montre que les jaugeages sont plus fréquemment effectués durant la période d'avril à novembre (voir également la Figure 6.1). Elle montre également que les débits spécifiques au moment des jaugeages sont globalement plus élevés au printemps (avril et mai) et, dans une moindre mesure, en automne (octobre et novembre).

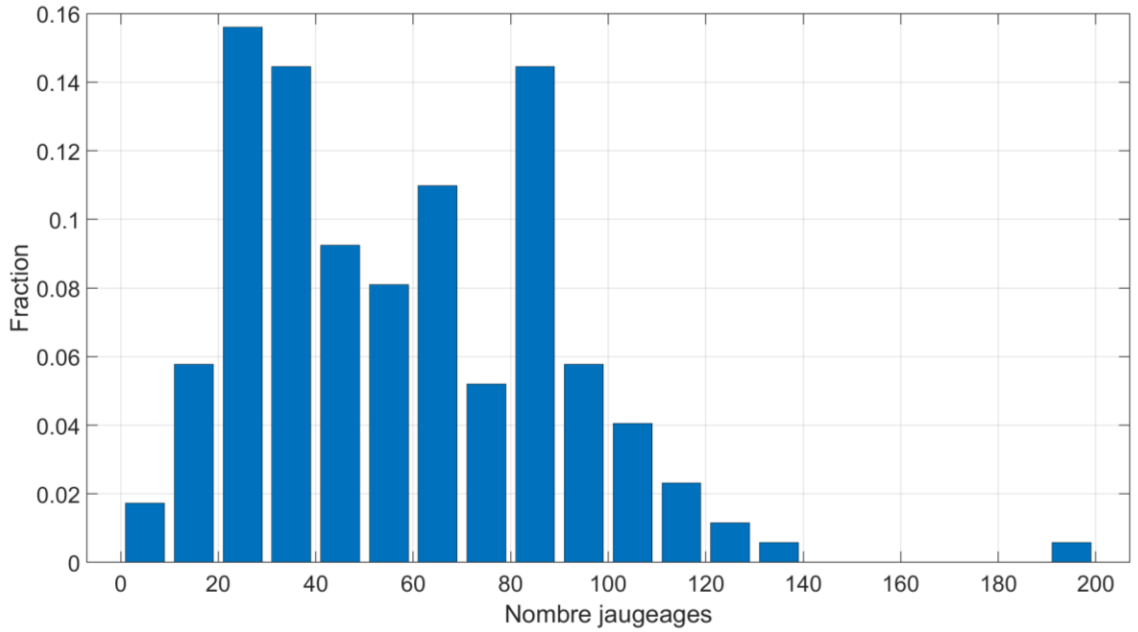


Figure 2.1 - Histogramme de la fraction de stations hydrométriques avec un nombre donné de jaugeages en eau libre.

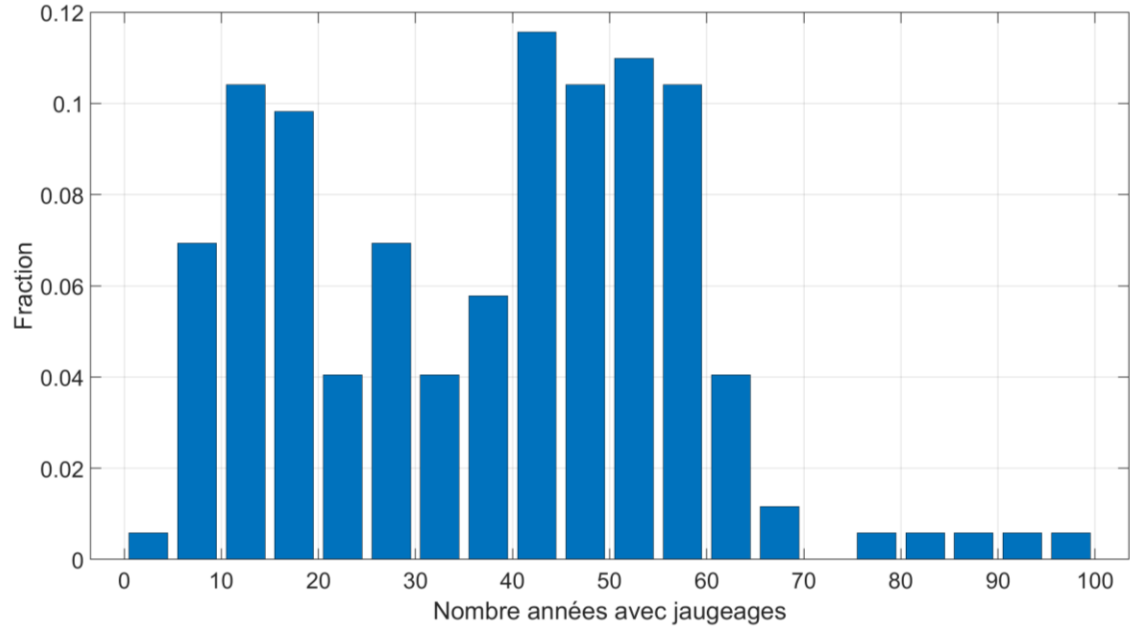


Figure 2.2 - Histogramme de la fraction de stations hydrométriques ayant un nombre donné d'années de jaugeages.

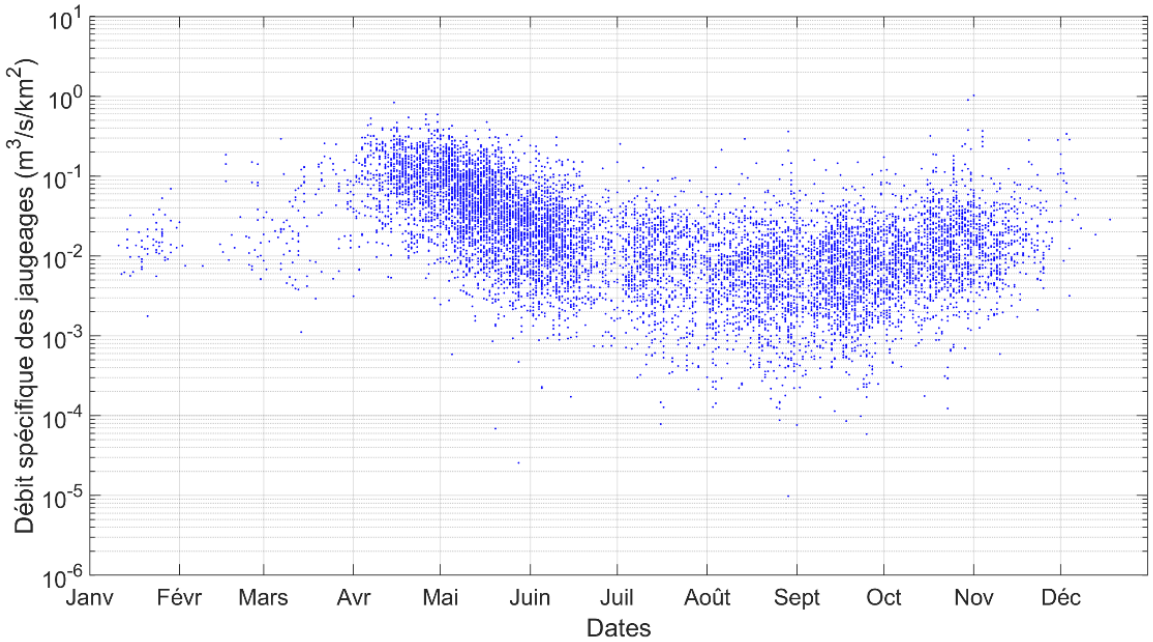


Figure 2.3 - Débit spécifique ($m^3/s/km^2$) pour l'ensemble des jaugeages aux stations retenues en fonction de la date du jaugeage. A noter l'axe des y logarithmique.

CHAPITRE 3. MÉTHODE RÉVISÉE D'AJUSTEMENT DES COURBES DE TARAGE

L'ajustement des courbes de tarage (CT) avait été réalisé jusqu'ici en minimisant la fonction MARE (*Mean Absolute Relative Error* ; voir Section 7.1 de Mailhot *et al*. 2022). Or, un examen plus détaillé des résultats obtenus a révélé l'existence de certains problèmes lorsque cet indicateur de performance est utilisé. En effet, la minimisation de la fonction MARE résulte, sous certaines conditions, en une CT qui s'ajuste exactement aux débits jaugés les plus élevés et, dans une moindre mesure, aux plus petits débits jaugés. Ainsi, pour une SH donnée, les débits jaugés se distribuent aléatoirement autour de la CT pour tous les débits jaugés sauf pour le débit jaugé le plus élevé qui se trouve très souvent exactement sur la CT. Ce résultat, contraire à toute logique, mais correct en ce sens que l'utilisation de la fonction MARE conduit effectivement à ce type de résultat (les analyses qui ont conduit à cette conclusion ne seront pas présentées par souci de concision), a nécessité une modification de la fonction objective utilisée pour ajuster les CT aux jaugeages.

La fonction *Mean Square Relative Error* (MSRE) a donc été utilisée :

$$\mathrm{MSRE} = \frac{1}{\mathrm{N}}\sum_{\mathrm{j}=1}^{\mathrm{N}}\left[\frac{\mathrm{Q_{CT}}(\mathrm{h_j}) - \mathrm{Q_j}}{\mathrm{Q_j}}\right]^2 \tag{3.1}$$

où $(\mathrm{h_j}, \mathrm{Q_j})$ sont les N niveaux et débits jaugés à la SH considérée. L'ajustement des RH aux niveaux et débits jaugés de chaque SH a donc été réalisé en minimisant la fonction MSRE. Pour le reste, la méthode présentée dans Mailhot *et al*. (2022) demeure inchangée. Toutes les analyses ont donc été reprises en considérant cette fonction.

Les sections suivantes présentent une synthèse des résultats obtenus. Il convient de noter que même si les résultats sont modifiés par ce changement de fonction d'optimisation, les principales conclusions présentées dans Mailhot *et al*. (2022) demeurent inchangées. L'Annexe A présente l'ensemble des paramètres des CT ajustées aux séquences de jaugeages des différentes SH alors que l'Annexe B dresse la liste des modèles d'incertitudes retenus pour chaque CT et les paramètres de ces modèles.

3.1 Courbes de tarage

Rappelons que les CT sont représentées mathématiquement par l'équation suivante, appelée régression hydraulique (RH) :

$$\mathrm{Q} = \mathrm{a}\,(\mathrm{h} - \mathrm{b})^{\mathrm{c}} \tag{3.2}$$

où Q est le débit (m^3/sec), h le niveau de l'eau en surface (m) et a, b et c, trois paramètres à ajuster (pour plus de détails voir le Chapitre 7 et plus spécifiquement la Section 7.1 de Mailhot *et al.*, 2022).

La méthode retenue pour construire les CT aux stations procède en deux étapes. La première consiste à segmenter la série temporelle des jaugeages d'une station donnée en sous-séquences. Cette segmentation vise à identifier de possibles modifications des CT au fil du temps causées par des changements géomorphologiques ou du contrôle hydraulique. Ces changements sont déterminés en identifiant les ruptures dans les séries

temporelles des résidus à l'aide du test de Pettitt. Au terme de cet exercice, les périodes et jaugeages à considérer pour construire les CT applicables à chacune de ces périodes sont identifiés. La deuxième étape a pour objectif de déterminer le nombre de RH à utiliser pour représenter chacune des CT de ces périodes en se basant sur le *runs test* de Wald-Wolfowitz. Finalement, les CT sont ajustées aux jaugeages de chaque période. Le Chapitre 7 de Mailhot *et al*. (2022) décrit plus en détail cette procédure. Il est à noter que le nombre minimal de jaugeages d'une période donnée a été fixé à six. Aucune CT n'est ajustée à une période qui compte moins de six jaugeages.

Les séquences de jaugeages ont été classées en trois catégories après partition des séquences (A1, A2, A3) et en cinq catégories (B1, B2, B3, B4, B5) après identification du nombre de RH (voir pour plus de détails Mailhot *et al*. 2022) :

- A1 : Séquences avec moins de 12 jaugeages
- A2 : Séquences avec plus de 12 jaugeages
- A3 : Séquences avec plus de 12 jaugeages et possible modification dans les six premiers ou les six derniers jaugeages de la séquence

- B1 : Séquences avec moins de 12 jaugeages, représentées par une RH
- B2 : Séquences avec 12 jaugeages ou plus, représentées par une RH
- B3 : Séquences avec 12 jaugeages ou plus, représentées par une RH mais avec niveau de transition en-deçà des 6 plus petits, ou au-delà des 6 plus grands niveaux jaugés
- B4 : Séquences avec 12 jaugeages ou plus, représentées par deux RH
- B5 : Séquences avec 12 jaugeages ou plus qui devraient être représentées par plus de deux RH

La distinction entre séquences avec plus de 12 jaugeages et avec moins de 12 jaugeages est nécessaire parce que le test de rupture n'est appliqué qu'aux séquences avec plus de 12 jaugeages. Un total de 348 séquences a été répertorié à la suite de l'application de la procédure. Le nombre de séquences varie entre 1 et 8 (moyenne de 2 par SH), mais la majorité des stations est représentée par une seule séquence (Tableau 3.1). La répartition des séquences selon les catégories est sensiblement similaire à celle de la phase 1 (Tableau 2.2 de Mailhot *et al.*, 2022). Les catégories A2-B2 (69.8%), A1-B1 (16.4%) et A2-B4 (9.2%) sont toujours majoritairement représentées (Tableau 3.2).

Les jaugeages de chaque séquence sont enfin ajustés à une RH (Équation 3.2). Les valeurs des trois paramètres (a, b, c) de chaque CT sont ainsi estimées en minimisant le MSRE (Équation 3.1). Une condition de continuité entre les deux RH est imposée dans le cas où deux RH sont nécessaires pour représenter une CT (voir Section 7.2.2 de Mailhot *et al*., 2023). Les valeurs (a,b,c) estimées aux différentes CT sont présentées à l'Annexe A.

Tableau 3.1 - Nombre de stations avec un nombre donné de séquences

Nombre de séquences par station	Nombre de stations	Nombre de séquences
1	96	96
2	31	62
3	17	51
4	16	64
5	8	40
6	2	12
7	1	7
8	2	16
Total	173	348

Tableau 3.2 - Nombre de séquences (%) selon les diverses combinaisons des catégories (A1, A2, A3) et (B1, B2, B3, B4, B5).

Catégorie	Nombre de séquences (%)	Nombre moyen de jaugeages par séquence
A1-B1	57 (16.4)	8.9
A2-B2	243 (69.8)	30.4
A2-B3	9 (2.6)	42.8
A2-B4	32 (9.2)	49.3
A2-B5	4 (1.1)	47.5
A3-B2	3 (0.9)	17.0
Total	348	30.4

3.2 Modèles d'incertitudes des courbes de tarage

Des modèles d'incertitudes ont ensuite été sélectionnés pour toutes les CT des catégories A1-B1, A2-B2 et A2-B4 ayant 10 jaugeages et plus. La méthodologie décrite à la Section 8.3 de Mailhot *et al*. (2022) a été utilisée. Ces modèles supposent que la distribution des résidus relatifs des jaugeages peut être décrite par une loi normale (N) ou logistique (L), et que l'écart-type (ET) de cette distribution est : 1) constante en fonction du niveau (M1 ; homoscédastique), 2) diminue avec le niveau (M2d), 3) augmente avec le niveau (M2a), 4) diminue pour les petits niveaux, se stabilise, puis augmente pour les grands niveaux (M3) (ET en forme de 'U' ; voir Figure 8.8 de Mailhot *et al*., 2022).

Le Tableau 3.3 donne la répartition des modèles d'incertitudes sélectionnés pour l'ensemble des CT. Les modèles utilisant la loi normale dominent avec 67.2%. Les modèles homoscédastiques (M1) sont également les plus représentés (75.0%), suivi des modèles où l'erreur relative diminue avec le niveau (M2d). Une seule CT a un modèle d'incertitude où l'erreur relative diminue avec le niveau (M2d) et aucune avec un ET en forme de 'U'. Le fait d'utiliser le MSRE au lieu du MARE a pour conséquence d'augmenter le ratio de modèles où la distribution normale est sélectionnée et d'augmenter la fraction de modèles homoscédastiques M1.

La Figure 3.1 montre les distributions des valeurs des ET des CT associées aux modèles N-M1 et L-M1. On observe que les ET de la loi logistique sont légérement plus élevés. Les valeurs médianes sont de 5.1% pour la loi normale et de 5.7% pour la loi logistique et les valeurs moyennes correspondantes de 6.2% et 7.0% respectivement. Les ET les plus élevés sont de l'ordre de 25 % et 10% des CT avec loi normale ont des ET de plus de 10% alors que 18% des CT avec une loi logistique ont un ET supérieurs à 10%. Un examen plus attentif des cas avec des ET élevés serait souhaitable afin de s'assurer du réalisme des modèles d'incertitudes sélectionnés (voir la Section 3.3).

Tableau 3.3 - Nombre de CT (%) selon le modèle d'incertitude sélectionné. À noter que les modèles M3 et L-M2a ne sont jamais sélectionnés.

Modèle d'incertitude	Nombre de CT (%)
N-M1	141 (47.6)
N-M2d	57 (19.3)
N-M2a	1 (0.3)
TOTAL N	199 (67.2)
L-M1	81 (27.4)
L-M2d	16 (5.4)
TOTAL L	97 (32.8)

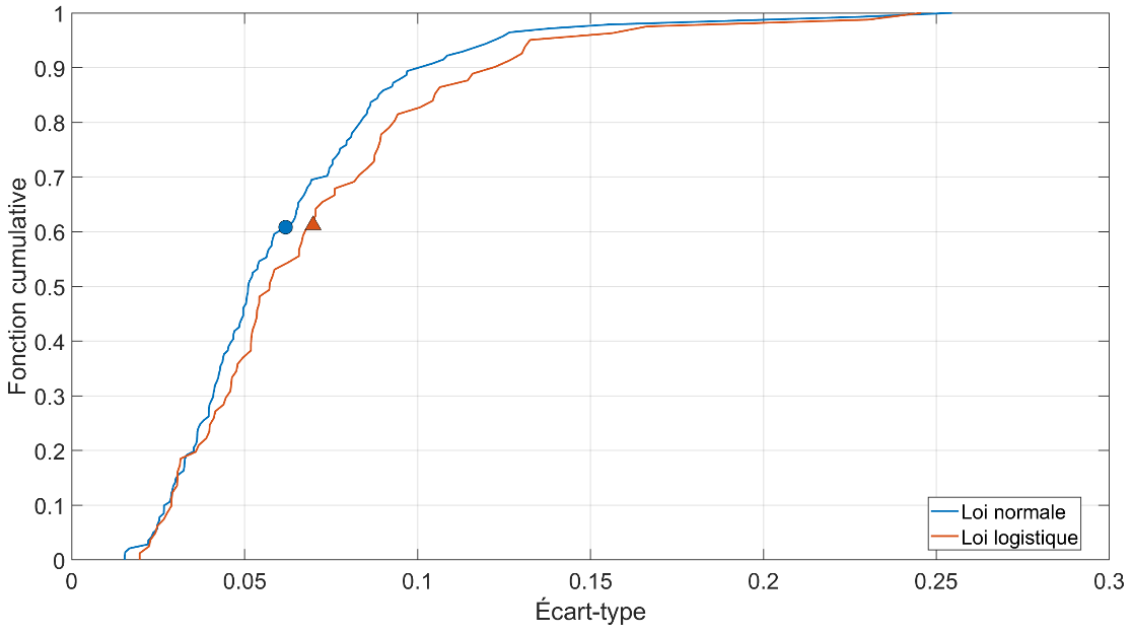


Figure 3.1 – Fonctions cumulatives des écarts-types des 141 CT avec modèles d'incertitude représentées par une loi normale homoscédastique (N-M1) et les 81 CT représentées par une loi logistique homoscédastique (L-M1). Le point bleu correspond à la moyenne des ET des CT représentées par la loi normale et le triangle rouge à la moyenne des ET des CT représentées par la loi logistique.

On définit le niveau normalisé h' de la façon suivante :

$$h' = \frac{(h - PPNJ)}{(PGNJ - PPNJ)} \tag{3.1}$$

avec PPNJ le plus grand niveau jaugé et PGNJ, le plus grand niveau jaugé de la CT et on a 0 < h' < 1. La Figure 3.2 présente les distributions des valeurs des ET pour les 57 CT associées aux modèles N-M2d et les 16 CT associés au modèle L-M2d en fonction du niveau normalisé. On voit que les ET croissent de façon très importante près de h' = 0, c.-à-d. près du PPNJ. A noter deux valeurs supérieures à ET = 0.8 ne sont pas présentées à la Figure 3.2 (ET = 1.0 et ET = 1.5). Ces augmentations sont globalement plus marquées pour les modèles utilisant la loi logistique que ceux utilisant de la loi normale. Un examen des CT avec des ET très élevés près de h = 0 serait souhaitable afin de vérifier le réalisme des modèles d'incertitudes sélectionnées (voir la Section 3.3).

Les Figures 3.3, 3.4 et 3.5 présentent trois exemples de CT avec leurs modèles d'incertitudes.

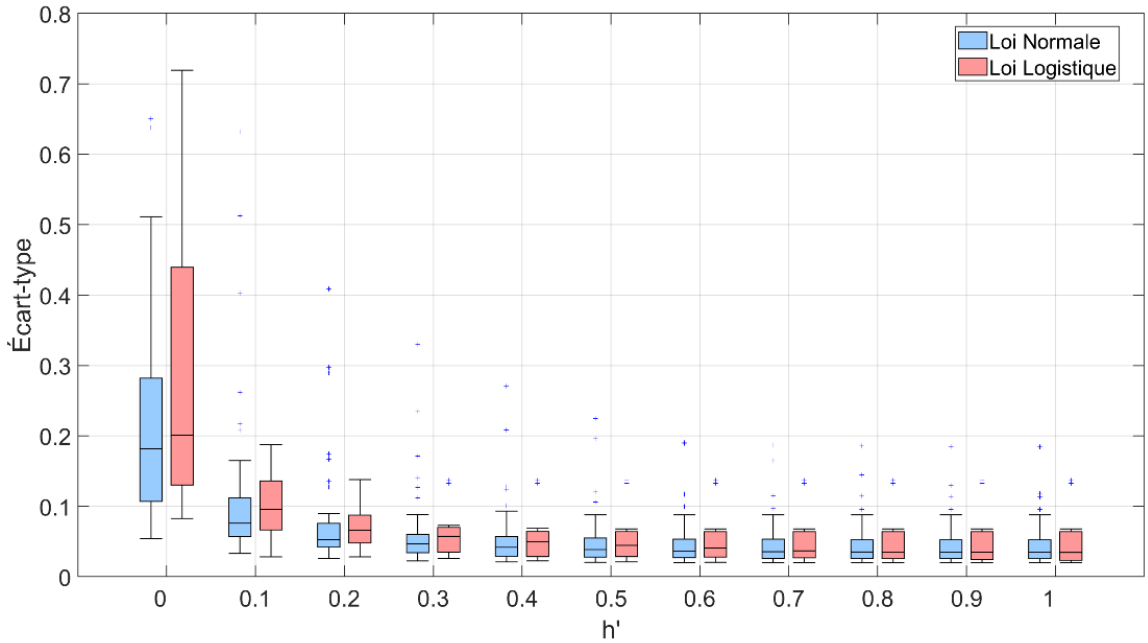


Figure 3.2 – Distributions des écarts-types des 57 CT avec modèles d'incertitude représentés par une loi normale hétéroscédastique (N-M2d) et les 16 CT représentés par une loi logistique hétéroscédastique (L-M2d). L'axe des x correspond au niveau h' (voir équation 3.1) subdivisé en intervalle $\Delta h' = 0.1$. A noter que l'axe des y a été tronqué à ET = 0.8. Deux valeurs supérieures à cette valeur ne sont pas présentées (ET = 1.0 et ET = 1.5).

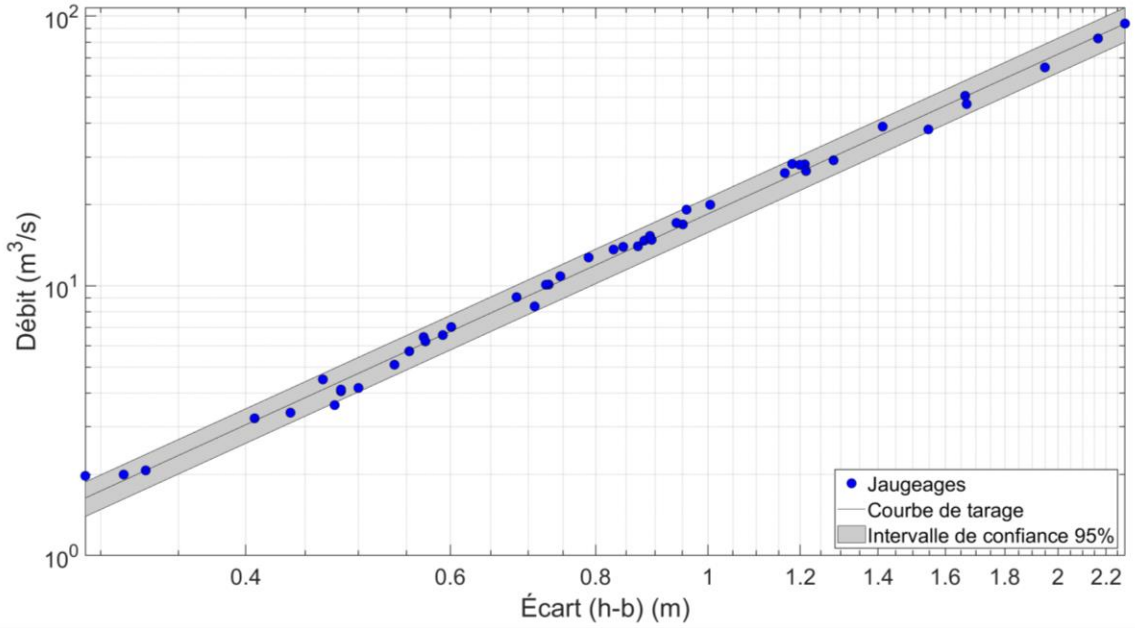


Figure 3.3 – CT et intervalles de confiance 95% de la station Mitchinamecus (040619) comportant 45 jaugeages couvrant la période 1977-2019, représentée par une RH et où le modèle L-M1 a été sélectionné. A noter les échelles des x et y logarithmiques.

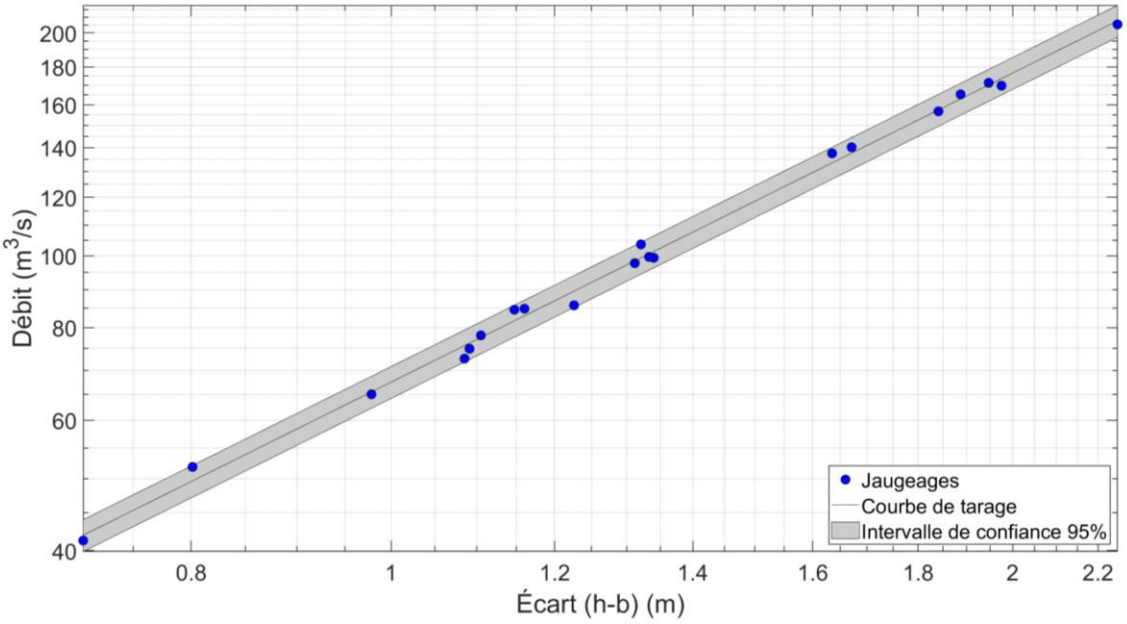


Figure 3.4 - CT et intervalles de confiance 95% de la station Du Lièvre (040624) comportant 20 jaugeages couvrant la période 1979-1990, représentée par une RH et où le modèle N-M1 a été sélectionné. A noter les échelles des x et y logarithmiques.

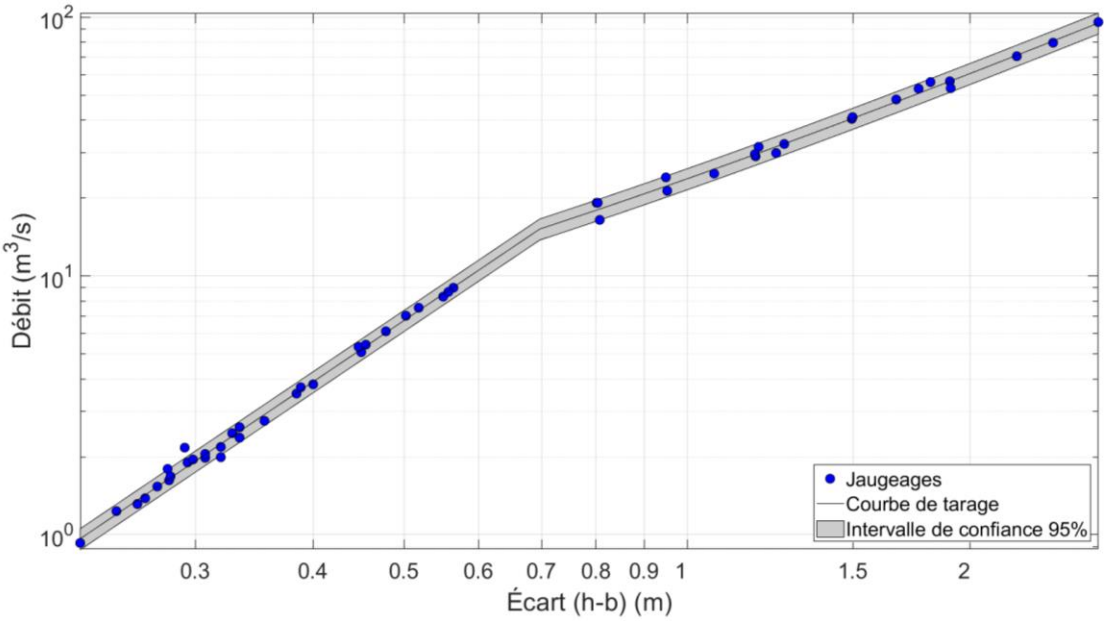


Figure 3.5 - CT et intervalles de confiance 95% de la station Décharge du lac Matapédia (011508) comportant 52 jaugeages couvrant la période 1996-2022, représentée par deux RH et où le modèle L-M1 a été sélectionné. A noter les échelles des x et y logarithmiques.

3.3 Cas particuliers

Quatre groupes de CT ont été examinés plus attentivement :

a. CT homoscédatiques avec des ET > 0.15 (8 CT);
b. CT avec modèle M2d et ET(h' =0) > 0.3 (18 CT) ;
c. CT avec modèle M2d (1 CT
d. CT du groupe A2-B5 (CT avec 12 jaugeages ou plus pour lesquelles plus de deux RH seraient nécessaires) (4 CT).

Les paragraphes qui suivent présentent les principales conclusions résultant de l'examen des CT de chacun de ces groupes.

a. CT homoscédatiques avec ET > 0.15 : Les huit CT de ce groupe sont présentées en Annexe C. Chacune de ces CT a été examinée et les principaux constats de ces examens apparaissent à la colonne 'Commentaires' du Tableau C.1. Pour la quasi-totalité des cas, les ET élevés s'expliquent par la présence d'un jaugeage plus éloigné de la CT qui gonfle artificiellement les ET (la Figure 3.6 présente l'exemple de la CT de la période 2005-2012 à la station Saint-Pierre). Ceci montre l'importance du contrôle de qualité des jaugeages réalisé par les professionnels du ministère dans la sélection des jaugeages pour l'élaboration des courbes de tarage. Il convient aussi de noter que quatre de ces huit CT comptent moins de 20 jaugeages. Enfin, deux CT des stations Saint-Pierre (052235) et Dauphine (120201) apparaissent au Tableau C.1. On peut donc présumer que les conditions hydrauliques à ces stations font en sorte d'augmenter les incertitudes sur les jaugeages ou encore entraînent des modifications fréquentes de la relation niveau-débit que la procédure développée n'est pas à même de détecter.

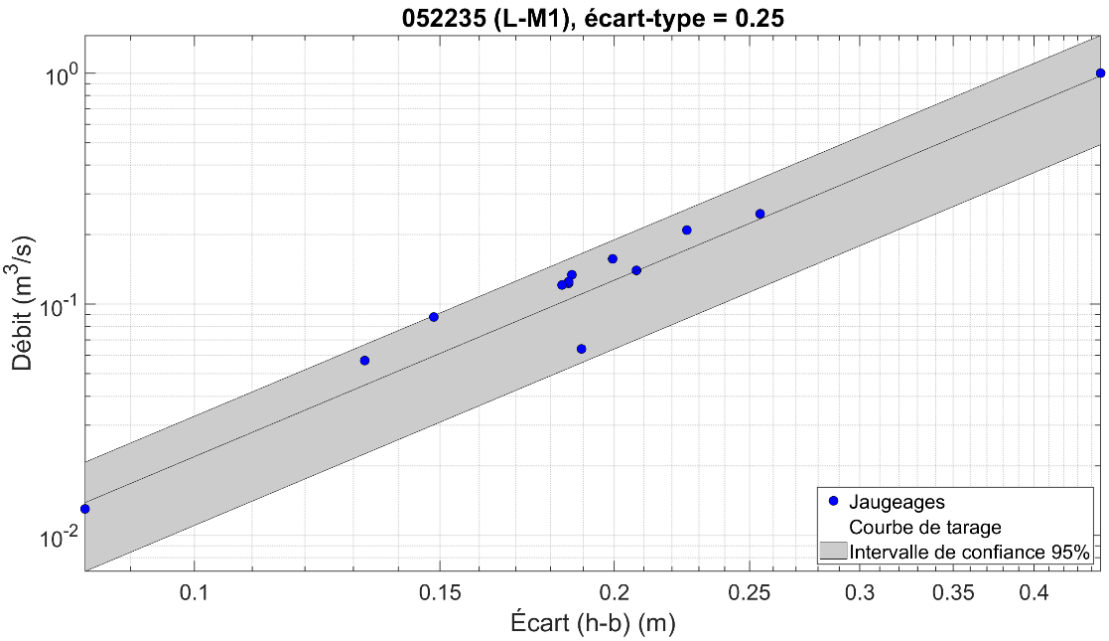


Figure 3.6 – Exemple de CT couvrant la période 2005-2012 à la station Saint-Pierre 052235 comportant 13 jaugeages et pour laquelle le modèle homoscédatique (N-M1) a été sélectionné. A noter les échelles des x et y logarithmiques.

b. CT avec modèle M2d et ET(h' =0) > 0.3 : Les 18 CT de ce groupe sont présentées au Tableau C.2 de l'Annexe C. Un examen de ces CT montre qu'en effet la dispersion des écarts relatifs entre CT et jaugeages augmente pour les plus petits niveaux parfois de façon démesurée et ce afin d'inclure certains jaugeages qui s'écartent de la CT. Le modèle d'incertitude semble très sensible aux jaugeages trop éloignés de la CT ce qui produit un effet de 'trompette' tel que celui de la Figure 3.7 (CT de la période 2014-2022 à la station Boyer Sud). On voit clairement que le modèle d'incertitude cherche dans ce cas à inclure le PPNJ dans son enveloppe. Le modèle d'incertitude M2d est donc mal apapté et devrait être revu dans plusieurs cas. Ces résultats suggèrent aussi que les incertitudes sur les débits jaugés en conditions de faible hydraulicité sont parfois importantes. Des changements de contrôle hydraulique pourraient expliquer ces écarts. Il est à noter que 13 CT avec le modèle M2d ont des ET à h'=0 compris entre 20% et 30%. Un examen de ces CT montre qu'en général elles semblent réalistes.

c. CT avec modèle M2a : Une seule CT appartient à ce groupe à savoir la CT de la période 1983-2021 à la station Vermillon (050144). Elle a été ajustée aux 54 jaugeages disponibles et le modèle N-M2a a été sélectionné. L'examen de cette CT (Figure 3.8) montre, tout comme pour plusieurs CT où le modèle M2d a été sélectionné, que les incertitudes sont fortement influencées par les jaugeages près du PGNJ, incluant ce dernier, qui s'écartent de la CT. L'ET au niveau du PGNJ est de 32.8%. L'effet 'trompette' est encore présent et suggère que ce modèle d'incertitude n'est peut-être pas le plus approprié. Des jaugeages supplémentaires dans cette partie de la CT permettraient sans doute d'identifier les causes possibles de ces écarts.

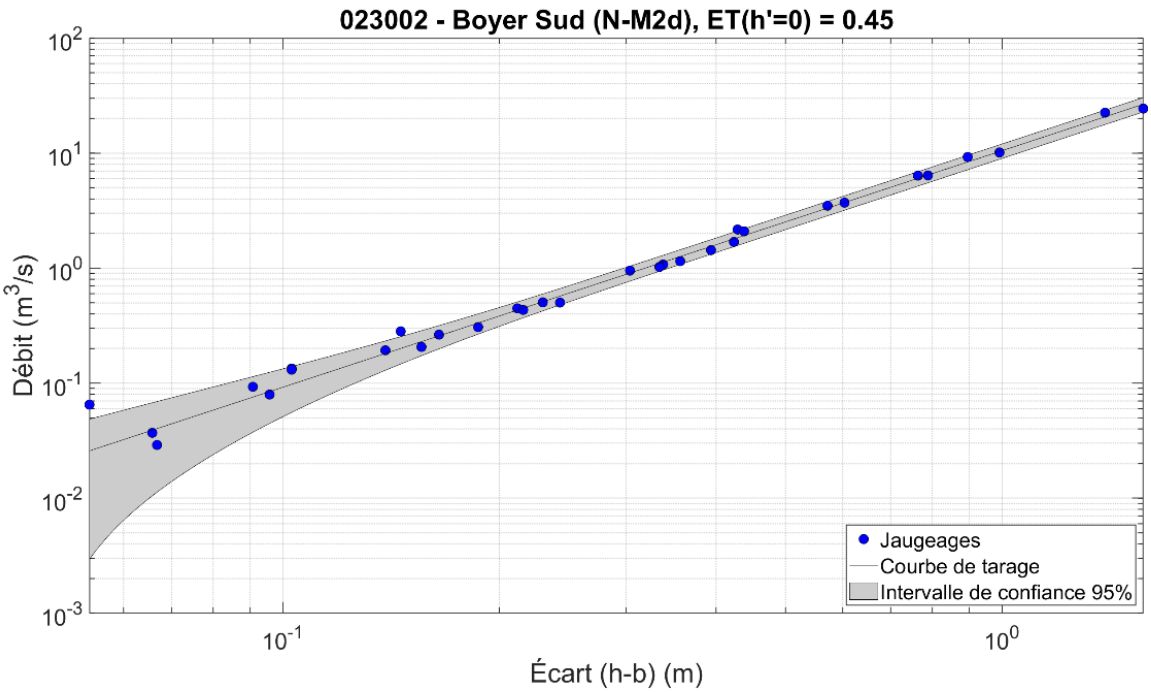


Figure 3.7 – Exemple de CT couvrant la période 2014-2022 à la station Boyer Sud (023002) comportant 32 jaugeages et pour laquelle le modèle hétéroscédastique (N-M2d) a été sélectionné et où l'écart-type au PPNJ est de 45%. A noter les échelles des x et y logarithmiques.

d. CT avec 12 jaugeages ou plus nécessitant plus de deux RH (groupe A2-B5) : Quatre CT appartiennent à ce groupe (ces CT sont présentées à l'Annexe D). Un examen de ces CT confirme que tous ces cas sont problématiques. Ainsi pour la station Bonaventure (010802), la dispersion des jaugeages pour les niveaux inférieurs au niveau de transition soulève des questions (Figure D.1). Pour la station Sainte-Anne (021407), la dispersion des jaugeages est très importante notamment dans la partie des faibles niveaux (Figure D.2). Le niveau de transition pour la CT à la station Du Loup est près du PPNJ et une autre modification dans la CT semble se produire autour de (h-b) égale à 1 m (Figure D.3). Enfin pour la station À l'Ours (030429), un jaugeage est totalement décalé de la CT et crée une distorsion dans la forme de la CT (Figure D.4). La justesse et la qualité de ce jaugeage devrait être réévalué. En résumé, un examen des jaugeages douteux est nécessaire dans ces cas et les CT devront être réajustées advenant que ces jaugeages soient jugés de qualité douteuse et écartés des analyses.

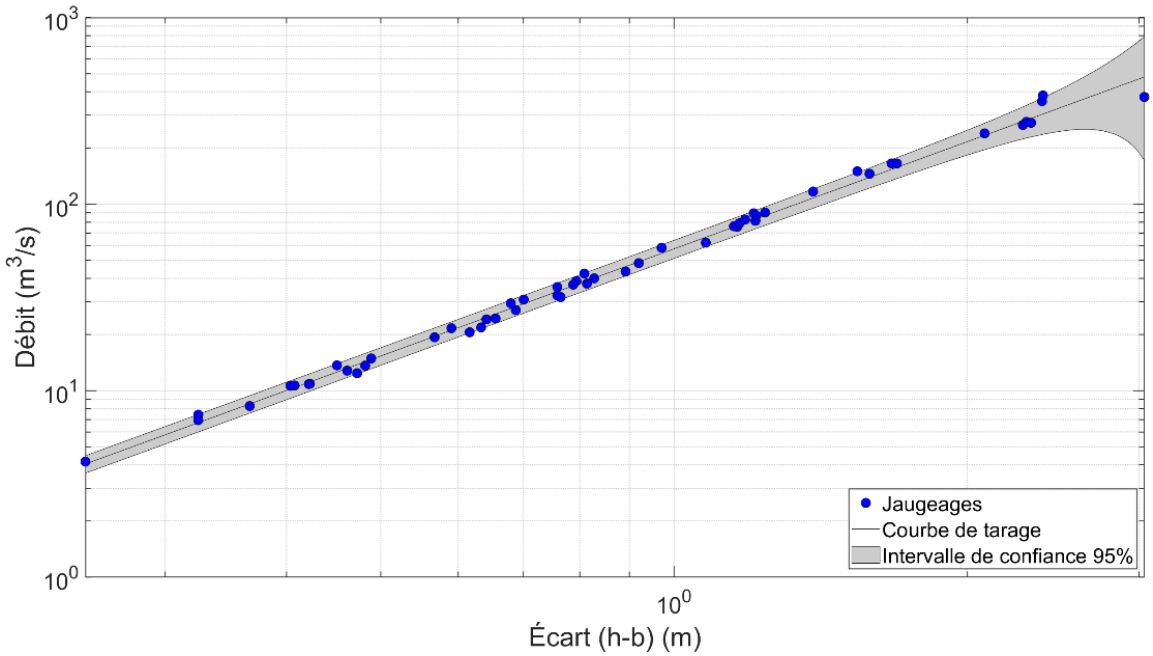


Figure 3.8 – CT de la période 1983-2021 à la station Vermillon (050144) comportant 54 jaugeages et pour laquelle le modèle M2a (écart-type croissant avec le niveau) a été sélectionné. A noter les échelles des x et y logarithmiques.

3.4 Courbes de tarages et modèles d'incertitudes : conclusions et perspectives

Une révision de la procédure d'ajustement des CT a été nécessaire. L'ajustement est dorénavant réalisé en minimisant les écarts relatifs carrés moyens (*Mean Square Relative Error*) entre la CT représentée par une régression hydraulique (RH) et les jaugeages. Outre cette modification, la procédure de construction des CT demeure en tout point identique à celle décrite dans Mailhot *et al*. (2022).

Les CT et les modèles d'incertitudes obtenus après application de cette nouvelle procédure ont été présentés. Ainsi 89.9% des CT sont représentées par une RH, alors que 9.2% sont représentées par deux RH. Les 0.9% restant devraient être représentées par plus de 2 RH (ces derniers cas sont discutés à la Section 3.3 et présentés à l'Annexe D).

Les modèles d'incertitudes considérés considèrent deux distributions statistiques, les lois normale (N) et logistique (L), et quatre modèles pour décrire l'évolution des écarts-types (ET) de ces distributions en fonction du niveau, un modèle homoscédastique (ET constant) et trois modèles hétéroscédastiques (ET augmente, diminue, ou diminue puis augmente en fonction du niveau). Au terme des analyses, la loi normale est sélectionnée pour 67.2% des CT et le modèle homoscédastique pour 89.4% des CT. Ainsi la loi normale homoscédastique est sélectionnée pour 47.6% des CT, suivie de la loi logistique homoscédastique avec 41.8% des CT, et des lois normales et logistiques hétéroscédastiques (ET décroissant avec le niveau) avec 22.6% et 14.2% des CT respectivement.

Les ET médians pour les CT avec des modèles d'incertitudes homoscédastiques sont de 5.1% pour la loi normale et de 5.7% pour la loi logistique. Ces valeurs sont comparables aux valeurs de la littérature (voir par exemple McMillan *et al*., 2012). Elles sont représentatives des incertitudes sur les débits estimés dans la partie interpolée des CT et sont supposées représentatives des incertitudes sur les débits estimés dans les parties extrapolées à défaut d'estimation plus précise des incertitudes dans ces parties des CT. Les résultats du Chapitre 7 montrent toutefois qu'elles croissent très rapidement lorsque l'on s'approche des PPNJ ou du PGNJ et que l'on transite dans les parties en extrapolation.

Un examen plus attentif des cas homoscédastiques avec des ET plus élevés montre que plusieurs CT demeurent problématiques. Pour la quasi-totalité des cas, les ET élevés s'expliquent par la présence d'un jaugeage 'marginal', plus éloigné de la CT que les autres, qui gonfle les ET estimés. Un contrôle de qualité supplémentaire de ces jaugeages par les professionnels du ministère serait donc nécessaire montrant encore l'importance du rôle de l'hydrologue lors de la sélection des jaugeages retenus pour l'élaboration des courbes de tarage. L'élimination éventuelle de ces jaugeages diminuerait significativement les ET à ces CT. Ces cas demeurent toutefois marginaux puisque 2% des CT avec incertitudes homoscédastiques ont des ET supérieurs à 20%.

Un effet de 'trompette' (élargissement des incertitudes près du PPNJ) est observé pour plusieurs des CT hétéroscédastiques. Ce type de modèle est souvent sélectionné afin d'intégrer les écarts plus importants du PPNJ ou des plus petits niveaux jaugés. Bien que l'on puisse se questionner quant au réalisme de ce modèle d'incertitude, il peut être symptomatique d'un changement progressif de contrôle pour les faibles niveaux ou d'incertitudes plus importantes sur les plus petits débits jaugés. L'ajout de jaugeages pour cette gamme de niveau sera nécessaire afin d'adéquatement représenter la relation niveau-débit pour cette gamme de niveau et ainsi obtenir une CT et un modèle d'incertitude plus représentatif que le modèle M2d qui semble mal adapté dans plusieurs cas. Plusieurs jaugeages 'suspects' devraient également faire l'objet d'un examen complémentaire. Ces résultats sont globalement cohérents avec ceux rapportés au Chapitre 7 qui montrent que les écarts entre débits des CT et débits jaugés augmentent très rapidement lorsque l'on se rapproche du PPNJ et que l'on progresse dans la zone d'extrapolation en deçà du PPNJ.

Les quatre CT avec 12 jaugeages ou plus et nécessitant possiblement un ajustement à plus de deux RH (groupe A2-B5) ont été examinés. Il appert que ces CT sont problématiques. En effet, les niveaux de transitions identifiés sont parfois questionnables et certains jaugeages sont aussi sujets à caution. Ces CT devraient être l'objet d'analyses complémentaires.

CHAPITRE 4. EXPOSANTS HYDRAULIQUES

Le paramètre c est appelé exposant hydraulique et peut être associé au type de contrôle hydraulique au site de mesure. Ces valeurs peuvent donc être comparées aux valeurs 'standards' de différents ouvrages hydrauliques tels que les déversoirs de différents profils (p. ex. rectangulaire, triangulaire) ou encore aux valeurs d'écoulement en régime permanent uniforme décrit par l'équation de Manning. Le présent chapitre compare les valeurs des exposants des différentes CT aux valeurs de ces ouvrages.

4.1 Distribution des exposants hydrauliques

La Figure 4.1 présente les fonctions de répartition des distributions des valeurs des exposants estimés pour l'ensemble des CT sous étude (voir Annexe A). Les exposants sont regroupés en trois catégories :

- Les exposants des 312 CT représentées par une RH (1 RH);
- Les deux exposants des 36 CT représentées par deux RH, le premier pour les petits niveaux (2 RH – c1) et le second pour les niveaux élevés (2 RH – c2).

Un examen de la Figure 4.1 montre que :

- 79 % des exposants des CT représentées par une RH se trouvent compris entre les valeurs 3/2 et 8/3;
- Dans le cas des CT à 2 RH, les exposants associés aux petits niveaux (2 RH – c1) sont plus grands que les exposants associés aux grands niveaux (2 RH – c2);
- Les exposants les plus élevés sont observés pour les petits niveaux des CT représentées par 2 RH (2 RH - c1). Ainsi 53% de ces CT (17 CT sur 32) ont des valeurs supérieures à 8/3 (écoulement uniforme permanent peu profond dans un canal de section triangulaire);
- Les exposants les plus faibles sont observés pour les petits niveaux des CT représentées par 2 RH (2 RH - c1). Des valeurs de c1 < 1 sont même estimées pour 3 CT (ces cas sont examinés plus attentivement à la Section 4.2).

Même si une majorité de valeurs de c sont comparables aux valeurs de plusieurs ouvrages hydrauliques standards, il n'en demeure pas moins que certaines valeurs sont élevées ou inférieures à 1. La section suivante examine plus attentivement ces cas.

4.2 Exposants hydrauliques atypiques

Des valeurs nettement supérieures à 8/3 sont estimées pour les trois catégories de CT (Figure 4.1). Les Tableaux E.1 et E.2 de l'Annexe E dressent la liste des CT avec des exposants supérieurs à trois (c > 3) que nous désignerons dans ce qui suit comme 'atypiques'.

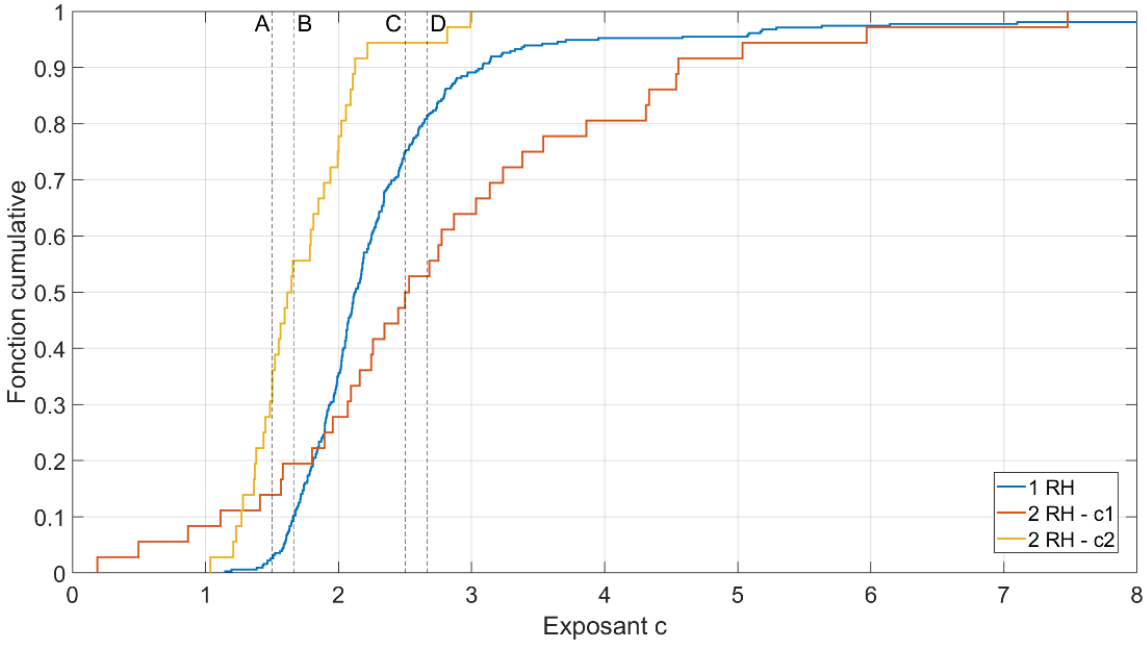


Figure 4.1 - Fonctions de répartition des exposants c des 312 CT représentées par une RH (1 RH) et des 36 CT représentées par deux RH (2 RH) avec c1 l'exposant associé aux petits niveaux et c2 aux exposants des plus grands niveaux. Les lignes verticales en tiret correspondent aux valeurs de l'exposant c pour : A) déversoir de section rectangulaire (c = 3/2) ; B) écoulement uniforme permanent peu profond dans un canal de section rectangulaire (c = 5/3) ; C) déversoir de section triangulaire (c = 5/2) ; D) écoulement uniforme permanent peu profond dans un canal de section triangulaire (c = 8/3). A noter que l'axe des x a été tronqué à c = 8 par souci de lisibilité (six CT avec une RH ont des exposants supérieurs à 8 et sont indiquées en gris dans le Tableau E.2 de l'Annexe E).

Le Coz *et al*. (2014) soulignent que des valeurs supérieures à 8/3 devraient être considérées 'suspectes' puisque supérieures à la gamme des exposants d'ouvrages standards. De même Hrafnkelsson *et al*. (2022) mentionnent que les valeurs de l'exposant c devraient être comprises dans l'intervalle [1.0, 2.67]. Or 18.6% des CT à 1 RH ont des exposants supérieurs à 8/3. Pour les CT à deux RH, 47.2% des exposants associés aux faibles niveaux et 5.6% de ceux associés aux niveaux élevés sont supérieurs à 8/3 (Figure 4.1 et Annexe E).

L'intervalle de valeurs [1.0, 2.67] rapporté par Hrafnkelsson *et al*. (2022) est basé sur une analyse des équations de Manning et de Chézy décrivant un écoulement uniforme permanent avec des profils de diverses formes. Une forme générique de ces sections qui inclut comme cas spécifiques les sections rectangulaires, triangulaires, paraboliques (ou convexe) et paraboliques inverses (ou concave) est considérée par ces auteurs (voir Figure 2 de Hrafnkelsson *et al*., 2022). L'intervalle proposé ne concerne toutefois que les trois premiers profils, le profil parabolique inverse n'étant pas considéré puisque jugé peu vraisemblable pour un cours d'eau naturel par ces auteurs. Cependant, en reprenant les équations de Hrafnkelsson *et al*. (2022), on peut montrer que les valeurs de l'exposant dans le cas parabolique inverse sont comprises dans l'intervalle [11/3, 13/3] ou [3.67, 4.33]. De façon plus générale, il est possible d'obtenir des exposants supérieurs à 8/3

lorsque les berges sont de forme concave ce qui pourrait être une situation vraisemblable lorsque l'on transite du lit mineur à la plaine inondable.

Dans le cas où le contrôle est à une section critique, on peut montrer que les valeurs de c peuvent également être supérieures à 8/3 lorsque les berges sont de formes concaves et que cette valeur continue d'augmenter au fur et à mesure que la concavité des berges augmente (voir Annexe A de Mailhot *et al.*, 2023). Il est intéressant de noter que l'exposant pour un écoulement uniforme (tronçon de contrôle) dans un tronçon de forme triangulaire est 8/3 (2.67) alors que cette valeur est de 3/2 (1.5) à une section critique de même forme.

Il est donc possible d'obtenir des exposants c supérieurs à 8/3 tant à une section de contrôle qu'à un tronçon de contrôle lorsque les berges sont concaves. Ainsi certaines des valeurs obtenues pourraient s'expliquer de cette façon. Cependant, les valeurs atypiques de c sont également susceptibles de se produire dans les situations suivantes :

1. **Nombres de jaugeages disponibles et gamme de niveaux jaugés** : Plusieurs exposants atypiques sont observés lorsque le nombre de jaugeages disponibles est petit (Tableaux E.1 et E.2) ou encore que la gamme de niveau jaugé demeure petite. Ainsi pour les CT à 1 RH, 65% des 34 CT recensées comptent 16 jaugeages ou moins, et 29% 10 jaugeages ou moins. Ce faible nombre de jaugeages peut conduire à une sous-représentation de certaines conditions d'écoulement, p. ex. lorsque les jaugeages couvrent de façon disproportionnée des régimes de faibles débits. Ceci est le cas notamment pour les trois CT avec c1 < 1 qui comptent toutes 12 jaugeages ou moins. De même, la gamme de niveaux jaugés et de débits jaugés demeure petite et ce même si le nombre de jaugeage peut sembler important. Ce faisant l'ajustement de la RH est plus incertaines et peut conduire à des valeurs d'exposants 'atypiques'.

2. **Stations avec barrages en aval** : La présence de barrages en aval des SH est déterminante sur la valeur de l'exposant hydraulique. Ainsi deux des cas où l'approche BaRatin a été appliquée, les SH Gordon (048603) et Noire (030304), se trouvent an aval de barrage (voir la Section 9.2). Or les exposants pour ces deux CT sont atypiques avec c = 11.3 pour la SH Gordon et c1 = 0.87 pour la RH associée aux petits niveaux pour la SH Noire. Qui plus est, le nombre de jaugeages demeure modeste dans les deux cas avec 10 jaugeages pour Gordon et 12 jaugeages pour Noire (le nombre de jaugeages pour la RH associée aux niveaux élevés est beaucoup plus important avec 76 jaugeages). De plus, l'opération du barrage et la régularisation des débits pourra faire en sorte que la gamme de niveaux jaugés est plus petite, ce qui pourrait contribuer à obtenir des RH avec des exposants atypiques.

3. **Stations en amont d'un seuil :** Bien que ce type de configuration soit assez fréquent, la présence d'un seuil et d'un bassin amont où les mesures des niveaux sont réalisées semble problématique dans les cas où le seuil émerge ou est près d'émerger en conditions de faibles niveaux. Le seuil fixe une limite en deçà duquel le niveau ne peut descendre et où la mesure des débits jaugés est difficile. La présence de plusieurs jaugeages dans une gamme de bas niveaux de ce type pose alors problème pour l'ajustement de la CT. Ainsi les valeurs ajustées du paramètre b

pourront être irréalistes dans certains cas et être associées à des valeurs du paramètre a presque nulles et de l'exposant c très élevés.

4. **Effet de compensation entre les paramètres a et c** : Il appert sous certaines conditions, p. ex. lorsque les petits niveaux jaugés sont surreprésentés dans les jaugeages et que très peu de jaugeages à des grands niveaux sont disponibles, que l'ajustement de la CT conduit à des valeurs du paramètre a très petites et des valeurs de l'exposant c très élevées. Ceci semble notamment être le cas pour certaines SH localisées en amont de seuil (voir paragraphe précédent).

4.3 Exposants hydrauliques : conclusions et perspectives

Les exposants hydrauliques des CT fournissent une information sur le type de contrôle hydraulique en place au site de mesure. Ces exposants ont donc été comparés aux valeurs de divers ouvrages hydrauliques standards (déversoirs avec différents profils, relation débit-niveau obtenue à partir de l'équation de Manning pour certains profils sous certaines conditions d'écoulement) dont les valeurs sont comprises *grosso modo* entre 1 et 3.

Bien que la très grande majorité des exposants soit comprise entre 1 et 3, certains exposants, dits 'atypiques' ($c < 3$ ou $c < 1$), sont estimés pour plusieurs CT. Un examen de ces cas a permis d'émettre quatre hypothèses pouvant expliquer ces exposants atypiques : 1) faible nombre de jaugeages et gamme de niveaux jaugés limitée; 2) stations influencées par la présence ou l'opération de barrages en amont; 3) stations en amont de seuil émergeant en conditions d'étiage; 4) effet de compensation entre les paramètres a et c des régressions hydrauliques. Un examen plus détaillé serait cependant nécessaire pour identifier précisément laquelle ou lesquelles de ces hypothèses peut expliquer ces exposants atypiques. Un tel travail permettrait également d'identifier le ou les contrôles hydrauliques de chaque site.

CHAPITRE 5. EFFET DE L'ÉCOULEMENT EN RÉGIME NON PERMANENT

Ce chapitre décrit les travaux réalisés sur les impacts des conditions d'écoulement en régime non permanent sur les débits estimés à partir des CT. Ce chapitre comporte trois sections. La première (Section 5.1) explique en quoi des conditions d'écoulement en régime non permanent peuvent affecter les débits estimés à partir de la CT et résulter en un effet d'hystérésis. La deuxième (Section 5.2) reprend l'approche présentée dans Mailhot *et al.* (2023) et présente un sommaire des résultats obtenus. La dernière section (Section 5.3) présente un résumé des principales conclusions sur les impacts des conditions d'écoulement en régime non permanent sur les CT et discute de certaines perspectives de recherche sur le sujet.

5.1 Considérations générales

La relation niveau-débit représentée par les CT repose notamment sur l'hypothèse que l'écoulement est en régime permanent. Or cette hypothèse n'est généralement pas rencontrée sur le terrain et sera particulièrement mise à mal en phase de crue soudaine ou d'importante décrue. La question est donc de savoir dans quelle mesure les débits estimés à partir de la CT deviennent incertains dans le cas d'écoulements transitoires.

La Figure 5.1, tirée de Perret *et al*. (2022), explique comment la relation niveau-débit est modifiée en conditions d'écoulement non permanent (ou transitoire) et l'effet d'hystérésis qui en résulte. Ainsi en phase ascendante des hydrogrammes, les débits seront supérieurs aux débits estimés par la CT (sous-estimation des débits par les CT), alors qu'en phase de décrue ces mêmes débits seront inférieurs aux débits obtenus des CT (surestimation des débits par les CT). L'ampleur de l'effet d'hystérésis est donc fonction de la rapidité de la crue ou de la décrue mais également de la configuration locale du tronçon (voir section suivante).

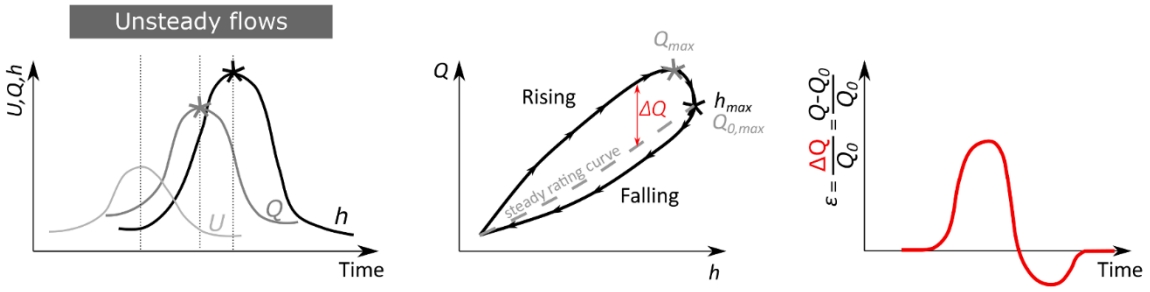


Figure 5.1 - Impacts des conditions d'écoulement en régime non permanent (ou transitoire) sur l'évolution temporelle des vitesses moyennes d'écoulement U, des débits Q et des hauteurs d'eau h (à gauche); relation hauteur-débit en conditions transitoires et effet d'hystérésis (au centre); écarts relatifs entre débits estimés à partir des CT et débits en conditions d'écoulement transitoire (à droite). (Figure tirée de Perret *et al*. 2022).

On peut montrer sous certaines conditions (hypothèse de l'onde cinématique; Perret *et al*. 2022; Muste *et al*., 2020) que le débit en condition transitoire Q peut s'exprimer en fonction du débit en régime permanent $\mathrm{Q_0}$ sous la forme :

$$\mathrm{Q} = \mathrm{Q_0}\sqrt{1 + \frac{1}{\mathrm{c\,S_0}}\frac{\mathrm{dh}}{\mathrm{dt}}} \tag{5.1}$$

où c'est la célérité de l'onde de crue, $\mathrm{S_0}$ la pente du tronçon et $\mathrm{dh/dt}$ la variation de niveau en fonction du temps. Cette équation est connue sous le nom d'équation de Jones (Jones 1915). Ainsi selon cette équation, la différence entre Q et $\mathrm{Q_0}$ sera d'autant plus importante que la pente sera faible et la variation temporelle du niveau sera grande. Ces deux variables, pente du tronçon et taux de variation temporelle du débit, jouent donc un rôle clef dans les effets d'hystérésis. Une revue de littérature sur ce sujet est présentée à la Section 5.2 de Mailhot *et al*. (2023).

5.2 Impacts des régimes non permanents sur les courbes de tarage

Une approche a été développée afin d'identifier les conditions propices à l'observation de l'effet d'hystérésis décrit à la section précédente (pour tous les détails, voir la Section 3.2.3 de Mailhot *et al*., 2023). Cette approche ne tient compte que de la variation de niveau en fonction du temps puisque cette information est facilement accessible. La prise en compte de la pente du tronçon pose des défis importants (voir Section 5.3).

L'approche repose sur la séparation des jaugeages selon qu'ils sont réalisés en phase ascendante (crue), en phase descendante (décrue) et en phase transitoire (débits minimum ou maximum) de l'hydrogramme. Sur la base de l'hypothèse que la CT correspond à une moyenne des jaugeages en phase ascendante, descendante et transitoire, on peut penser que les effets d'hystérésis se traduiront par une tendance à sous-estimer les débits jaugés dans les phases ascendantes et à les surestimer dans les phases descendantes (Figure 5.1). Cet effet sera observé si les nombres de jaugeage réalisés en phase ascendante et descendante sont du même ordre, la CT correspondant alors à une 'moyenne' des effets d'hystérésis ascendant et descendant. Cet effet sera d'autant plus marqué que la variation de niveau sera importante (et positive) en phase ascendante ou importante (et négative) en phase descendante.

Les résidus relatifs RR = $[Q_{CT} - Q_j]/Q_j$ ont donc été calculés où Q_{CT} est le débit estimé à partir de la CT et Q_j est le débit jaugé. Suivant l'hypothèse avancée plus haut, on pourrait s'attendre à ce que généralement RR > 0 en phase ascendante et RR < 0 en phase descendante et que cet effet sera d'autant plus important que la variation de niveau sera importante. Les analyses réalisées ne permettent pas de distinguer d'effet d'hystérésis (voir la Figure 3.6 de Mailhot *et al.*, 2023). Aucune différence entre les RR en phase ascendante et descendante n'est perceptible, suggérant que les effets d'hystérésis sont négligeables et sans effet sur les débits estimés.

Pour le moment, sur la base des analyses réalisées jusqu'ici, il semble difficile de discerner un possible effet d'hystérésis sur les débits estimés à partir des CT.

5.3 Impacts des régimes non permanents : conclusions et perspectives

Deux facteurs ont une incidence sur l'apparition d'un effet d'hystérésis lors de période de crue-décrue : la pente du tronçon et le taux de variation du niveau. Ainsi les effets d'hystérésis seront d'autant plus importants que la crue et la décrue qui suivront seront prononcées (donc que l'on est face à une crue soudaine importante) et que la pente du tronçon est faible. Dans ces conditions les CT pourraient conduire à des estimations biaisées des débits (sous-estimation en crue et surestimation en décrue).

Les analyses réalisées ont porté sur l'impact de l'ampleur de la crue ou de la décrue sur les débits estimés par la CT. L'hypothèse de base utilisée est que la CT représente des conditions moyennes de crue et de décrue. La comparaison des écarts entre débits jaugés et estimés à partir des CT en crue et en décrue n'a pas permis de discerner un quelconque effet d'hystérésis. Il convient de noter que, de façon générale, les jaugeages sont réalisés plus fréquemment en condition de décrue que de crue.

La prise en compte de la pente des tronçons a par ailleurs été considérée puisqu'il s'agit d'une variable clef conditionnant les effets d'hystérésis. Afin d'estimer ces pentes, les sources de données suivantes ont été consultées :

- Global river slope (GloRS; Cohen *et al.*, 2018)
- RiverAtlas (Linke *et al.*, 2019)[1]
- World database rivers (Frasson *et al.*, 2019)[2]
- SWOT river database (SWORD; Altenau *et al.*, 2021)[3]

Toutefois, aucun de ces jeux de données n'a été jugé satisfaisant pour la réalisation des analyses sur l'effet d'hystérésis. Les jeux de données *SWORD* et *World database rivers* sont plus précis et reproduisent plus fidèlement le parcours réel des cours d'eau comparativement aux jeux de données *GloRS* et *RiverAtlas* (Figure F.1 de l'Annexe F). Toutefois, ces jeux de données incluent seulement les cours d'eau principaux et ainsi, dans le cas présent, la majorité des SH ne peut pas être associée à un segment. À l'inverse, les jeux de données *GloRS* et *RiverAtlas* couvrent davantage de cours d'eau cependant la résolution de ces jeux de données est plus grossière et des différences marquées peuvent être observées entre les tracés représentés et le tracé réel des cours d'eau (Figure F.1).

Un autre point concernant ces quatre jeux de données est que les segments pour lesquels les pentes sont disponibles sont dans l'ensemble très longs. Pour GloRS et SWORD par exemple, la longueur médiane des segments est de 15.8 km et 8.7 km respectivement. Ainsi, la pente de ces segments peut ne pas être représentative de la pente à proximité des SH et ce d'autant plus si les SH se trouvent à l'une des extrémités du segment.

---

[1] RiverAtlas: HydroATLAS (hydrosheds.org)
[2] World database rivers : Global database of river width, slope, catchment area, meander wavelength, sinuosity, and discharge (zenodo.org)
[3] SWORD : SWOT River Database (SWORD) (zenodo.org)

Dans ce contexte, d'autres avenues devraient être envisagées. L'une d'elle serait d'estimer la pente moyenne pour chaque SH à partir des données LiDAR[4] et considérant par exemple des tronçons d'un kilomètre avec 500 m de part et d'autre de la SH. Bien entendu l'application de ce type d'approche doit se faire au cas par cas et nécessite du temps. Une application à quelques SH pourrait être envisagée dans un premier temps.

Les analyses précédentes demeurent incomplètes. Toutefois, l'identification des sites où les effets d'hystérésis pourraient être importants nécessitera, tel que mentionné précédemment, une caractérisation plus détaillée de ces sites notamment des pentes de fond des tronçons ou encore des pentes des lignes d'eau. Une telle information pourrait permettre d'identifier les SH où les effets d'hystérésis pourraient être importants, de même que les conditions de crue et de décrue où les débits estimés à partir des CT seraient biaisés. Pour le moment, on doit présumer que les effets d'hystérésis demeurent négligeables par rapport aux autres sources d'incertitudes ce qui demeure sans doute une hypothèse vraisemblable pour une grande majorité de SH.

[4] LiDAR : LiDAR - Modèles numériques (terrain, canopée, pente) - Forêt ouverte - Données Québec (donneesquebec.ca)

CHAPITRE 6. EFFET DE LA SAISONNALITÉ

Le présent chapitre présente les travaux et les résultats sur l'impact de la saisonnalité sur les CT. Les raisons et les effets d'une possible variation saisonnière des CT sont expliqués à la Section 6.1. La Section 6.2 propose une procédure afin de détecter cette influence sur les CT sous étude afin d'identifier les SH où l'effet de saisonnalité pourrait être important.

6.1 Considérations générales

L'impact de la saison sur les CT est essentiellement le fait de la croissance progressive des plantes dans les cours d'eau et sur les berges tout au long de la saison estivale (Perret *et al*. 2021). On peut donc s'attendre à ce que, pour un niveau d'eau donné, la présence de végétation augmente la résistance à l'écoulement, entraîne une diminution des vitesses d'écoulement et un déplacement de la CT le cas échéant. La représentation de l'interaction entre les plantes et l'écoulement demeure toutefois complexe puisqu'elle dépend de multiples facteurs (pour une revue de littérature sur ce sujet, voir la Section 3.3 Chapitre de Mailhot *et al*., 2023).

Dans le cas précis d'une CT à une SH donnée, les conditions nécessaires pour avoir un effet de la saisonnalité sur les CT sont les suivantes : 1) le contrôle hydraulique doit être de type chenal ; 2) le lit et les berges du tronçon de contrôle doivent être végétalisés et la croissance des plantes doit entrainer une modification sensible de la rugosité. La saisonnalité aura aucun impact sur les CT si le contrôle hydraulique est strictement de type section de contrôle puisque dans ces cas, la relation niveau-débit ne dépend pas explicitement des coefficients de résistance à l'écoulement (Perret *et al*. 2021; Rantz 1982a,b).

Afin de pouvoir détecter un effet de la saisonnalité, aux conditions précédentes, on doit ajouter que : 1) les jaugeages servant à construire la CT doivent être uniformément distribués entre les différentes périodes de l'année ; 2) il n'existe pas de corrélation entre les débits jaugés et le mois où le jaugeage a lieu, c.-à-d. que des débits élevés ou faibles soient autant jaugés au printemps, en été qu'en automne. On peut penser sous ces conditions que la CT est représentative des conditions saisonnières 'moyennes' et n'est pas 'biaisée' par une surreprésentation des conditions printanières ou automnales par exemple. Ces conditions sont toutefois difficiles à rencontrer au Québec.

Les premières analyses rapportées dans Mailhot *et al*. (2023) ont consistées à examiner les écarts mensuels entre les débits jaugés et ceux estimés à partir des CT. L'hypothèse de base était que la CT correspond à une situation moyenne et que, considérant que la résistance à l'écoulement varie en fonction des saisons, des écarts systématiques pourraient être observés selon les mois de l'année. Les écarts relatifs entre débits estimés à partir de la CT ont donc été estimés pour tous les jaugeages à toutes les stations. Ces écarts ont ensuite été classés en fonction du mois où le jaugeage a été réalisé. La saisonnalité pourrait ainsi se manifester par une surestimation des débits pour les mois où les plantes sont à maturité (débit et vitesse d'écoulement plus petite pour un niveau donné) et à l'inverse une sous-estimation des débits au printemps lorsque le lit et les berges sont dénudés. Les analyses n'ont montré aucun effet de ce genre. Elles ne

tiennent toutefois pas compte de la présence ou non de végétation sur les tronçons, du type de contrôle hydraulique en jeu, ni de la répartition mensuelle des jaugeages durant l'année.

Il n'a pas été possible dans le cadre de ce projet de caractériser de façon systématique le type de contrôle et la nature du lit et des berges, les données nécessaires à un tel travail n'étant pas disponibles à grande échelle. Le type de contrôle a été analysé à certaines stations dans le cadre de l'application de la méthode BaRatin (Chapitre 9) mais pas à l'ensemble des sites. Une telle analyse aurait permis d'identifier spécifiquement les sites avec des contrôle de type chenal et des berges végétalisées et donc les sites les plus susceptibles de subir une influence saisonnière. A défaut de disposer de ces informations, en complément aux analyses réalisées dans Mailhot *et al*. (2023), les travaux se sont portés sur les sites où l'on dispose de jaugeages durant toute l'année. La section 6.2 présente un résumé de ces analyses complémentaires.

6.2 Identification des CT affectées par la saisonnalité

Au Québec, une majorité des jaugeages en eau libre est réalisée lors des crues printanières tel que le montre la Figure 6.1. Ainsi les jaugeages sont majoritairement réalisés en mai (23%) bien qu'une fraction appréciable des jaugeages est également réalisée à la fin de l'été et en automne (août, septembre et octobre).

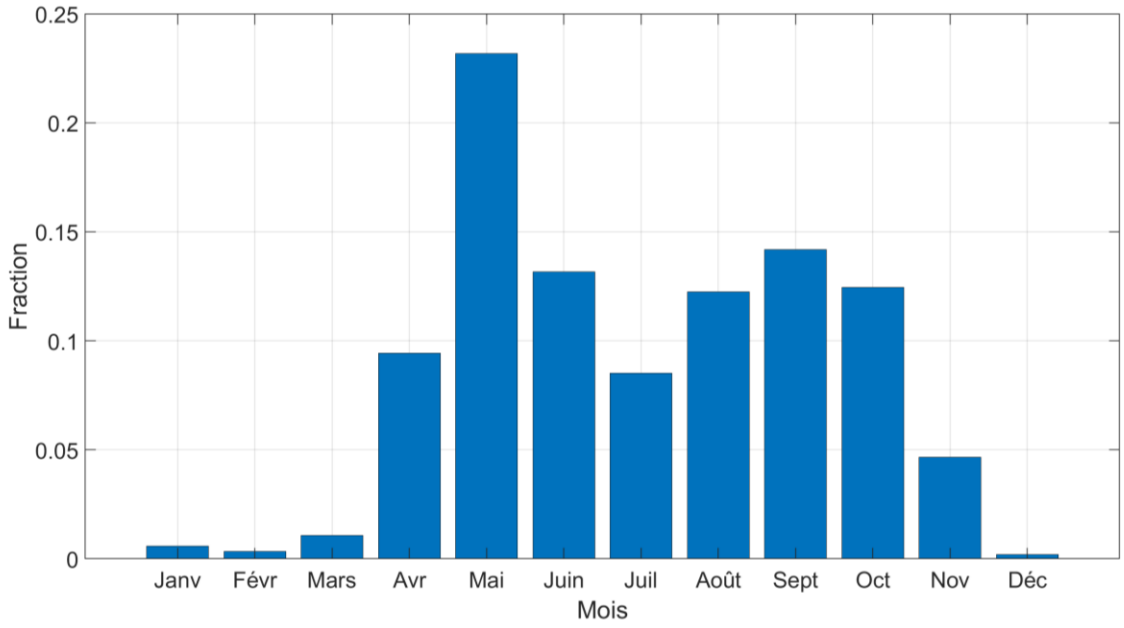


Figure 6.1 - Distribution mensuelle des dates de jaugeages.

La situation idéale qui permettrait de détecter un effet de la saisonnalité sur les CT est celle où l'on disposerait de nombreux jaugeages au début et à la fin de la période de croissance de la végétation, où l'on pourrait construire deux CT distinctes, une pour chacune de ces deux périodes, et ensuite les comparer. Évidemment, une telle situation demeure 'idéale', le nombre de jaugeages est insuffisant pour adopter une telle approche. A défaut, les stations avec des jaugeages durant toute l'année ont été identifiées et l'approche proposée dans Mailhot *et al*. (2023) appliquée uniquement à ces stations.

Seules les CT représentées par une RH, avec entre 30% et 70% de leurs jaugeages réalisés avant le 1 juillet et ayant 20 jaugeages ou plus ont été considérées pour identifier les effets de saisonnalité. Ces CT sont désignées dans ce qui suit par CT 1RH/30%-70%. Cent quarante-trois (143) CT satisfont à ces critères. Ces CT comptent entre 20 et 135 jaugeages pour une moyenne de 39.5 jaugeages par CT. Les jaugeages utilisés pour construire ces CT couvrent de façon relativement uniforme les différentes périodes de l'année où les plantes croissent et atteignent leur maturité.

La méthode proposée par Mailhot *et al*. (2023) afin de détecter un possible impact de la saisonnalité sur les CT a donc été reprise et les écarts relatifs entre débits estimés à partir de la CT, Q_{CT} et les débits jaugés, Q_j, $[Q_{CT} – Q_j]/Qj$ ont été estimés pour tous les jaugeages des 143 CT retenues. Ces écarts relatifs ont été classés en fonction du mois où le jaugeage a été réalisé.

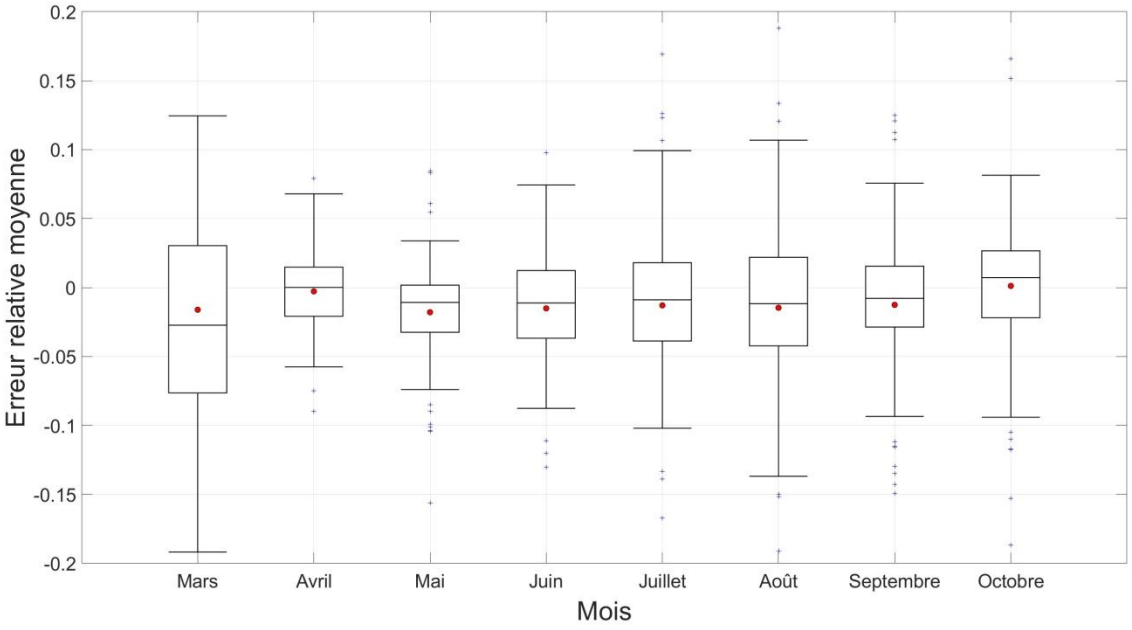


Figure 6.2 - Boxplots des écarts relatifs, $[Q_{CT} – Q_j]/Q_j$, entre débits estimés à partir des CT, Q_{CT} et les débits jaugés Q_j pour les différentes mois de l'année pour les CT 1RH/30%-70% (CT avec une seule RH comportant entre 30% et 70% de jaugeages avant le 1 juillet et 20 jaugeages ou plus). Les cercles rouges correspondent aux moyennes.

La Figure 6.2 présente les boxplots de ces écarts à chaque mois. Aucun effet de saisonnalité n'est observé pour ces CT. Un éventuel effet de saisonnalité se serait

manifesté par une surestimation des débits plus marquée pour la fin de l'été et l'automne où les plantes sont à maturité (débit et vitesse d'écoulement plus petite pour un niveau donné) et *à contrario* une sous-estimation des débits au printemps lorsque le lit et les berges sont dénudés. Or aucun effet de ce type n'est perceptible à la Figure 6.2.

Une autre analyse a donc été conduite à partir des 143 CT avec une seule RH comportant entre 30% et 70% de jaugeages avant le 1 juillet et 20 jaugeages ou plus (CT 1RH/30%-70%). Pour chacune des CT, les écarts relatifs (ER) entre débits estimés à partir de la CT et les débits jaugés ont été estimés (voir équation 7.1). Les dates des jaugeages sont également considérées et exprimées par le jour de l'année où a été effectué le jaugeage (1e au 365e jours). Une régression linéaire a été ajustée aux couples (jour de l'année, ER). Le même exercice a été réalisé pour les 160 CT avec 20 jaugeages ou plus représentées par une RH ne satisfaisant pas au critère 30%-70% (CT 1RH), donc aux CT où la répartition des jaugeages est plus hétérogène durant l'année.

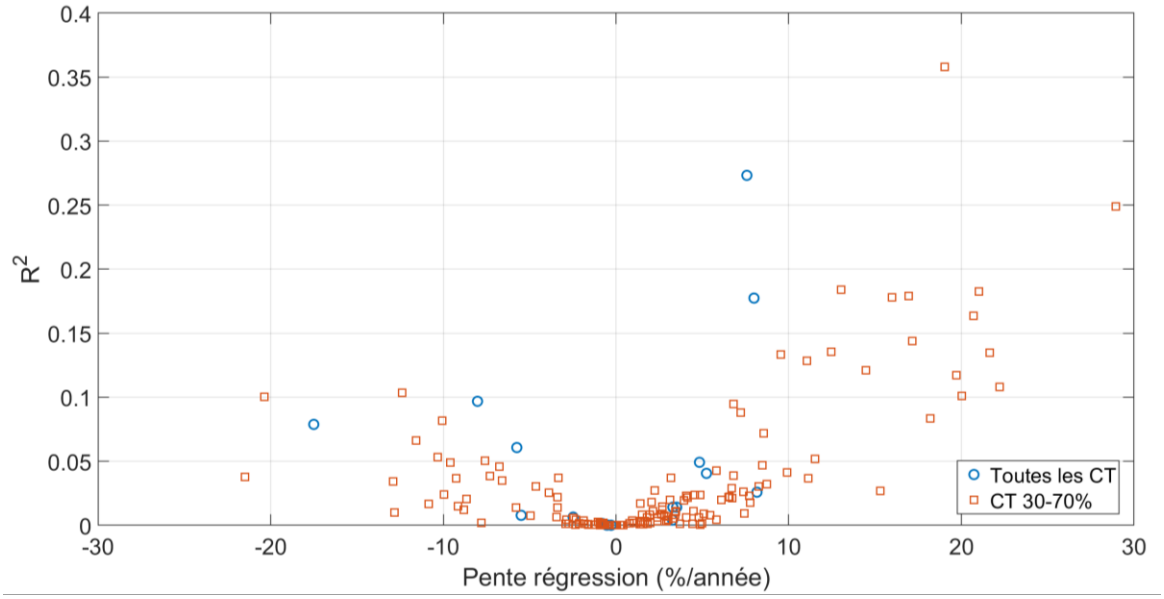


Figure 6.3 - Valeurs des coefficients de détermination (R^2) en fonction de la pente des régressions entre jours de l'année où est réalisé le jaugeage et l'écart relatif entre débits estimés à partir des CT, Q_{CT}, et débits jaugés Q_j, ($[Q_{CT} - Q_j]/Q_j$,), pour les 143 CT 1RH/30%-70% (CT avec une seule RH comportant entre 30% et 70% de jaugeages avant le 1 juillet et 20 jaugeages ou plus représentés par les carrés rouges) et pour les 160 CT du même type ne satisfaisant pas au critère 30%-70% (CT 1RH).

La Figure 6.3 présente les valeurs du R^2 des régressions en fonction de la pente de la régression exprimée en %/an pour les deux groupes de BV. On constate que certaines CT 1RH/30%-70% présentent des pentes positives et des R2 relativement élevés suggérant une possible saisonnalité. En revanche, les régressions de pentes négatives

ont des R2 moins élevés. Pour les CT ne satisfaisant pas au critère 30%-70%, les R2 des régressions sont très largement inférieures à 0.1 à deux exceptions près à savoir la CT de la station St-François couvrant la période 2011-2021 (R2 = 0.27 et pente = 7.7%/an) et la CT de la Petite Rivière Péribonka couvrant la période 1975-1982 (R2 = 0.18 et pente = 8.4%/an). Il importe de mentionner que le pourcentage de jaugeages avant le 1er juillet est de 27% à la station St-François et de 75% à la station de la Petite Rivière Péribonka, valeurs relativement proches de la gamme 30%-70% fixée au départ.

Un examen des graphiques des ER en fonction des dates des jaugeages montre que l'on peut douter de la significativité de ces régressions. La Figure 6.4 présente le cas de la CT à la station St-François (03078) pour la période 1978-1990 qui correspond au cas avec le plus grand coefficient de détermination (pente = 19%/an, R2 = 0.36). On voit que les écarts semblent augmenter lorsque l'on progresse dans l'année, mais la significativité de ce résultat est douteuse compte tenu de la dispersion des écarts autour de la régression. D'autres jaugeages seraient nécessaires afin de confirmer que la régression est effectivement attribuable à la saisonnalité.

Le Tableau G.1 de l'Annexe G dresse la liste des 15 stations et des CT 1RH/30%-70% avec des régressions de pentes supérieures à 10% et des R2 > 0.1. Des effets de saisonnalité pourraient être présents en ces sites. Des analyses plus détaillées et un recoupement avec l'expertise des professionnels en charge des campagnes de jaugeages seraient toutefois nécessaires pour confirmer cette hypothèse.

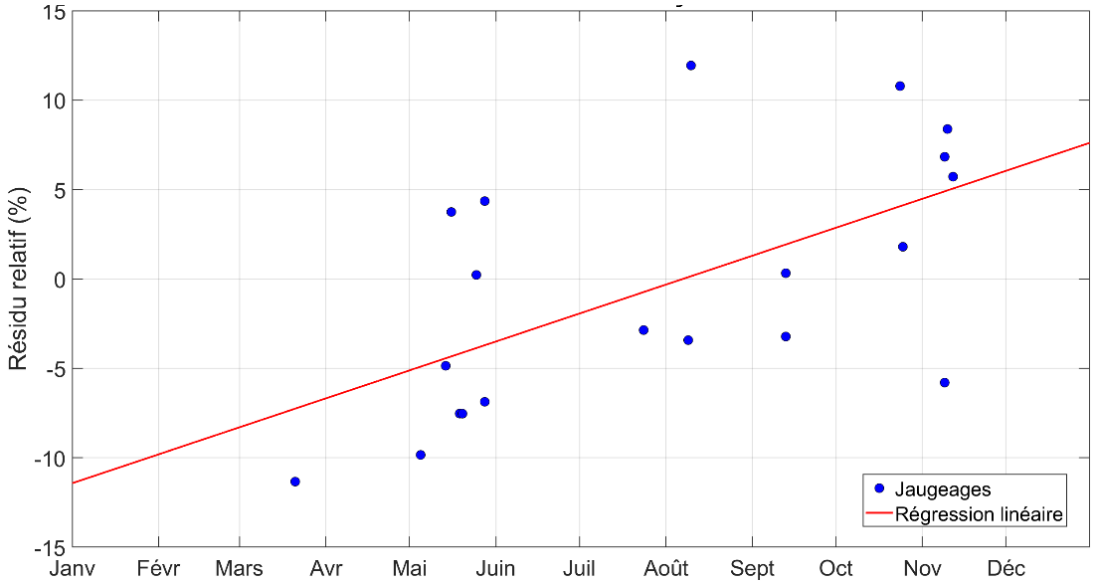


Figure 6.4 - Écart relatif entre débits estimés à partir des CT et débits jaugés en fonction des dates des jaugeages pour la CT de la station St-François (03078) couvrant la période 1978-1990. La courbe rouge correspond à la régression linéaire entre ces valeurs (R2 = 0.36; pente = 19%).

6.3 Effet de saisonnalité : conclusion et perspective

L'effet de saisonnalité sur les CT est attribuable à un changement de la rugosité du lit et des berges au fil des saisons entrainant ainsi une augmentation des pertes de charge et

une modification de la relation niveau-débit. Ces changements de rugosité sont essentiellement le fait de la croissance progressive des plantes dans les cours d'eau et sur les berges tout au long de l'année. Ainsi, pour un niveau d'eau donné, la présence de végétation augmente la résistance à l'écoulement, entraîne une diminution des vitesses d'écoulement et un déplacement de la CT le cas échéant. La représentation de l'interaction entre les plantes et l'écoulement demeure toutefois très complexe.

Les conditions nécessaires pour avoir un effet de la saisonnalité sur les CT sont les suivantes : 1) le contrôle hydraulique doit être de type chenal; 2) le lit et les berges du tronçon de contrôle doivent être végétalisés et la croissance des plantes doit entrainer une modification sensible de la rugosité.

La détection d'éventuels effets saisonniers sur les CT nécessite de disposer de jaugeages réalisés tout au long de l'année et qu'il n'existe pas de corrélation entre les débits jaugés et le mois où le jaugeage a lieu, c.-à-d. que des débits élevés ou faibles surviennent tant au printemps, en été qu'en automne. Ces conditions sont toutefois difficiles à rencontrer au Québec.

La détection d'une éventuelle saisonnalité des CT reprend l'approche proposée dans Mailhot *et al*. (2023). Ainsi les écarts mensuels entre les débits jaugés et ceux estimés à partir des CT sont ordonnés en fonction du jour de l'année où ont été réalisés les jaugeages. Une éventuelle saisonnalité se manifesterait par une surestimation des débits pour les mois où les plantes sont à maturité (débit et vitesse d'écoulement plus petite pour un niveau donné) et à l'inverse une sous-estimation des débits au printemps lorsque le lit et les berges sont dénudés. Les analyses n'ont cependant montré aucun effet de ce genre.

Une deuxième analyse n'a considéré que les CT avec 30% à 70% de jaugeages réalisés avant le 1 juillet et plus de 20 jaugeages, ceci afin d'avoir une répartition plus uniforme des dates de jaugeages tout au long de l'année. Les écarts relatifs entre débits de la CT et débit jaugés et les dates des jaugeages Cette approche a permis d'identifier un certain nombre de site où les CT pourraient être influencées par la saisonnalité. Les régressions linéaires entre les écarts relatifs et les dates des jaugeages ont été construites et celles présentant les coefficients de détermination les plus élevés ont été retenues parce que pouvant potentiellement être influencées par la saisonnalité. Toutefois, un examen sommaire de ces sites montre que ces résultats pourraient ne pas être significatifs mais simplement le fruit du hasard.

Ces résultats, quoiqu'intéressants, demeurent donc incomplets. En effet, les analyses réalisées ne tenaient pas compte de la présence ou non de végétation sur les tronçons, ni du type de contrôle hydraulique en jeu. Dès lors, ces résultats devraient faire l'objet de discussions avec les professionnels en charge des campagnes de jaugeages afin de voir si le type de contrôle, la nature des berges et plus généralement les caractéristiques du site de mesure sont propices à des effets saisonniers.

CHAPITRE 7. INCERTITUDES SUR LES DÉBITS ESTIMÉS EN EXTRAPOLATION DES CT

Les travaux présentés dans la phase I du projet (Mailhot *et al*., 2022) avaient permis de montrer que les incertitudes sur les débits estimés dans la partie interpolée des CT, c.-à-d. la partie entre le plus petit niveau jaugé (PPNJ) et le plus grand niveau jaugé (PGNJ), sont de l'ordre de ±5 à ±10%, des valeurs comparables à celles rapportées dans la littérature (voir par exemple le Tableau II de McMillan *et al*., 2012). L'estimation des incertitudes sur les débits estimés dans les parties extrapolées des CT pose toutefois un défi supplémentaire puisqu'aucun jaugeage n'est disponible pour estimer ces incertitudes. En général, à défaut de mieux, on suppose que ces incertitudes sont comparables à celles sur les débits estimés dans les parties interpolées des CT. Or des analyses préliminaires (voir p. ex. Figure 8.4 de Mailhot *et al*., 2022) ont montré que, sans surprise, il n'en est rien et que les incertitudes augmentent rapidement lorsqu'on s'éloigne du PGNJ ou du PPNJ et que les incertitudes dans les parties extrapolées de la CT sont sensiblement plus importantes.

Les travaux préliminaires réalisés dans le cadre du premier projet avaient permis de tester une approche basée sur un rééchantillonnage aléatoire des séquences de jaugeages dont l'objectif était d'estimer les incertitudes sur les débits estimés en extrapolation des CT (voir Section 8.5.3 de Mailhot *et al*., 2022). Cette approche semblait alors prometteuse mais n'avait pu être analysée de façon exhaustive. Le présent chapitre reprend donc cette approche et présente les principaux résultats de sa mise en place.

7.1 Rééchantillonnage aléatoire des jaugeages

Seules les CT avec une RH (catégories A2-B2, A1-B1) sont considérées pour un total de 300 CT. Soit la séquence de N_s jaugeages (h_j, Q_j) avec $1 \leq j \leq N_s$ associée à une CT, l'approche proposée procède selon les étapes suivantes :

1. On fixe le nombre de jaugeage m des échantillons générés aléatoirement. Seules les CT avec un nombre de jaugeages égal ou supérieur à m sont considérées ($N_s \geq m$). On désigne par $N_{CT}(m)$ le nombre de CT avec $N_s \geq m$.
2. Pour chaque CT avec $N_s \geq m$, on génère aléatoirement un échantillon (sans remplacement) de m jaugeages à partir des N_s jaugeages de la séquence.
3. On ajuste une RH aux m jaugeages sélectionnés.
4. On estime les écarts relatifs, ER_j, entre les débits estimés à partir de la RH, $Q_{RH}(h_j)$, et tous les N_s débits jaugés disponibles, Q_j, incluant ceux qui n'ont pas été utilisés pour construire la CT :

$$ER_j = \frac{Q_{RH}(h_j) - Q_j}{Q_j} \quad \text{avec } 1 < j < N_s \tag{7.1}$$

5. On identifie le plus grand niveau jaugé, h_{max}, et le plus petit niveau jaugé, h_{min}, de la séquence aléatoire de m jaugeages.
6. On estime le niveau relatif associé au jaugeage j, h'_j, de la séquence aléatoire :

$$h'_j = \frac{(h_j - h_{min})}{(h_{max} - h_{min})} \text{ avec } 1 < j < N_s$$

On a donc :

$$\begin{array}{ll} h'_j \leq 0 & \text{si } h_j \leq h_{min} \\ 0 \leq h'_j \leq 1 & \text{si } h_{min} \leq h_j \leq h_{max} \\ h'_j \geq 1 & \text{si } h_j \geq h_{max} \end{array}$$

Ainsi on distingue selon la valeur de h'_j si les ER sont estimés dans la partie interpolée ($0 \leq h'_j \leq 1$) ou extrapolée ($h'_j \leq 0$ ou $h'_j \geq 1$) de la RH.

7. On dispose au terme de ces calculs de N_s couples de valeurs (h'_j, ER_j) pour chaque séquence.
8. On répète N_e fois les étapes 2 à 7. Si le nombre de combinatoires possible est inférieur à N_e alors les séquences sont systématiquement générées et toutes les combinaisons de m objets parmi N_s, $C_m^{N_s} = \binom{N_s}{m}$, sont considérées. Si $C_m^{N_s} > N_e$ alors les N_e séquences sont générées de façon aléatoire. Le nombre maximum de séquences aléatoires générées a été fixé à $N_e = 100$.
9. On combine les N_s jaugeages des N_e échantillons aléatoires des $N_{CT}(m)$ CT avec $N_s \geq m$ pour obtenir N_T (= $N_{CT}(m)$ x N_s x N_e) couples de valeurs (h'_j, ER_j).

L'intervalle des niveaux relatifs, h', est ensuite partitionné en intervalles Δh et les valeurs des ER de chaque intervalle sont regroupées. Les intervalles ont été définis de façon à avoir un nombre raisonnable de valeurs dans chaque intervalle. Les valeurs de Δh varient entre 0.01 et 0.02 pour les valeurs de h' avec beaucoup de jaugeages, mais sont plus étendues dans les extrémités. Le nombre de jaugeages par intervalle varie donc selon le niveau et la valeur de m. Ainsi il peut atteindre 40 000 pour les niveaux les plus fréquents lorsque m = 10, mais descendre à 80 en extrapolation lorsque m = 50. Ensuite, les valeurs obtenues ont été ajustées à une distribution logistique (voir Annexe E de Mailhot *et al.*, 2022) et les paramètres μ et σ de cette distribution pour chacun des intervalles sont estimés.

Tableau 7.1 - Nombre de CT disponibles avec un nombre minimal de jaugeages donnée et nombre moyen de jaugeages par CT correspondante. Seules les 264 CT représentées par 1 RH sont considérées.

Nombre minimal de jaugeages par CT	Nombre de CT	Nombre moyen de jaugeages CT
10	264	28.8
20	160	38.3
30	89	49.7
40	52	60.0
50	29	72.9

7.2 Résultats

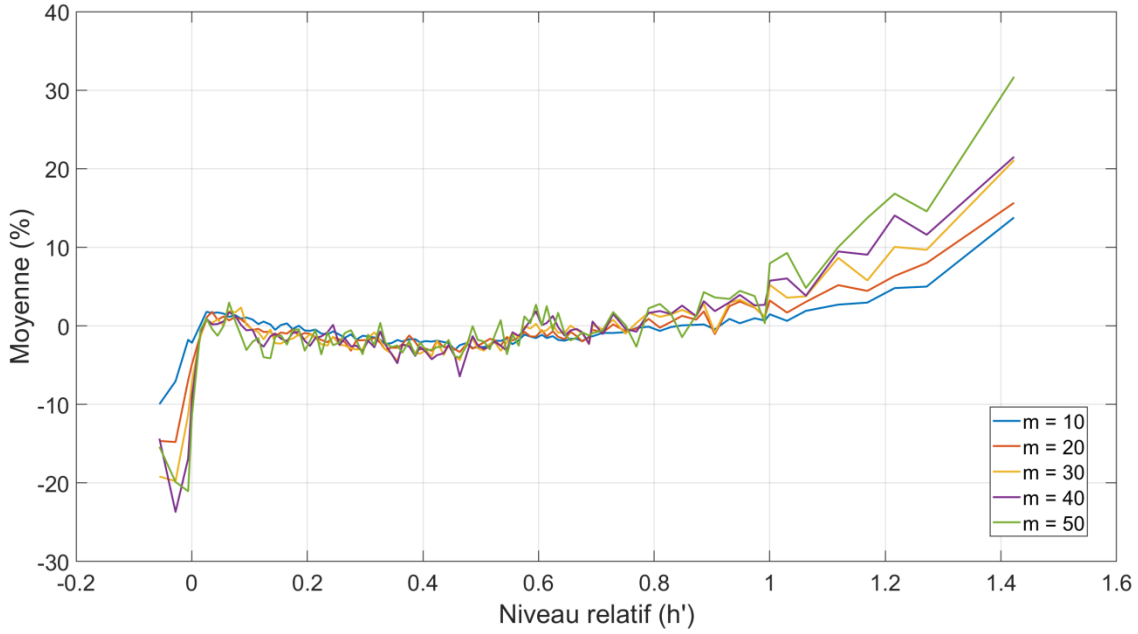
Des échantillons de 10, 20, 30, 40 et 50 jaugeages ont été générés à partir des jaugeages des différentes CT. Le Tableau 7.1 présente le nombre de CT avec un nombre minimal de jaugeages et le nombre moyen de jaugeages par CT. Ainsi, on dispose de 264 CT avec plus de 10 jaugeages alors que ce nombre diminue pour atteindre 29 pour les CT avec plus de 50 jaugeages.

Les moyennes et les écarts-types (ET) des ER en fonction du niveau relatif sont présentés à la Figure 7.1. Concernant l'évolution des ER moyens en fonction du niveau relatif (Figure 7.1a), trois constats majeurs émergent :

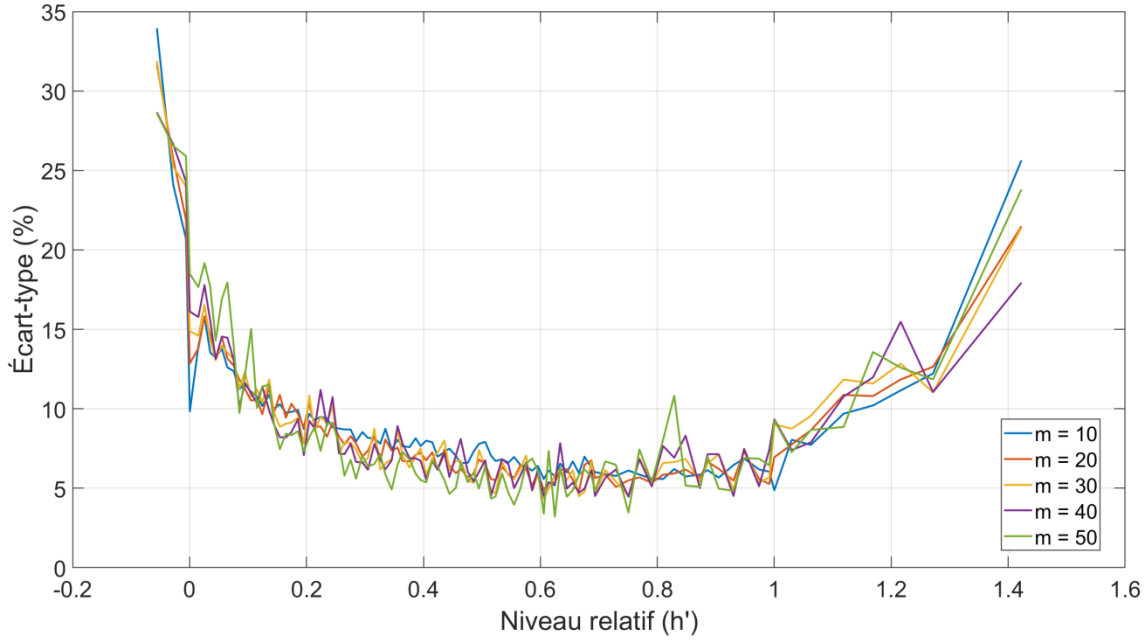
1. Les ER moyens se situent entre -5% et +5% pour la partie interpolée des CT ($0 \leq h' \leq 1$). Toutefois, on note une sous-estimation systématique pour ($0.2 \leq h' \leq 0.4$) et une surestimation lorsque les niveaux relatifs s'approchent de 1. Ce type de comportement pourrait résulter d'un effet de compensation entre un ajustement aux jaugeages des niveaux plus faibles plus nombreux par rapport aux jaugeages de niveaux modérés et plus élevés.

2. Un deuxième constat très important est le biais majeur pour les niveaux en deçà du PPNJ, c.-à-d. pour $h' \leq 0$. Dans ce cas, les débits estimés à partir de la CT sous-estiment très largement les débits jaugés et cette sous-estimation survient très abruptement près de $h' = 0$. L'effet inverse est observé pour les niveaux supérieurs au PGNJ ($h' > 1$) où cette fois les débits de la CT surestiment les débits jaugés et ce d'autant plus que le niveau relatif s'éloigne de 1, c.-à-d. que l'on progresse dans la zone d'extrapolation. Ces biais montrent que l'ajustement des CT dans la gamme des niveaux et débits jaugés conduit à une sous-estimation des débits pour la partie extrapolée en deçà des PPNJ et à une surestimation pour la partie extrapolée au-delà du PGNJ.

3. Un troisième constat concerne cette fois les différences entre les différentes valeurs de m. Rappelons qu'un m plus élevés signifie que l'on échantillonne un plus grand nombre de jaugeages dans des séquences qui contiennent elles-mêmes plus de jaugeages. On observe peu de différences entre les courbes associées aux différentes valeurs de m pour la partie interpolée mais une séparation progressive lorsque l'on s'approche des zones d'extrapolation et particulièrement de la zone d'extrapolation vers les grands niveaux. Qui plus est cet effet est d'autant plus prononcé que la séquence comporte plus de jaugeages (m plus grand). Ce résultat peut à priori sembler contre-intuitif. En effet on pourrait penser que si on augmente le nombre de jaugeages de possibles 'biais' devraient s'amenuiser, or il n'en est rien selon la Figure 7.1a. En fait, il faut se souvenir que la sélection d'un plus grand nombre de jaugeages signifie que la gamme de niveaux jaugés augmentent en moyenne et couvre donc une plus grande gamme de conditions d'écoulement. Ainsi un niveau relatif $h' = 1$ pour des échantillons de 10 jaugeages correspondra en moyenne à un niveau absolu moins élevé que si des échantillons de 20 jaugeages sont générés à partir de la même séquence. Ce faisant, augmenter la taille des échantillons implique que des gammes de niveaux plus étendues sont couvertes qui peuvent se rapprocher de situations où le contrôle hydraulique change.



(a)



(b)

Figure 7.1 - a) Moyennes et b) écarts-types (ET) des écarts relatifs (ER) après ajustements à de distributions logistiques aux valeurs de ER en fonction du niveau relatif.

Concernant les ET des ER en fonction du niveau relatif (Figure 7.1b), on observe que :

1. Les ET de l'ordre de 5% à 7% sont obtenus pour les niveaux relatifs $0.3 \leq h'_j \leq 1.0$. Ces ET augmentent toutefois de façon marquée lorsque l'on se rapproche du PPNJ pour atteindre 15% à $h' = 0$. De façon globale, les incertitudes sont de l'ordre de 5% à 15% dans la partie interpolée. Ce résultat est cohérent avec ceux rapportées à la Section 3.2 sur les modèles d'incertitude des CT.
2. Les ET augmentent de façon abrupte pour les niveaux inférieurs au PPNJ montrant encore une fois que toutes estimations de débits inférieurs au PPNJ sont entachées d'importantes incertitudes. De même les incertitudes sur les débits estimés dans la partie extrapolée au-delà du PGNJ augmentent lorsque l'on se rapproche de h = 1 (PGNJ), atteignent entre 7% et 15% pour $1 \leq h' \leq 1.2$, puis augmentent très rapidement pour $h' > 1.2$
3. L'évolution des ET en fonction du niveau relatif ne semble pas dépendre de la taille m des échantillons ou à tout le moins de façon aussi marquée que le biais.

Ces résultats sont importants puisqu'ils montrent que : 1) des biais significatifs sont possibles dans les parties en extrapolation des CT (sous-estimation pour les débits en deçà du PPNJ et surestimation pour les débits au-delà du PGNJ); 2) les incertitudes sur les débits estimés en extrapolation des CT augmentent très rapidement, particulièrement pour les débits en deçà du PPNJ.

7.3 Incertitudes sur les débits extrapolés des CT : conclusion et perspective

Les modèles d'incertitude développés au Chapitre 3 ont permis de montrer que les écarts relatifs dans les parties interpolées des CT sont de l'ordre ±5% à ±10%. Une approche basée sur un sous-échantillon aléatoire des jaugeages a permis d'explorer les incertitudes en extrapolation des CT. Cette approche combine les 300 CT représentées par une RH et se veut donc globale. Des sous-échantillons de 10, 20, 30, 40 et 50 jaugeages sont considérés pour toutes les CT avec un nombre de jaugeages égal ou supérieure à ce nombre. Les écarts relatifs entre les débits estimés à partir des CT construites à partir des sous échantillons et tous les débits jaugés de la CT d'origine sont estimés, incluant les jaugeages non utilisés pour construire la CT des sous-échantillons. Cette approche permet donc d'estimer les écarts relatifs en extrapolation de la CT des sous-échantillons. Les distributions de ces écarts ont enfin été ajustées à une loi logistique et les moyennes et écart-types de celles-ci estimés en fonction du niveau relatif normalisé.

Les résultats montrent que, non seulement les incertitudes dans les parties extrapolées augmentent à mesure que l'extrapolation est plus importante, mais également que des biais relativement importants peuvent apparaître en extrapolation. Dès lors les débits estimés à partir de la CT pourraient en moyenne surestimer les débits dans la partie extrapolée au-delà du PGNJ et sous-estimer les débits en deçà du PPNJ. Les biais peuvent atteindre +5% à +15% pour des niveaux 20% supérieurs au PGNJ et -20% pour des niveaux 20% inférieurs au PPNJ. La sous-estimation des faibles débits est très importante et soudaine une fois le PPNJ franchi. Ces biais demeurent toutefois modestes dans la partie interpolée avec des valeurs comprises entre -3% et +5%.

Les ET des écarts relatifs augmentent lorsque le niveau se rapproche du PGNJ et du PPNJ, pour atteindre 20% au PPNJ et 8% au PGNJ. Les ET en deçà du PPNJ augmentent

de façon très marquée suggérant que les débits estimés par la CT dans ce cas sont très incertains. Pour la partie au-delà du PGNJ, les ET sont de l'ordre de 10% à 15% pour des niveaux relatifs supérieurs de 20% au PGNJ.

CHAPITRE 8. MODÉLISATION HYDRAULIQUE

Des simulations hydrauliques réalisées dans le cadre du projet INFO-Crue ont été utilisées afin de comparer les relations hauteur/débit provenant des simulations aux CT construites à partir des jaugeages. Les objectifs de ces analyses sont les suivants :

1. Comparer les relations niveau-débit simulées et jaugées afin de voir si la modélisation hydraulique ne peut pas être utilisée en complément d'information aux CT développées à partir des jaugeages, notamment dans les parties extrapolées de la CT et afin de mieux comprendre le type de contrôle hydraulique en jeu;
2. Quantifier les différentes sources d'incertitudes, notamment celles associées aux débits estimés en extrapolation des CT, aux conditions d'écoulement en régime non permanent et à la saisonnalité des écoulements.

Le Tableau H.1 de l'Annexe H présente les modélisations hydrauliques HEC-RAS fournies par la *Direction principale des prévisions hydriques et de la cartographie* du MELCCFP. La Figure H.1 montre la position des SH des tronçons modélisés.

Pour la suite de ce chapitre, il est important de définir les termes *niveau* et *élévation*. Le niveau fera référence à une valeur arbitraire locale permettant de lier une hauteur d'eau à un débit en un site donné. Ainsi les niveaux en chaque SH réfère à un niveau de référence local (borne ou repère au sol) arbitraire, c.-à-d. non géoréférencée. L'élévation fait référence quant à elle à une hauteur géoréférencée par rapport au niveau moyen de la mer. Puisque les LiDAR utilisés pour la calibration des modèles hydrauliques (MH) sont géoréférencés, les comparaisons entre les CT et les MH sont toutes réalisées sur la base des élévations. Le Tableau G.2 de l'Annexe G donne les facteurs de correction appliqués à certaines SH afin de convertir les niveaux en élévations.

Il est également à noter que les CT construites à partir des jaugeages seront désignées dans ce qui suit par *CT jaugées* alors que celles estimées à part des MH seront appelées *CT simulées*.

Dans ce chapitre, la Section 8.1 décrit le cas de la rivière Aux Sables (061029) où les CT simulées et jaugées sont très similaires et la Section 8.2 montre quant à elle le cas de la rivière Du Diable (040238) où la CT jaugée apporte de l'information à la CT simulée et vice-versa. La Section 8.3 montre plusieurs cas où différents facteurs font en sorte que le niveau de confiance des MH est moindre. Finalement, la Section 8.4 présente un résumé des résultats.

8.1 CT jaugée et simulée similaires – Cas de la rivière Aux Sables (061029)

La Figure 8.1 montre le cas de la rivière Aux Sables (061029). On remarque sur cette figure que les gammes de niveaux des jaugeages et ses relevés hydrométriques (lignes rouges horizontales tiretées) utilisés pour la modélisation hydraulique se recoupent et que les deux CT sont pratiquement identiques dans toutes la zone d'interpolation. Au-delà du PGNJ, les écarts restent mineurs ce qui valide dans une certaine mesure la CT jaugée en extrapolation.

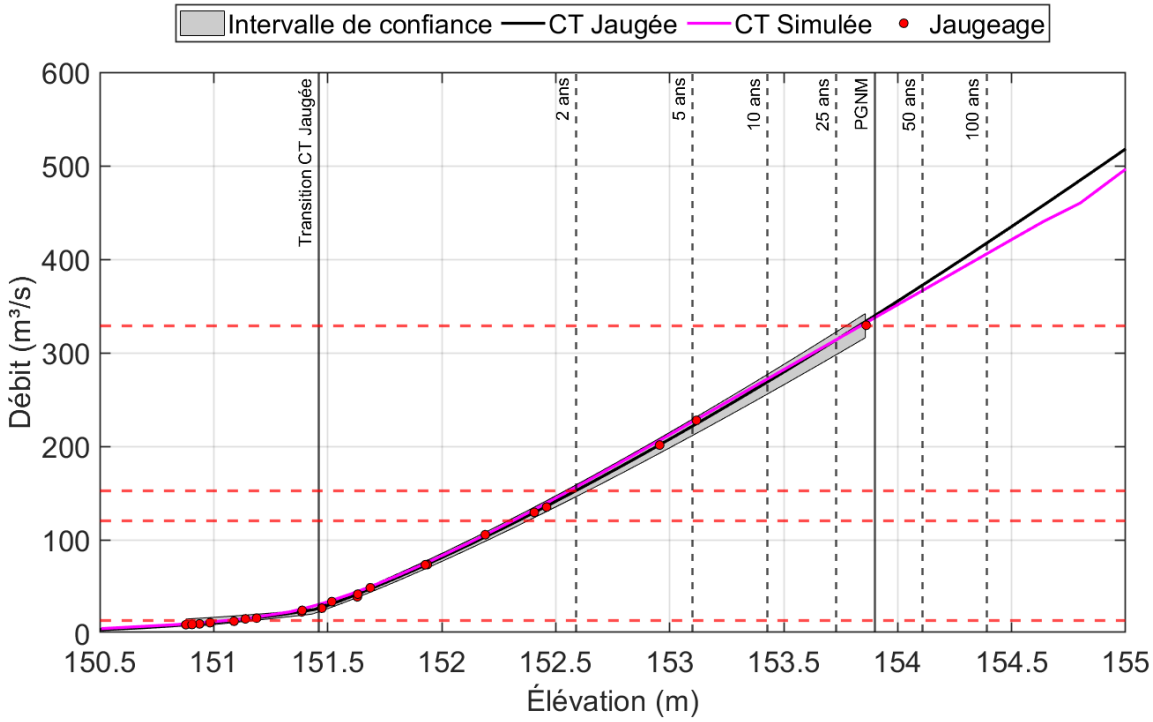


Figure 8.1 - CT jaugée et simulée à la station Aux Sables (061029). Les lignes tiretées noires indiquent les élévations de PR 2, 5, 10, 25, 50 et 100 ans et les lignes tiretées rouges les débits utilisés pour calibrer le MH. La zone grise correspond à l'intervalle de confiance 95% autour de la CT jaugée. PGNM : Plus grand niveau mesuré.

Il est important également de noter que la rivière Aux Sables est un cas idéal. Ajouté au fait que les relevés hydrométriques couvrent une large gamme d'élévations, la SH est située complètement en aval de la zone modélisée (Figure H.2 de l'Annexe H) où se trouve un seuil qui crée un bassin naturel où les élévations d'eau sont très stables jusqu'aux lignes d'eau les plus près ayant servi à la calibration.

8.2 Complémentarité des CT jaugées et simulées – Cas de la rivière Du Diable (040238)

Lorsque la concordance entre les CT jaugées et simulées est moins bonne, il est plus difficile d'identifier si le MH apporte une information complémentaire à la CT jaugée ou l'inverse. Le cas de la rivière Du Diable (040238) est intéressant en ce sens. La Figure 8.2 montre que la CT simulée s'éloigne des jaugeages de moins de 50 m³/sec alors que la CT jaugée, représentée par deux régressions hydrauliques, s'ajuste très bien à ces jaugeages. Cette incapacité du MH à représenter les plus petits jaugeages s'explique par l'absence de relevé hydrométrique dans cette zone de la CT. Il est important de rappeler que la modélisation hydraulique a pour principal objectif de simuler les débits de crue. Apparemment, une modification de la section ou du type de contrôle, qui n'est pas intégrée dans le MH, survient à une élévation d'environ 195.4 m. Pour les trois plus grands niveaux jaugés, on remarque une variabilité dans la relation élévation/débit. Dans ce cas le MH se rapproche davantage du 3e plus grand jaugeage pour ensuite rejoindre la CT jaugée en extrapolation. Il est possible alors que les débits estimés par le MH soient plus près des débits réels ce qui corrobore l'intervalle de confiance autour de la CT jaugée.

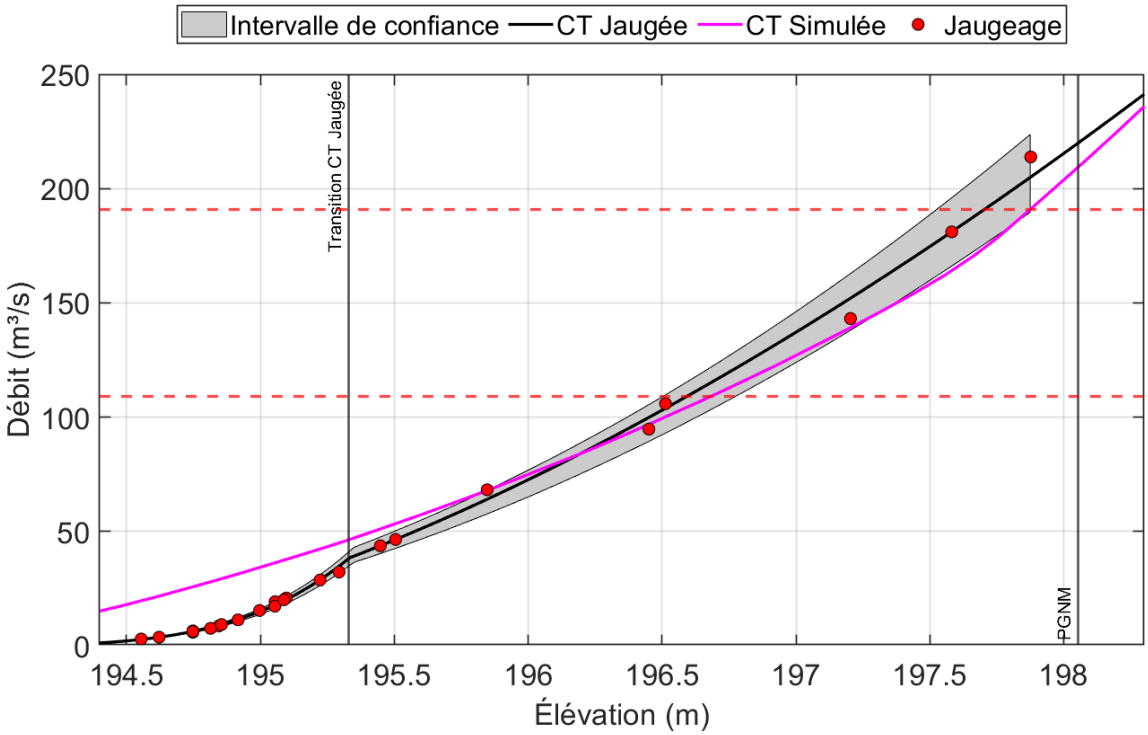


Figure 8.2 - CT jaugée et simulée à la station Du Diable (040238). Les lignes tiretées rouges indiquent les débits utilisés pour calibrer le MH. La zone grise correspond à l'intervalle de confiance 95% autour de la CT jaugée. PGNM : Plus grand niveau mesuré.

8.3 Niveau de confiance des MH

Une rencontre avec l'équipe de modélisation hydraulique d'INFO-Crue a permis de mettre en lumière certains critères qui pourraient réduire le niveau de confiance à accorder aux CT simulées. Ces critères sont :

1. Nombre de relevés hydrométriques utilisés pour la calibration du MH;
2. Gamme de débits couverts par les relevés hydrométriques utilisés pour la calibration du MH;
3. Proximité des relevés des lignes d'eau par rapport à la SH;
4. Position de la SH dans le ou les tronçons modélisés.

Ainsi, tel que mentionné précédemment, le niveau de confiance pour la CT simulée avec le MH de la rivière Aux Sables (Section 8.1) est élevé puisque ce MH satisfait ces quatre critères. Pour le cas de la rivière Du Diable (Section 8.2), un bon niveau de confiance peut être attribué à la CT simulée pour les débits associés à des élévations supérieures à 196.5 m (Figure 8.2) puisque la SH se trouve en aval de la zone modélisée, que les relevés de niveaux d'eau sont près de la SH (±80 m) et que deux relevés hydrométriques couvrant cette gamme de débits ont été utilisés pour calibrer le MH. En revanche, les incertitudes sur la CT simulée pour les élévations inférieures à 196.5 m sont très certainement importantes puisque qu'aucun relevé hydrométrique n'a été utilisé pour calibrer le MH dans cette portion de la courbe.

Les sections suivantes présentent des cas où en raison d'un ou d'une combinaison de facteurs énumérés précédemment, le niveau de confiance attribué aux MH est moins élevé.

8.3.1 Cas des rivières Chicoutimi (061004) et Bulstrode (030106)

Pour les MH de la rivière Chicoutimi (station 061004, Figure 8.3) et de la rivière Bulstrode (station 030106, Figure 8.4), le niveau de confiance des CT simulées est plus faible. Les SH se trouvent complètement en amont de la zone modélisée dans ces deux cas et il n'y a pas de relevé de niveaux d'eau près des SH. De plus, pour la rivière Chicoutimi, seulement deux relevés hydrométriques, qui ne couvrent pas les débits plus faibles, sont utilisés pour la calibration du MH alors que pour la rivière Bulstrode, bien que le nombre de relevés hydrométriques soit plus élevé, la gamme de débits plus faible n'est pas couverte.

Un examen de la Figure 8.3 montre un désaccord important entre les deux CT pour les débits inférieurs à 100 m^3/sec et on peut penser, considérant les nombreux jaugeages disponibles dans cette gamme de débits, que la calibration du MH n'est pas adéquate. Pour les débits plus élevés, il est intéressant de noter que la CT simulée se rapproche davantage du plus grand débit jaugé. Il est permis de penser que, dans ce cas, le MH apporte de l'information complémentaire et que la CT jaugée surestime les débits en extrapolation. Toutefois, considérant le plus faible niveau de confiance attribué à la CT simulée pour les raisons énumérées plus haut, il est difficile d'être catégorique.

Un constat similaire est tiré de l'analyse de la Figure 8.4 où la CT jaugée est certainement plus près des valeurs réelles pour les débits les plus faibles. Toutefois, pour les débits plus élevés, encore une fois, il est difficile de déterminer si le MH apporte une information supplémentaire fiable par rapport à la CT jaugée. Nonobstant le fait que le niveau de confiance de la CT simulée est plus faible, on remarque qu'elle passe bien dans les jaugeages dont les élévations sont supérieures à 125.5 m et qu'elle suggère donc une possible surestimation des débits de la part de la CT jaugée en extrapolation.

8.3.2 Cas de la rivière Yamaska (Farnham, 030302 et Saint-Hyacinthe, 030345)

Pour les stations Farnham (030302) et Saint-Hyacinthe (030345), toutes deux localisées sur la rivière Yamaska, un seul relevé hydrométrique a été utilisé pour la calibration des MH (Figures 8.5 et 8.6 respectivement). La gamme de débits utilisée pour la calibration est dès lors très limitée. De plus, les SH sont situées dans les deux cas en amont des tronçons modélisés. Bien que des mesures des lignes d'eau se trouvent très près des SH dans les deux cas, il est difficile d'attribuer d'emblée un niveau de confiance très élevé aux MH. De fait, la Figure 8.6 montre un désaccord entre les deux CT sur l'ensemble des niveaux jaugés. Qui plus est la CT simulée présente certaines irrégularités (instabilités) pour les faibles débits. Pour la SH Farnham (030302, Figure 8.5) il est intéressant de noter qu'on observe un décalage presque constant sur l'ensemble de la CT. Il est possible que le facteur de correction appliqué sur les niveaux afin d'obtenir une élévation et de pouvoir comparer les CT jaugées et simulées soit responsable de ce biais (Tableau H.2). À noter que dans la Phase 1 du projet (Mailhot *et al.*, 2022), des erreurs avaient été relevées en ce qui concerne certains de ces facteurs de corrections.

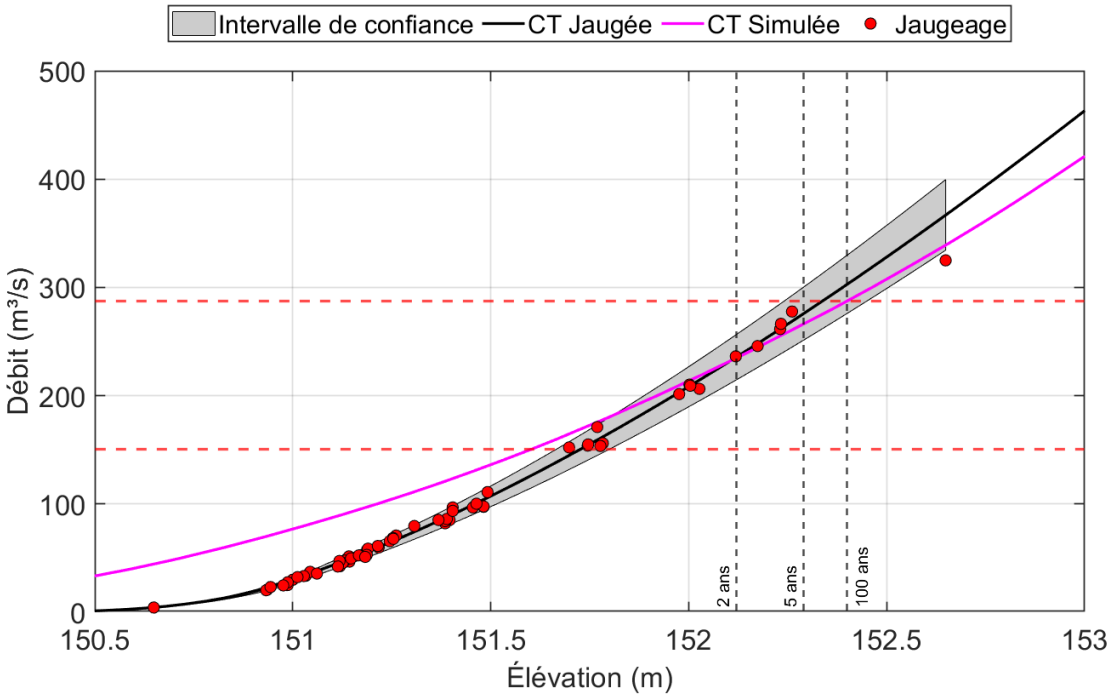


Figure 8.3 - CT jaugée et simulée à la station Chicoutimi (061004). Les lignes tiretées noires indiquent les élévations de PR 2, 5 et 100 ans et les lignes tiretées rouges les débits utilisés pour calibrer le MH. La zone grise correspond à l'intervalle de confiance 95% autour de la CT jaugée.

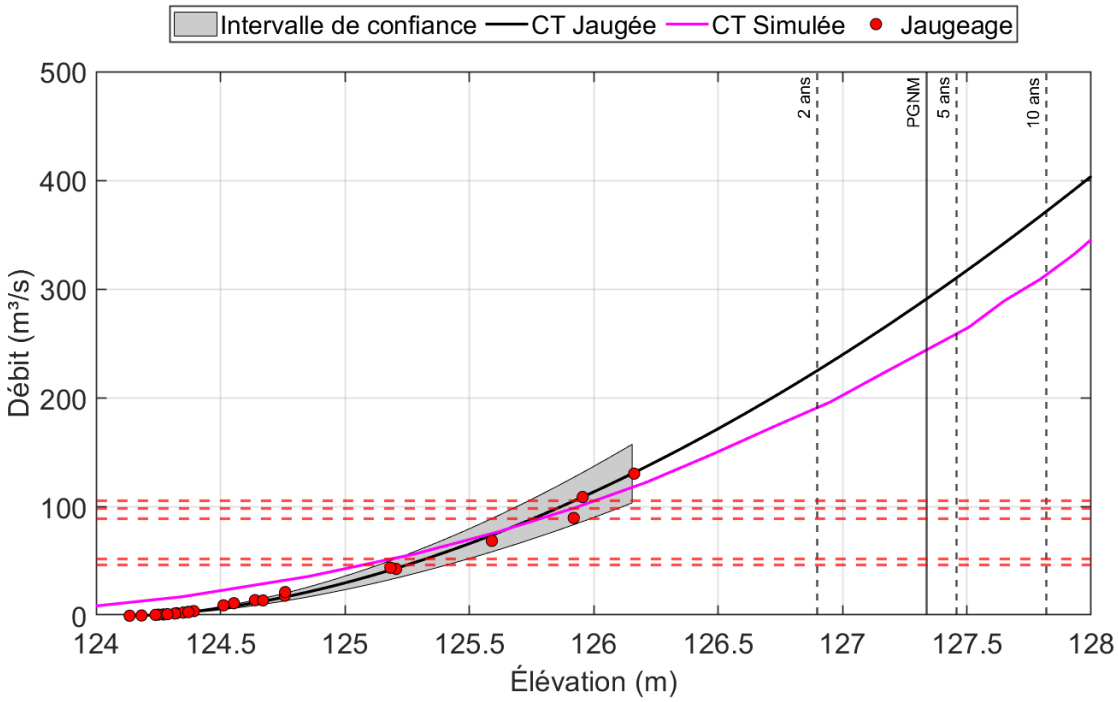


Figure 8.4 - CT jaugée et simulée à la station Bulstrode (030106). Les lignes tiretées noires indiquent les élévations de PR 2, 5 et 100 ans et les lignes tiretées rouges les débits utilisés pour calibrer le MH. La zone grise correspond à l'intervalle de confiance 95% autour de la CT jaugée. PGNM : plus grand niveau mesuré.

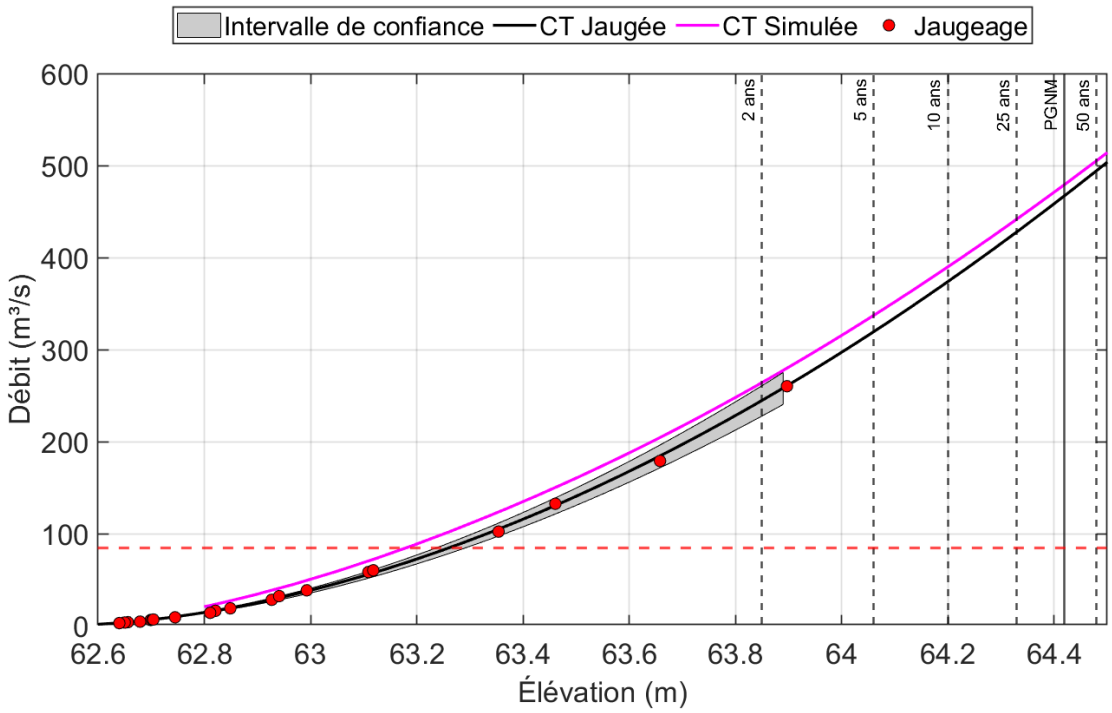


Figure 8.5 - CT jaugée et simulée à la station Farham (030302). Les lignes tiretées noires indiquent les élévations de PR 2, 5, 10, 25 et 50 ans et la ligne tiretée rouge le débit utilisé pour calibrer le MH. La zone grise correspond à l'intervalle de confiance 95% autour de la CT jaugée. PGNM : Plus grand niveau mesuré.

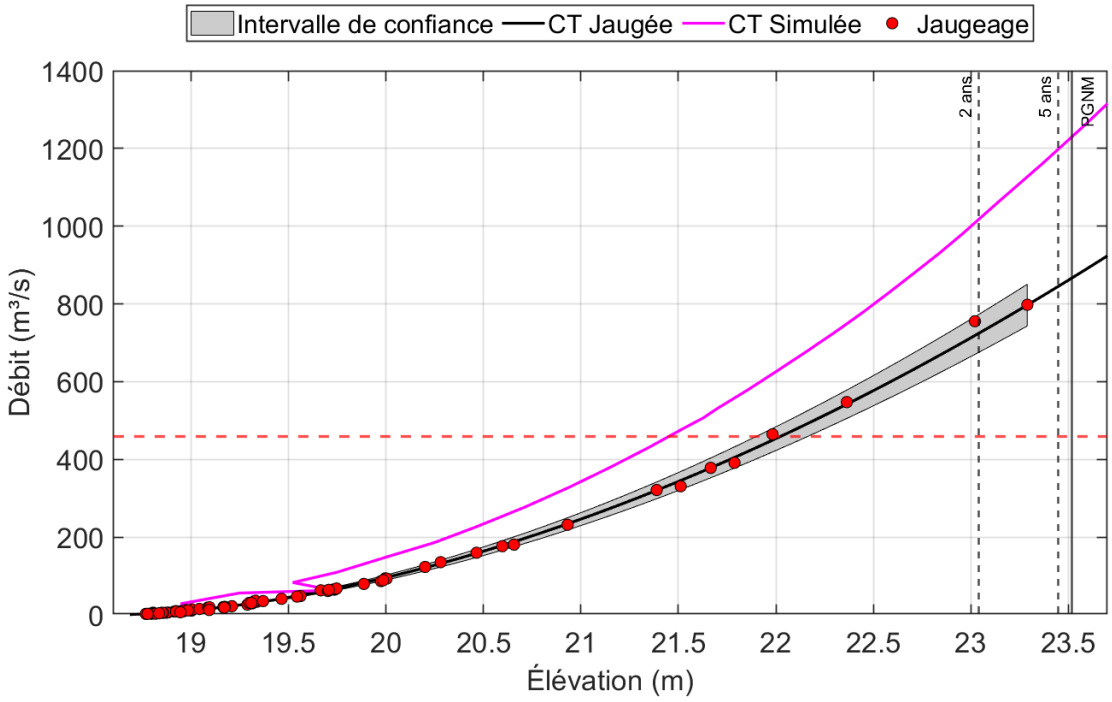


Figure 8.6 - CT jaugée et simulée à la station Saint-Hyacinthe (030345). Les lignes tiretées noires indiquent les élévations de PR 2, 5, 25 et 100 ans et la ligne tiretée rouge le débit utilisé pour calibrer le MH. La zone grise correspond à l'intervalle de confiance 95% autour de la CT jaugée. PGNM : Plus grand niveau mesuré.

8.3.3 Cas de la rivière des Anglais (030907)

La Figure 8.7 montre que pour la rivière des Anglais, les CT jaugées et simulées sont totalement différentes. Il est important de mentionner que la portion simulée de la rivière des Anglais est inclue dans un MH plus global ciblant davantage la rivière Chateauguay. Cette portion du MH comprend moins de relevés hydrométriques (trois comparativement à cinq pour la rivière Chateauguay) et à l'examen de la Figure 8.7, on constate que les débits des relevés hydrométriques sont sensiblement pareils. De plus, les débits simulés débutent à 11 m³/sec et il n'est donc pas possible de comparer les CT pour les plus petits jaugeages. Ces raisons sèment un doute sur la fiabilité de la CT simulée à la station de la rivière des Anglais.

8.3.4 Cas de la rivière Etchemin (023303)

Le cas de la rivière Etchemin est particulier puisque, en principe, les critères permettant de conclure que la MH est fiable sont respectées. En effet, d'une part, la Figure 8.8 montre que les relevés hydrométriques couvrent une gamme importante de débits et, d'autre part, les mesures des lignes d'eau ont été réalisées près de la SH qui ne se trouve pas en amont des tronçons modélisés. Toutefois, le plus grand relevé hydrométrique pour la calibration du MH a été réalisé dans des conditions d'embâcle (20 avril 2019). Cet embâcle a certainement influencé la relation élévation/débit en créant une zone de refoulement en amont. Ceci pourrait expliquer que, pour une même élévation, les débits sont beaucoup plus faibles pour la CT simulée que pour la CT jaugée notamment pour les forts débits. En revanche la CT jaugée est dans l'ensemble assez similaire à la CT simulée pour les élévations de moins de 82.5 m.

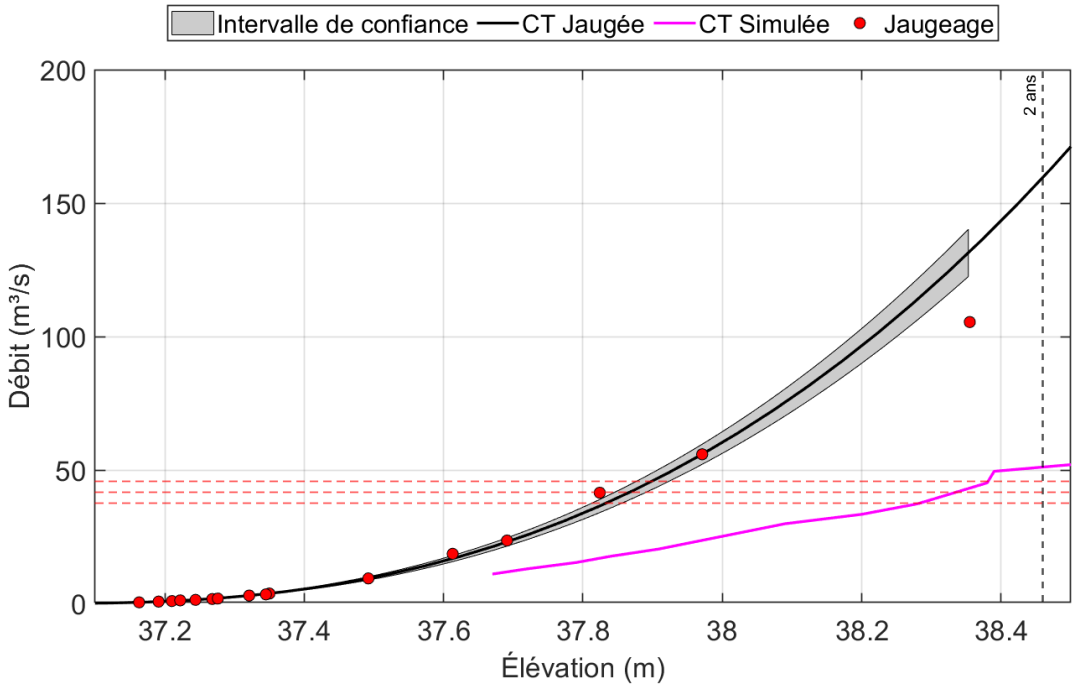


Figure 8.7 - CT jaugée et simulée à la station Des Anglais (030907). La ligne tiretée noire indique l'élévation de PR 2 ans et les lignes tiretées rouges les débits utilisés pour calibrer le MH. La zone grise définit l'intervalle de confiance 95% autour de la CT jaugée.

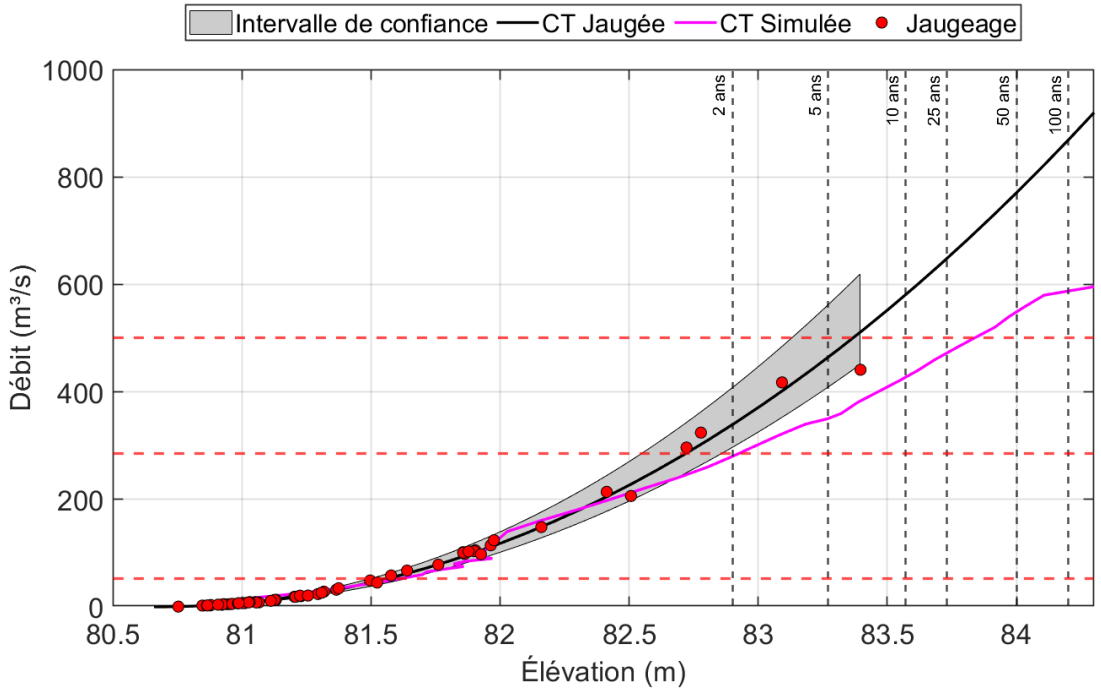


Figure 8.8 - CT jaugée et simulée à la station Etchemin (023303). Les lignes tiretées noires indiquent les élévations pour les PR 2, 5, 10, 20, 50 et 100 ans et les lignes tiretées rouges les débits utilisés pour calibrer le MH. La zone grise correspond à l'intervalle de confiance 95% autour de la CT jaugée.

8.4 Modélisation hydraulique : conclusions et perspectives

Le présent chapitre a permis de comparer les relations niveau-débit établies à partir des simulations hydrauliques aux CT issues des jaugeages. Ces simulations hydrauliques ont été réalisées dans le cadre du projet INFO-Crue. Cette comparaison a pour principal objectif de voir dans quelle mesure la modélisation hydraulique peut apporter une information complémentaire pertinente, notamment pour l'estimation des débits dans les parties extrapolées de la CT et afin de mieux comprendre le type de contrôle hydraulique en jeu.

Les résultats de ces comparaisons recoupent plusieurs cas de figures. Ainsi lorsque les CT jaugées et simulées sont relativement similaires, par exemple pour la SH de la rivière Aux Sables (061029), le niveau de confiance à accorder aux CT jaugées et simulées s'en trouve augmenté. La CT simulée apporte une certaine forme de validation de la CT jaugée notamment dans les parties extrapolées où l'on peut accorder une certaine confiance dans les MH si l'on dispose d'une représentation hydraulique valable du tronçon et de données de calibration du MH couvrant bien cette gamme de débit.

Par ailleurs, dans presque tous les cas, la CT jaugée compte plus de jaugeages, notamment pour les faibles débits, où les efforts de calibration des MH sont souvent moins importants. Ainsi pour la CT de la rivière Du Diable (040238), la CT jaugée est plus fiable

que la CT simulée pour les faibles débits alors qu'à l'inverse pour les PGNJ, il est possible que la CT simulée décrive mieux la relation niveau-débit.

Toutefois, dans bien des cas, les CT jaugées et simulées diffèrent pour certaines gammes de niveaux et parfois même sur l'ensemble des CT. On peut observer des écarts importants entre la CT simulée et les jaugeages. Plusieurs facteurs peuvent expliquer ces écarts : le nombre de relevés hydrométriques utilisés pour la calibration des MH est petit et couvre de façon restreinte la gamme des niveaux jaugés; la distance entre les tronçons où les relevés des lignes d'eau ont été réalisés et la SH est grande; ou encore la SH est située en amont de la zone modélisée. Il appert que ces facteurs sont cruciaux lorsque l'objectif est d'utiliser les MH en support aux CT jaugées. Or dans plusieurs des cas examinés l'un ou plusieurs de ces facteurs pouvaient être évoqués pour expliquer les différences entre CT jaugée et simulée.

Plusieurs facteurs locaux peuvent dès lors expliquer les différences entre CT simulées et CT jaugées. Il demeure cependant difficile de statuer sur le niveau de confiance relatif qui peut être accordé à l'une ou l'autre de ces CT lorsqu'elles diffèrent. Dans certains cas, on peut présumer que la CT simulée est plus fiable (p. ex. si le passage en zone inondable est simulé alors qu'aucun jaugeage dans cette gamme de niveau n'est disponible), alors que dans d'autres cas, la CT jaugée sera vraisemblablement plus fiable (p. ex. si l'on dispose de jaugeages alors que les relevés hydrométriques utilisés pour caler le modèle ne couvrent pas cette gamme de niveau).

CHAPITRE 9. APPLICATION DE LA MÉTHODE BARATIN

Le logiciel BaRatinAGE[5] reprend les concepts de la méthode BaRatin (*Bayesian rating curve framework*) qui permet de construire des CT à partir des jaugeages et de leurs incertitudes et des connaissances à priori sur les contrôles hydrauliques (Le Coz *et al.*, 2014). Le logiciel fournit une équation de type loi de puissance (voir Section 3.1, Équation 3.2), basée sur une combinaison des différents contrôles pour un site ou une SH donnés. Le lecteur est invité à consulter l'Annexe I pour tous les détails sur l'application de la méthode BaRatin aux sites sus étude.

L'utilisation du logiciel BaRatinAGE nécessite préalablement d'identifier les différents types de contrôles hydrauliques en jeu. La configuration de chaque contrôle est alors définie via différents paramètres physiques (Tableau I.1 de l'Annexe I). L'utilisateur peut choisir entre des contrôles de type déversoir ou par chenal de diverses formes (rectangulaire, parabolique ou encore triangulaire) et également des contrôles par orifices ou encore inconnus (voir la Section H.1 de l'Annexe H pour plus de détails sur les types de sections de contrôle proposés dans BaRatin).

Le logiciel BaRatinAGE a été utilisé et appliqué à neuf SH afin de comparer les CT produite par ce logiciel à celles développées à partir des régressions hydrauliques (Tableau I.2). Il est important de noter qu'aucune sortie sur le terrain n'a été réalisée afin de valider le type de contrôle hydraulique aux sites des différentes SH retenues. Des données LiDAR (Résolution 1m x 1 m)[6] ainsi que des images satellitaires (*Google Earth*) ont été utilisées pour identifier les contrôles hydrauliques. Il faut toutefois noter que les données LiDAR utilisées ne fournissent pas une bathymétrie complète des cours d'eau puisque seules les parties émergées des berges sont accessibles. La Figure 9.1 montre l'exemple du profil bathymétrique du transect situé près de la SH 022507 (Du Loup). La plus petite élévation de la Figure 9.1 est 126.2 m, correspondant à l'élévation de la surface de l'eau au moment de la prise de données, alors que plusieurs jaugeages ont été réalisés à cette station à des élévations allant jusqu'à 125.47 m. Ainsi, des changements de profil de la section de contrôle pour les faibles débits pourraient ne pas être visibles et intégrés à BaRatin.

De plus, les valeurs ainsi que les incertitudes par défaut ont été retenues (Tableau I.1). Finalement, une incertitude de ±5% a été utilisée pour tous les jaugeages. Il s'agit également de la valeur par défaut dans BaRatinAGE (concernant les incertitudes sur les jaugeages, voir le Chapitre 6 de Mailhot *et al.*, 2022).

---

[5] BaRatinAGE : Méthode BaRatin – River Hydraulics (inrae.fr)

[6] LiDAR : LiDAR - Modèles numériques (terrain, canopée, pente) - Forêt ouverte - Données Québec (donneesquebec.ca)

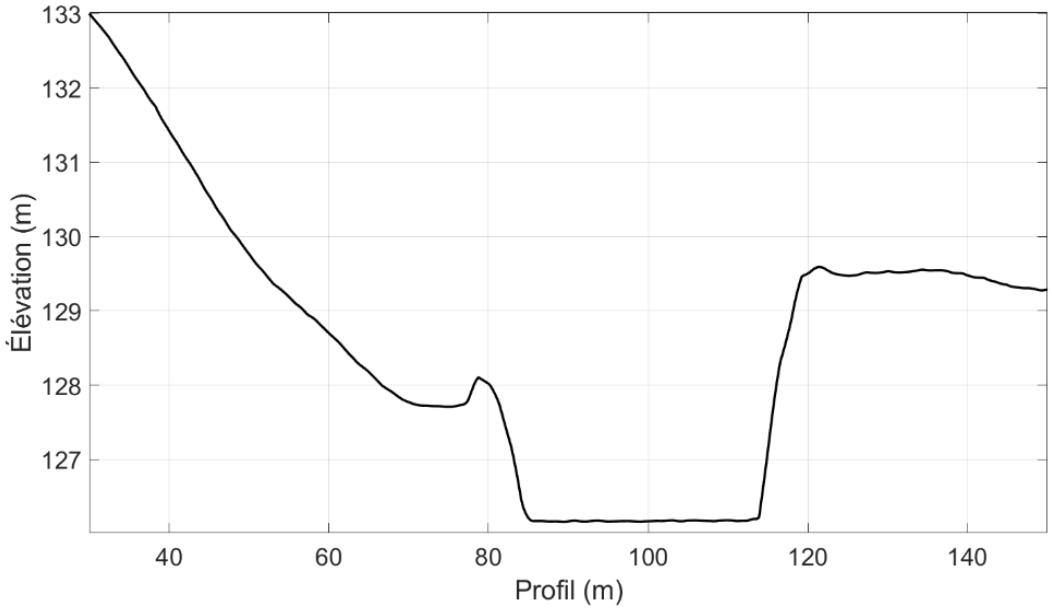


Figure 9.1 - Profil bathymétrique pour un transect situé près de la SH 022507.

Les niveaux jaugés et mesurés aux SH réfèrent très souvent à un niveau de référence local (p. ex. repère local) et ne peuvent donc être associés aux données d'élévation du LiDAR qui ont pour référence le niveau de la mer. Ainsi, seulement les SH pour lesquelles les écarts entre les niveaux de référence locaux et le niveau de la mer, désignés par facteurs de correction au Tableau I.2, sont disponibles ont été considérées (au sujet de ces facteurs de correction, voir la Section 9.1 Mailhot *et al.*, 2022).

Le logiciel BaRatinAGE a été appliqué à des SH présentant diverses caractéristiques. La Section 9.1 montre des cas de SH où une modification majeure de la section de contrôle est observable et où les PGNM sont plus grands que les PGNJ et semblent dépasser la modification de la section de contrôle en question. La Section 9.2 porte quant à elle sur des SH situées en aval de barrages. La Section 9.3 présente un cas avec une section de contrôle ayant une géomorphologie très variable dans le temps et la Section 9.4 un cas avec un profil de section de contrôle très complexe. Finalement, la Section 9.5 présente trois situations de SH avec de longs historiques et de nombreux jaugeages.

9.1 Application à des SH avec modifications majeures de la section de contrôle

Les PGNM des SH Du Loup (022507, Figure I.1) et L'Acadie (030421, Figure I.3) sont largement supérieurs aux PGNJ et semblent également atteindre la plaine inondable ou à tout le moins dépasser certains seuils où sont observées des modifications importantes de la section de contrôle (Figures I.2 et I.4). Il est donc intéressant de voir si l'ajout d'informations sur les contrôles hydrauliques permettra un meilleur ajustement aux jaugeages notamment pour les débits élevés et ainsi comparer la CT obtenue par BaRatin à celle obtenue après ajustements aux jaugeages. Les Sections I.1 et I.2 de l'Annexe I peuvent être consultées pour des détails supplémentaires sur ces SH.

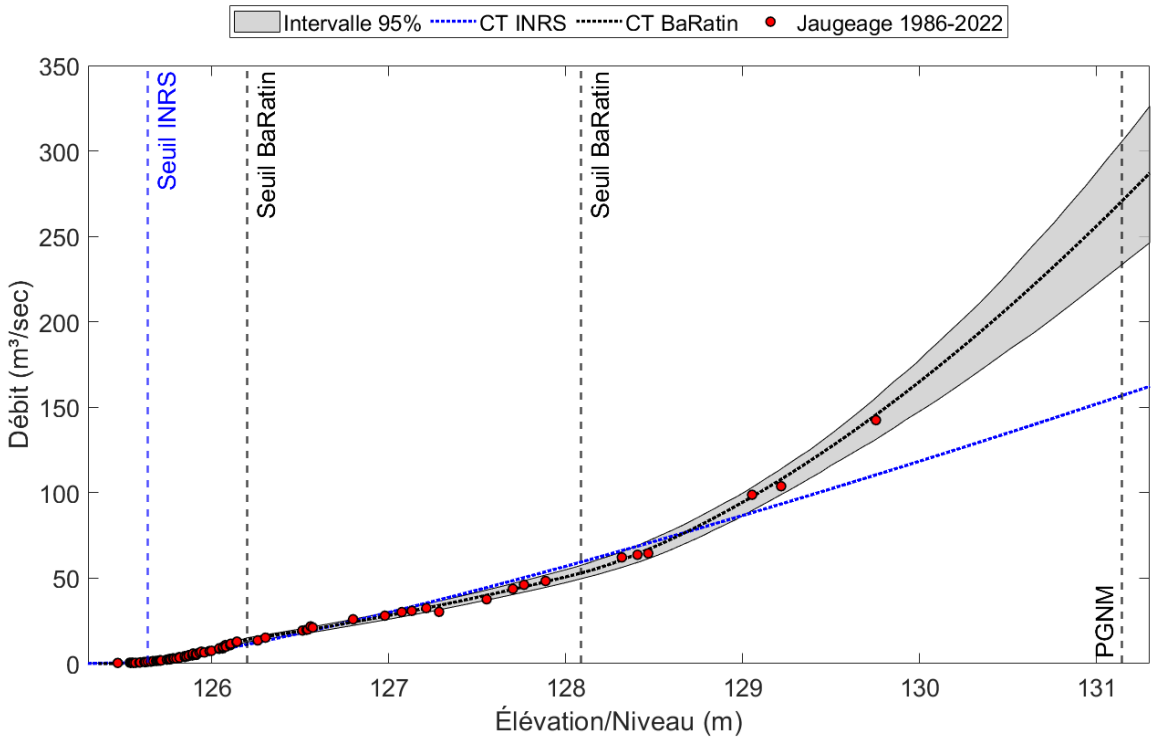
Trois contrôles ont été considérés dans BaRatinAGE pour la SH Du Loup (022507, Figure I.2). Un premier contrôle de type déversoir à seuil parabolique pour les très faibles débits (Tableau I.3), qui n'apparait pas à la Figure I.2 mais qui peut être observé sur certaines images historiques, suivi de deux contrôles de type chenal rectangulaire lorsque la profondeur d'écoulement augmente (Tableaux I.4 et I.5).

La Figure 9.2a compare les CT obtenues à partir de la méthode BaRatin (CT BaRatin) et à partir de l'approche proposée (CT INRS) pour toute l'étendue des niveaux mesurés. Cette figure montre un meilleur ajustement de la CT BaRatin par rapport aux jaugeages et ce tant pour les faibles débits (Figure 9.2b) que pour les débits plus élevés. Il convient de spécifier que la CT BaRatin pour laquelle on suppose l'existence de trois contrôles, a un plus grand nombre de degré de liberté pour s'ajuster aux jaugeages que la CT INRS qui est limitée à deux régressions hydrauliques. Les valeurs des paramètres a, b et c des CT de la Figure 9.2 sont présentées au Tableau I.6 de l'Annexe I.

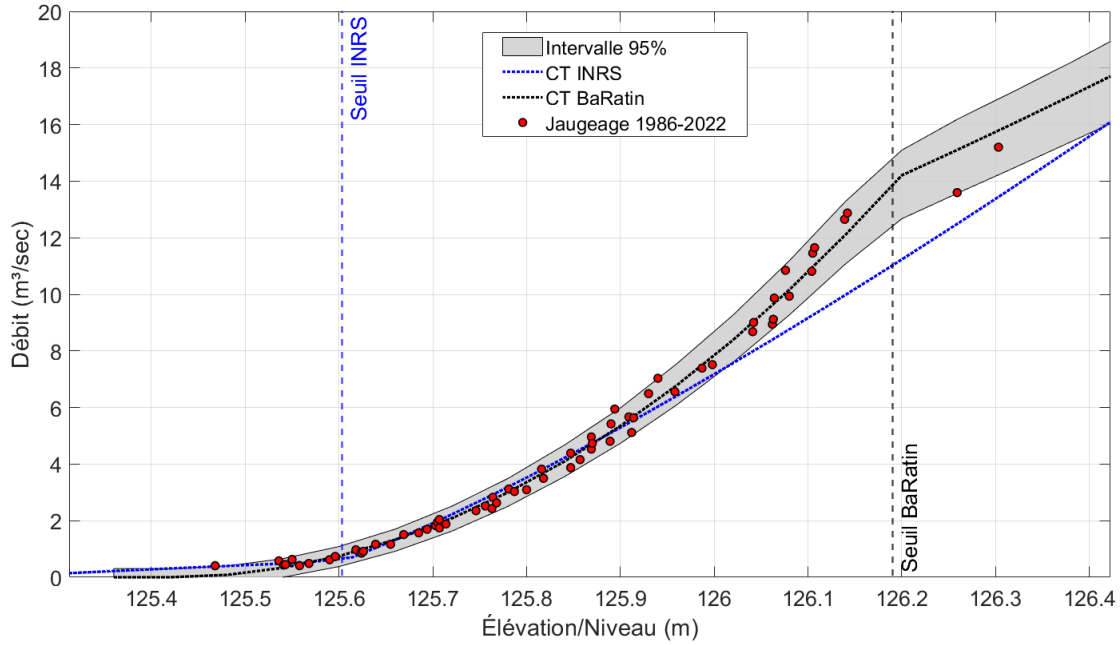
La Figure 9.2b montre les CT pour les faibles débits. On constate que la transition entre les deux régressions hydrauliques de la CT INRS survient à de très faibles élévations (125.603 m). Dès lors, une seule régression hydraulique est utilisée pour l'ajustement avec l'ensemble des jaugeages ce qui permet difficilement de rejoindre les trois plus grands jaugeages qui peuvent être associés à l'atteinte du lit majeur ou de la plaine inondable. Cela se traduit par une sous-estimation des débits qui tend à augmenter notamment dans la zone d'extrapolation de la CT.

Il est important de noter toutefois que la CT de la station Du Loup a été classée comme devant potentiellement être ajustée à plus de deux RH. En effet, le nombre maximum de RH pouvant être utilisé avait été fixé à deux et les quatre CT nécessitant plus de deux RH ont été traités distinctement (ces cas sont discutés à la Section 3.3 du Chapitre 3 et présentés à l'Annexe D). La CT de la station Du Loup semble inadéquate et devra être revue.

Deux contrôles ont été considérés dans BaRatinAGE pour la SH L'Acadie (030421, Figure I.4). Un premier contrôle de type chenal parabolique suivi d'un second contrôle de type chenal rectangulaire (Tableaux I.7 et I.8). La Figure 9.3 montre un meilleur ajustement de la CT BaRatin pour les plus grands jaugeages. De plus, une modification importante de la section de contrôle est apparente autour de 20.5 m (Figure I.4) et possiblement l'atteinte de la plaine inondable à 21 m. Ceci explique les différences entre les deux CT dans la zone d'extrapolation au-delà du PGNJ. Les valeurs des paramètres a, b et c se trouvent au Tableau I.9 de l'Annexe I.



(a)



(b)

Figure 9.2 Comparaison des CT de la méthode BaRatin (CT BaRatin) et des deux régressions hydrauliques (CT INRS) pour la SH 022507 (Du Loup) : a) pour l'ensemble des niveaux mesurés ; b) pour les niveaux inférieurs à 126.4 m. Les seuils indiquent les transitions entre les contrôles hydrauliques pour la CT BaRatin (seuil BaRatin) et entre les régressions hydrauliques (seuil INRS). PGNM : Plus grand niveau mesuré.

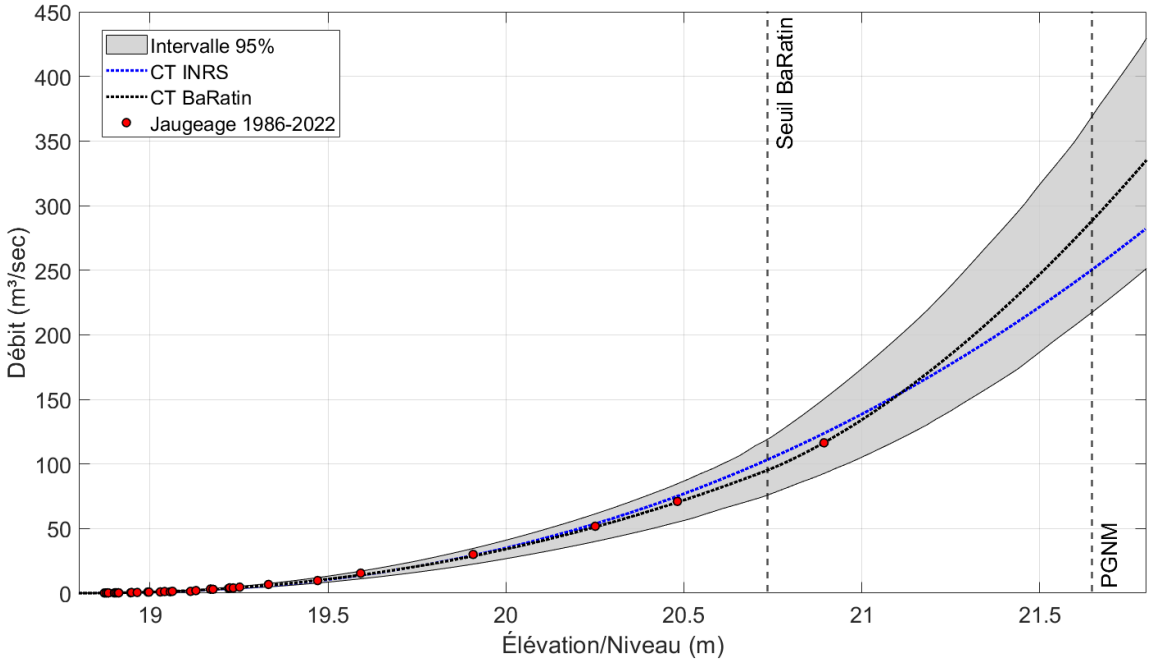


Figure 9.3 - Comparaison des CT de la méthode BaRatin (CT BaRatin) et des régressions hydrauliques (CT INRS) pour la SH 030421 (L'Acadie). Le seuil indique la transition entre les contrôles hydrauliques pour la CT BaRatin. PGNM : Plus grand niveau mesuré.

Ces résultats suggèrent que dans le cas de situations complexes, c.-à-d. de sections de contrôle comprenant des modifications majeures de profil et où l'on dispose de peu de jaugeages pour les niveaux au-delà de ces changements de profil, l'utilisation de BaRatin peut s'avérer avantageuse. En effet, l'ajout de contrôles hydrauliques représentant ces modifications de profil permet de développer une CT qui offre une meilleure représentation de ces changements et de leur impact sur la CT. De plus, les modifications de sections de contrôle caractérisant les SH Du Loup (022507) et L'Acadie (030421) se traduisent par une augmentation plus rapide des débits dans la partie extrapolée de la CT. Donc, lorsque ces modifications ne sont pas prises en compte, il peut en résulter une sous-estimation des débits pour les plus grands jaugeages et pour la partie extrapolée de la CT.

9.2 Application à des SH en amont de barrages

Pour les SH Noire (030304, Figure I.5) et Gordon (048603, Figure I.7), la section de contrôle est associée à un ouvrage de type barrage. Les Figures I.6 et I.8 présentent ces ouvrages. Il est important de noter que les informations précises sur ces barrages ne sont pas connues et que de nombreuses hypothèses ont été formulées pour l'application du logiciel BaRatinAGE. Ces deux SH présentent également des valeurs de paramètres a et c atypiques pour les CT INRS (voir Annexe E) avec des valeurs du paramètre a très petites et des valeurs de l'exposant c très élevées.

L'élévation à plein bord du barrage est d'environ 33 m et la largeur d'un peu plus de 121 m pour la SH Noire (Figure I.6). Le barrage comprend également deux ouvertures rectangulaires d'une hauteur d'environ 0.6 m et d'une largeur totale estimée de 4 m. Ainsi, deux contrôles de type déversoir rectangulaire ont été utilisés dans BaRatinAGE pour

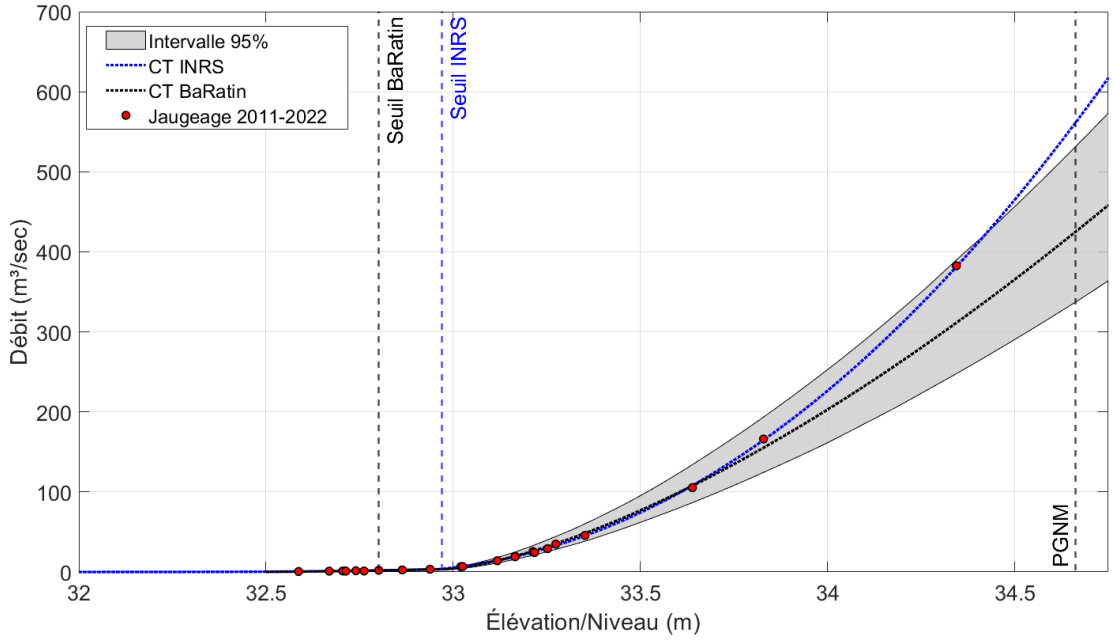
représenter les deux seuils (Tableaux I.10 et I.11). Pour la SH 048603 (Gordon; Figure I.8), l'élévation plein bord du barrage est d'environ 260 m. Deux orifices dont le diamètre a été estimé à 0.3 m, se trouvent à environ 0.6 m sous l'élévation plein bord. Un premier contrôle de type orifice a donc été utilisé dans BaRatinAGE suivi d'un second contrôle de type déversoir rectangulaire (Tableaux I.13 et I.14).

La Figure 9.4 compare les CT obtenues à partir de BaRatin et par régressions hydrauliques. Pour la SH Noire (030304; Figure 9.4a), les deux CT sont très similaires pour les plus faibles débits mais les écarts augmentent rapidement pour les débits plus élevés où la CT INRS s'ajuste mieux aux jaugeages La sous-estimation des débits pour la CT BaRatin pourrait s'expliquer par une mauvaise représentation du barrage dans le logiciel. Tel que mentionné précédemment, les dimensions exactes de l'ouvrage ne sont pas connues et des estimations à partir de photos et d'images ont été utilisées. Il pourrait être judicieux ultérieurement de réappliquer à nouveau la méthode BaRatin avec des données validées. Des tests ont été effectués et il appert qu'en augmentant l'incertitude sur la valeur du paramètre c du second contrôle (Tableau I.11), il est possible de se coller au dernier jaugeage et de réduire considérablement les écarts avec la CT INRS. Les valeurs des paramètres a, b et c se trouvent au Tableau I.12 de l'Annexe I.

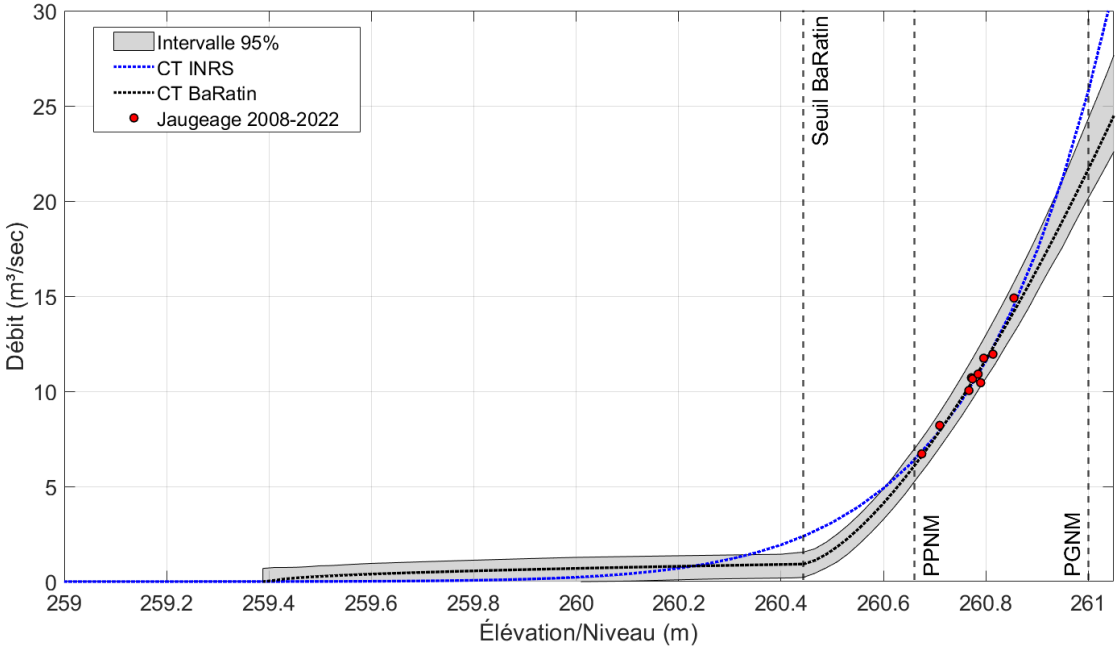
Pour la SH Gordon (048603; Figure 9.4b), on remarque que les deux CT sont très similaires pour l'intervalle de niveaux jaugés, mais que des écarts plus marqués sont observés en extrapolation notamment pour les plus faibles débits. La prise en compte de l'ouvrage dans BaRatin permet de penser que les débits estimés sont plus réalistes en deçà de la zone de transition et lorsque le niveau de l'eau atteint le plein bord du barrage d'autant plus que de tels niveaux n'ont jamais été jaugés (Figure 9.4b). Pour les débits plus élevés, bien que les écarts augmentent, ils restent somme toute peu élevés pour la gamme des niveaux mesurés. Les valeurs des paramètres a, b et c se trouvent au Tableau I.15 de l'Annexe I.

Ainsi, les SH où le seuil correspond à un barrage s'avèrent être des cas qui bénéficieraient de l'utilisation de BaRatin. Leur mise en place est relativement facile dans la mesure où les dimensions et caractéristiques des ouvrages sont disponibles et permettrait ainsi une représentation plus fiable de la relation niveau-débit en extrapolation.

Il est également possible que d'autres types de SH auraient avantages à être analysés avec le logiciel BaRatinAGE, par exemple certaines stations avec des contrôles par seuil qui agissent pratiquement comme des barrages et qui présentent souvent un large bassin juste en amont du seuil. Les SH Eaton (030234) et Grande Rivière de la Baleine (093801) en sont de bons exemples.



(a)



(b)

Figure 9.4 - Comparaison des CT de la méthode BaRatin (CT BaRatin) et des régressions hydrauliques (CT INRS) pour les SH : a) 030304 (Noire) et b) 048603 (Gordon). Le seuil indique la transition entre les contrôles hydrauliques pour les CT BaRatin et les deux RH de la CT INRS. PGNM : Plus grand niveau mesuré et PPNM : Plus petit niveau mesuré.

9.3 Application à une SH avec géomorphologie variable

La SH Nelson (050915; Figure I.9) semble être une station où le contrôle change régulièrement. Uniquement pour la période comprise entre 2006 et 2022, le Ministère a développé neuf CT différentes. L'application de la méthode décrite dans ce projet résulte en deux CT, l'une comprenant 57 jaugeages (2006-2016) et l'autre 28 jaugeages (2016-2022). La Figure I.10 montre que près de la section de contrôle, les PGNM sont loin du lit majeur.

Un seul contrôle de type chenal rectangulaire a été considéré dans BaRatin pour cette station (Figure I.10; Tableau I.16). Considérant qu'il n'existe qu'un jeu de données LiDAR pour représenter le profil de la section de contrôle et que ces données sont représentatives de la section de contrôle au moment de leur acquisition, il s'avère difficile de représenter le profil de la section pour des périodes précises.

La Figure 9.5 compare la CT estimée à partir de BaRatin (CT BaRatin) à la CT INRS pour les périodes 2006-2016 et 2016-2022. Pour la première période, on constate que la CT BaRatin s'ajuste mieux aux jaugeages dont les élévations sont comprises entre 155.5 et 156 m. Cependant, pour les débits plus élevés, elle a tendance à surestimer les débits jaugés. À l'inverse, la CT INRS s'ajuste mieux aux débits plus élevés mais sous-estimera les débits notamment dans l'intervalle 155.5 et 156 m. Pour les CT de la période 2016-2022, la CT BaRatin s'ajuste également mieux aux débits plus faibles et tend à surestimer les débits lorsque l'élévation est supérieure à 156 m. Quant à la la CT INRS, elle s'ajuste bien aux faibles débits et passe au centre des six derniers jaugeages. On constate également que l'intervalle de confiance à 95% est très grand pour la période 2016-2022 et que les quatre CT se retrouvent à l'intérieur de cet intervalle. Les valeurs des paramètres a, b et c des CT de la Figure 5 sont présentées au Tableau I.17 de l'Annexe I.

Pour ce type de cas, la méthode BaRatin ne présente pas d'avantage puisque les conditions hydrauliques de la section de contrôle changent régulièrement et que la configuration retenue risque de ne pas être représentative de la relation niveau-débit pour une majorité de jaugeages. Toutefois, il n'est pas sans intérêt de comparer les CT obtenues avec BaRatin aux CT développées à partir de régressions hydrauliques. Ces comparaisons permettent d'analyser d'autres cas plausibles et peuvent fournir une information utile quant aux incertitudes sur l'estimation des débits à partir des régressions hydrauliques.

9.4 Application à une SH avec un profil de section de contrôle complexe

La SH David (030316) est un cas particulier où la configuration hydraulique près de la section de contrôle est complexe. La Figure I.11a montre l'emplacement de la SH ainsi que le transect retenu correspondant au profil de la Figure I.12. La Figure I.11b montre les élévations pour la même zone et permet d'observer un ancien méandre difficilement observable sur la Figure I.11a. Alors que la Figure I.12 suggère que la plaine inondable est atteinte à une élévation d'environ 14 m, l'existence de cet ancien méandre pourrait signifier qu'une partie de l'écoulement pourrait en partie se déverser dans celui-ci à des élévations plus faibles, influençant ainsi à la fois l'amont et l'aval de la SH.

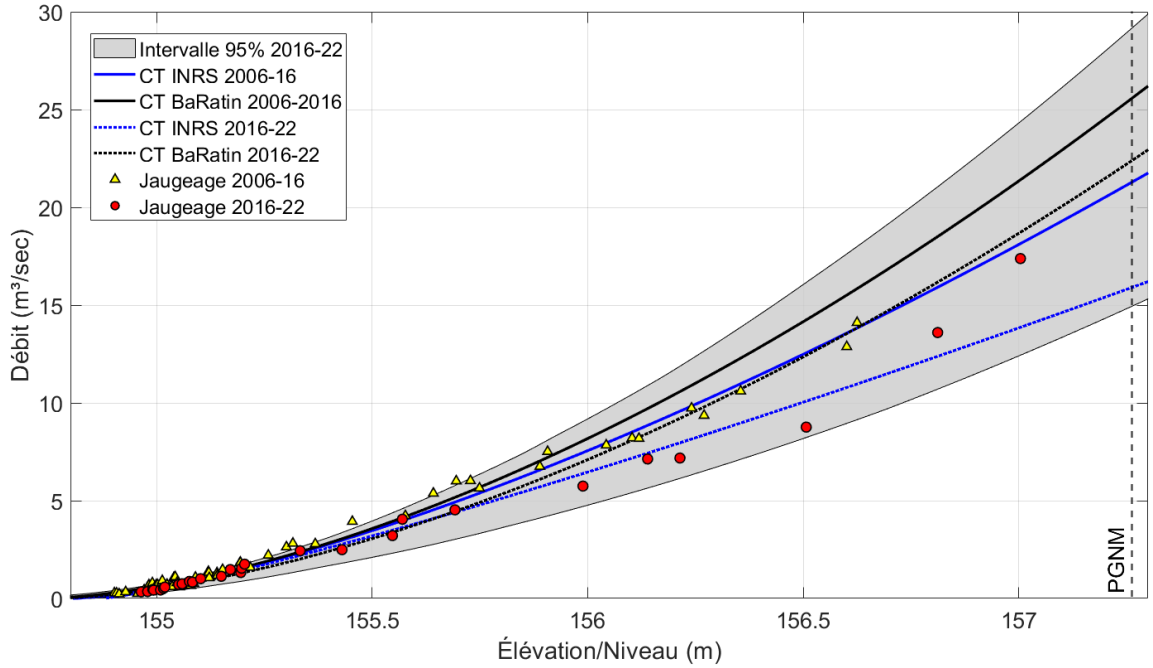


Figure 9.5 - Comparaison des CT de la méthode BaRatin (CT BaRatin) et des régressions hydrauliques (CT INRS) pour la SH Nelson (050915) pour les périodes 2006-2016 (trait continus) et 2016-2022 (traits pointillés). PGNM : Plus grand niveau mesuré.

Une section de contrôle de type chenal parabolique a été utilisée dans BaRatinAGE (Tableau I.18). La Figure 9.6 compare les CT INRS et BaRatin et montre un très bon accord entre les deux CT. Toutefois, dans les deux cas, on constate une surestimation des débits si l'on considère seulement les deux plus grands jaugeages. Cette situation suggère une modification des propriétés hydrauliques de la section de contrôle un peu avant 14 m, mais qui ne peut être attribuée à l'atteinte de la plaine inondable. En effet, l'atteinte de la plaine inondable se traduirait par une augmentation plus prononcée des débits alors que c'est plutôt la situation inverse qui survient dans le cas présent. Il est possible que l'ancien méandre, par sa configuration et la densité de végétation qui peuvent affecter l'écoulement des eaux favorise une augmentation du niveau d'eau près de la SH sans que les débits augmentent au même rythme. À noter que l'ajout d'un second contrôle dans BaRatin pour représenter la plaine inondable se traduit nécessairement par une augmentation plus rapide des débits et ce malgré l'utilisation de coefficients de rugosité plus élevés. Les valeurs des paramètres a, b et c des CT de la Figure 9.6 sont présentées au Tableau I.19 de l'Annexe I.

Ainsi, l'utilisation de BaRatinAGE donne des résultats très similaires à ceux de la CT INRS. Ce constat suggère d'être prudent dans l'estimation des débits pour des élévations supérieures à 13.5 m et de songer à revoir la position de la SH afin d'éviter l'influence possible de l'ancien méandre.

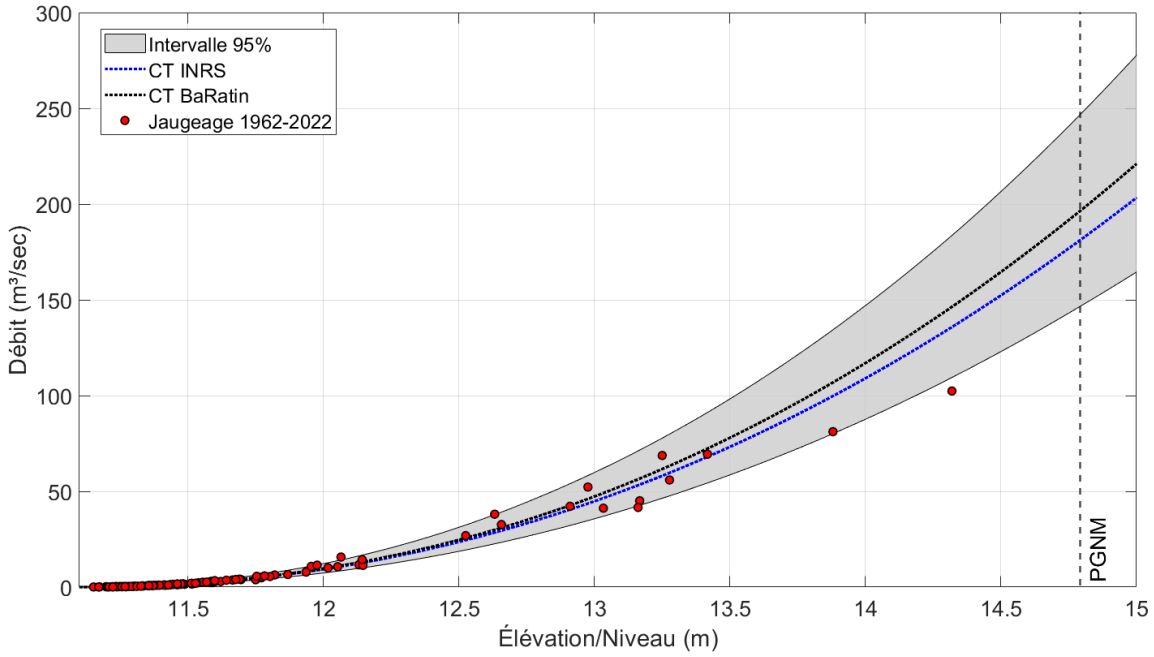


Figure 9.6 - Comparaison de la CT de la méthode BaRatin (CT BaRatin) et de la régression hydraulique (CT INRS) pour la SH 030316 (David), PGNM : Plus grand niveau mesuré.

9.5 Application à des SH avec de longs historiques

Les trois SH qui suivent ont de longs historiques, des sections de contrôles apparemment stables et de nombreux jaugeages :

- Famine (023422; Figure I.13) avec une seule CT représentée par une RH comprenant 135 jaugeages couvrant la période 1964-2022;
- Sainte-Anne (050408; Figure I.15) avec deux CT représentées par une RH comprenant 53 jaugeages pour la période 1965-2001 et 20 jaugeages pour la période 2005-2022;
- Jacques-Cartier (050801; Figure I.17) avec une CT représentée par une RH comprenant 12 jaugeages pour la période 1925-1969 et une CT représentée par deux RH comprenant 52 jaugeages pour la période 1972-2022.

Les Figures I.14, I.16 et I.18 montrent les profils des sections de contrôle pour les SH Famine (023422), Sainte-Anne (050408) et Jacques-Cartier (050801) respectivement. On constate que pour la SH 023422 (Famine), le PGNJ est près de la plaine inondable sans toutefois l'atteindre alors que le PGNM la dépasse largement. Cette situation implique que les débits estimés au-delà du PGNJ peuvent être sujets à des incertitudes plus grandes en raison d'un changement possible des propriétés hydrauliques de la section de contrôle à ce niveau. Pour les deux autres SH, tant le PGNJ que le PGNM se situent dans le lit mineur.

Les sections de contrôle des SH Famine (023422) et Jacques-Cartier (050801) sont représentées par un chenal parabolique (Tableaux I.20 et I.24) dans BaRatin. Un contrôle

de type chenal rectangulaire est considéré pour la SH Sainte-Anne (050408), (Tableau I.22). Le même type de contrôle a été considéré dans BaRatin pour les deux CT couvrant des périodes différentes des SH Sainte-Anne et Jacques-Cartier.

La Figure 9.7 compare les CT estimées par BaRatin (CT BaRatin) et à partir des jaugeages (CT INRS) pour la SH Famine (023422). On remarque que les deux CT sont très similaires notamment dans la zone couverte par les jaugeages. En extrapolation et jusqu'à l'atteinte du PGNM, les écarts entre les CT restent faibles. Les valeurs des paramètres a, b et c des CT de la Figure 9.7 sont présentées au Tableau I.21 de l'Annexe I.

Pour la SH Sainte-Anne (050408), les lignes pleines bleues et noires de la Figure 9.8 représentent la période 1965-2001 et sont associées aux jaugeages représentés par des triangles jaunes. Les lignes pointillées sont quant à elles associées à la période 2005-2022 et aux jaugeages représentés par des cercles rouges. Le principal constat pour cette figure est que les quatre CT sont très près les unes aux autres et ce jusqu'à l'atteinte du PGNM. Les valeurs des paramètres a, b et c des CT de la Figure 9.8 sont présentées au Tableau I.23 de l'Annexe I.

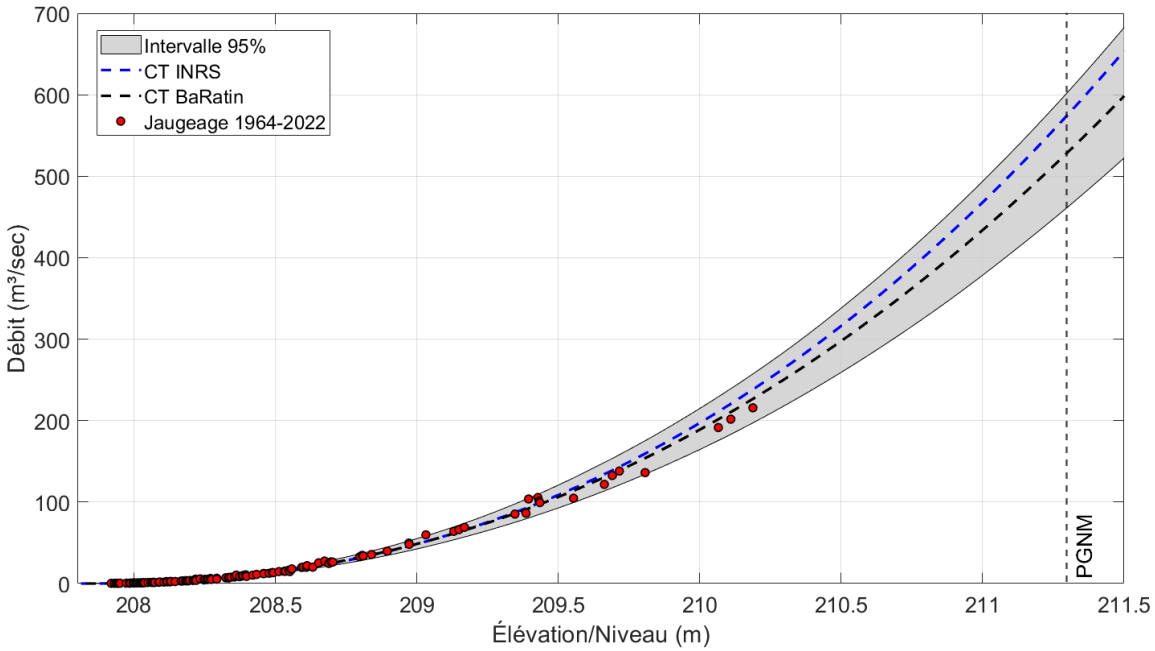


Figure 9.7 - Comparaison des CT estimées à partir de BaRatin (CT BaRatin) et des jaugeages (CT INRS) pour la SH 023422 (Famine), PGNM : Plus grand niveau mesuré.

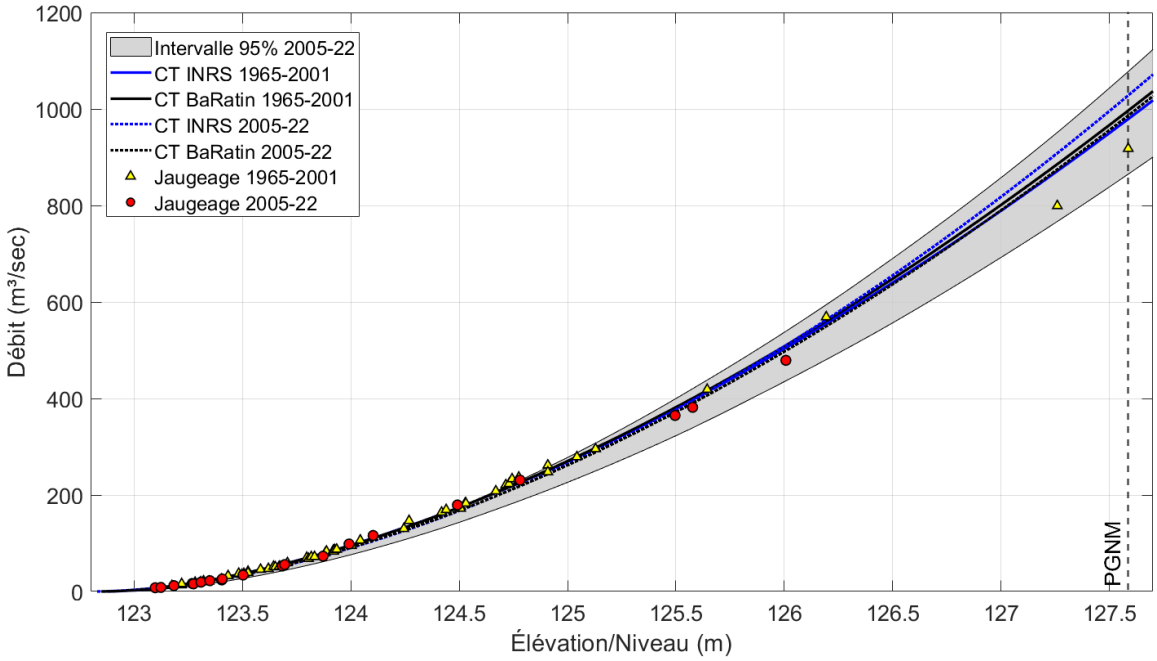


Figure 9.8 - Comparaison des CT estimées à partir de BaRatin (CT BaRatin) et des jaugeages (CT INRS) pour la SH 050408 (Sainte-Anne) pour les périodes 1965-2001 (lignes continues) et 2005-2022 (lignes tiretées). PGNM : Plus grand niveau mesuré.

Les CT de deux périodes sont présentées à la Figure 9.9 pour la SH Jacques-Cartier (050801). Les lignes pleines sont associées aux jaugeages de la période 1925-1969 (triangles jaunes) et sont pratiquement pareilles dans la zone d'interpolation et restent très similaires même en extrapolation et jusqu'à l'atteinte du PGNM. Pour la période 1972-2022, les deux CT (lignes pointillées) sont elles aussi très similaires en interpolation, mais la CT INRS (bleue), qui comprend deux RH, s'ajuste mieux aux plus grands jaugeages. Les écarts augmentent jusqu'à l'atteinte du PGNM où la CT INRS donne des débits plus faibles résultant de l'ajustement avec les deux plus grands jaugeages. Les valeurs des paramètres a, b et c des CT de la Figure 9.9 sont présentées au Tableau I.25 de l'Annexe I.

Ces trois cas montrent que dans l'ensemble, pour des SH caractérisées par de longs historiques, de nombreux jaugeages et des sections de contrôle stables, les CT obtenues avec BaRatin et par régressions hydrauliques sont semblables. Dès lors, la plus-value associée à l'utilisation de BaRatin reste marginale. Il semble donc préférable de cibler et de se concentrer aux SH avec des contrôles plus complexes telles celles présentées aux sections précédentes.

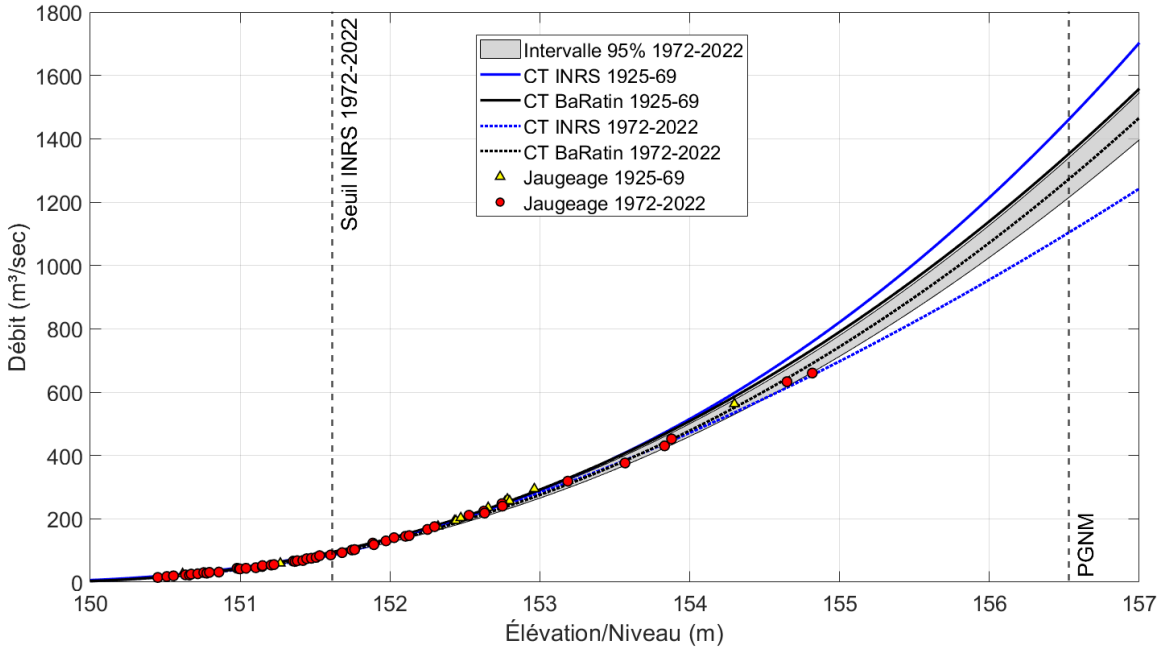


Figure 9.9 - Comparaison des CT estimées à partir de BaRatin (CT BaRatin) et des jaugeages (CT INRS) pour la SH 050801 (Jacques-Cartier) pour les périodes 1925-1969 (lignes continues) et 1972-2022 (lignes tiretées). Le seuil indique la transition entre les RH (CT INRS). PGNM : Plus grand niveau mesuré.

9.6 Application de la méthode BaRatin : conclusions et perspectives

La méthode BaRatin (*Bayesian rating curve framework*) permet de construire des CT à partir des jaugeages et de leurs incertitudes et des connaissances *à priori* sur les contrôles hydrauliques. Le logiciel BaRatinAGE, basé sur la méthode BaRatin, nécessite préalablement d'identifier les différents types de contrôles hydrauliques en jeu. L'utilisateur peut choisir entre des contrôles de type déversoir ou par chenal de diverses formes (rectangulaire, parabolique ou encore triangulaire).

BaRatin a été appliqué à huit SH. Les résultats montrent que l'application de BaRatin est intéressante lorsque

- les PGNM dépassent largement les PGNJ (zone d'extrapolation importante de la CT ajustée aux jaugeages);
- les PGNM atteignent ou dépassent, sur la base d'une analyse de la section de contrôle, la plaine inondable et ne sont pas adéquatement couverts par les jaugeages (PGNJ n'atteint pas ces niveaux).

Pour ces SH, il est possible d'intégrer des considérations sur le contrôle hydraulique dans la construction de la CT alors que les jaugeages ne permettent pas d'explorer les impacts d'un changement de contrôle sur la CT. Par exemple, pour la SH L'Acadie (030421), trois contrôles ont été considérés dans BaRatin, dont un associé à la plaine inondable alors qu'un seul jaugeage est disponible au-delà du passage en plaine inondable. Ce faisant, l'introduction d'information sur le contrôle hydraulique permet une investigation de la CT dans la partie en extrapolation de la CT jaugée.

L’utilisation de la méthode est également avantageuse pour les SH situées en amont des barrages. En effet, le type de contrôle hydraulique peut être plus précisément défini dans ces cas lorsque l’on dispose de données sur le barrage. Qui plus est, pour ce type de SH, les CT ajustées aux jaugeages sont parfois associées à des valeurs de paramètres atypiques (voir Section 4.2). Il peut être intéressant alors d’appliquer BaRatin afin de comparer les CT et les valeurs des RH décrivant les CT. À noter toutefois que la CT BaRatin ne permet pas nécessairement un meilleur ajustement aux jaugeages comme c’est le cas pour la SH 030304 (Noire). Un examen critique des CT Baratin s’impose même dans ces cas.

Pour les CT où le contrôle hydraulique est instable, tel celui à la SH Nelson, BaRatin ne semble pas présenter d’avantage puisque les conditions hydrauliques de la section de contrôle changent régulièrement et que le type de contrôle retenu risque de ne pas être représentatif de la relation niveau-débit de certaines périodes. Il demeure intéressant de comparer les CT obtenues avec BaRatin à celles CT développées à partir des jaugeages. Ces comparaisons peuvent fournir une information utile sur les contrôles en place et sur les incertitudes sur l’estimation des débits à partir de la CT jaugée.

Enfin pour les SH comprenant un nombre élevé de jaugeages couvrant une vaste gamme de niveaux et de débits, les CT ajustées aux jaugeages et issues de BaRatin sont relativement similaires. L’utilisation de BaRatin dans ces cas ne présente pas d’avantages évidents.

CHAPITRE 10. MODÈLES D'INCERTITUDES SIMPLIFIÉS DES COURBES DE TARAGE

Différents modèles d'incertitudes pour les courbes de tarage (CT) ont été développés (voir le Chapitre 3). Pour chaque CT, des modèles utilisant les lois normale ou logistique homoscédastique ou hétéroscédastique en fonction du niveau étaient comparés et le modèle offrant la meilleure représentation des résidus relatifs entre débits estimés par la CT et débits jaugés était retenu.

Par souci de simplicité, le DEH souhaite voir si des modèles plus parcimonieux pourraient être utilisés. De préférence, ces modèles devraient être assez robustes et couvrir l'ensemble des CT. Ce chapitre propose différentes options et évalue l'efficacité de chacune à bien représenter l'ensemble des CT. La Section 10.1 présente les modèles proposés et la Section 10.2 évalue la performance globale de ces modèles. Enfin la Section 10.3 présente les principales conclusions de ces analyses et discute des perspectives de recherche.

10.1 Modèles d'incertitudes proposés

Les modèles de type homoscédastique (incertitude constante en fonction du niveau) utilisant les lois normale et logistique sont les modèles privilégiés pour près de 75% des CT (Tableau 3.3). Ces modèles sont très simples puisque la moyenne des incertitudes est nulle (c.-à-d. aucun biais) et comportent un seul paramètre à ajuster qui est associé à la variance de la distribution.

S'inspirant de ces derniers, cinq modèles simplifiés sont proposés dans ce qui suit. Afin d'écarter les cas problématiques, seules les CT des catégories A1-B1, A2-B2, et A2-B4 ont été considérées pour un total de 332 CT. Les cinq modèles considérés sont :

1. Distribution normale homoscédastique globale
2. Distribution logistique homoscédastique globale
3. Distribution normale homoscédastique locale
4. Distribution logistique homoscédastique locale
5. Distribution hétéroscédastique globale

Ces modèles sont décrits aux paragraphes suivants.

1-2. Distributions normale et logistique homoscédastiques globales : Le premier modèle suppose que la distribution des incertitudes est décrite par une loi normale alors que le second modèle utilise une loi logistique où s est le paramètre d'échelle (à titre informatif, l'ET de la loi logistique correspond à $\sigma = s\pi/\sqrt{3}$). Un modèle homoscédastique est considéré dans les deux cas, c.-à-d. où le paramètre d'échelle de ces distributions est indépendant du niveau. Après ajustement aux 332 CT retenues, l'ET de la loi normale est estimé à 10.1% alors que celui de la loi logistique est de 8.5%.

3.-4. Distributions normale et logistique homoscédastiques locales : On sait par ailleurs que les incertitudes sont beaucoup plus importantes pour les CT de certaines stations et donc que le modèle global surestimera les incertitudes de certaines CT et les sous-estimera pour les autres. Par conséquent, un second type de modèle a été considéré où les modèles d'incertitude homoscédastiques utilisant une loi normale ou logistique sont ajustés à chaque CT. Les écarts-type des résidus sont estimés pour chaque CT et utilisés

pour représenter les incertitudes. Ce type de modèle simple a déjà été retenu à plus de 75% des CT (voir Tableau 3.3).

5. Distribution hétéroscédastique globale : Seuls des modèles homoscédastiques où les incertitudes ne dépendent pas du niveau ont été considérés jusqu'ici. Or, on sait que pour certaines CT, les incertitudes sont beaucoup plus importantes pour les débits d'étiage ou de crue. Un modèle inspiré de Coxon *et al.* (2015) est donc proposé afin de décrire ce type de modèle hétéroscédastique où le paramètre d'échelle des distributions dépend du débit (voir la Section 8.2 de Mailhot *et al*. 2022). Les résidus relatifs sont ainsi représentés par une distribution logistique de moyenne nulle et dont l'ET varie en fonction du débit normalisé. Ainsi, les résidus relatifs sont classés en fonction des débits normalisés en regroupant toutes les CT. Les résidus relatifs de chaque intervalle de débits normalisés sont ensuite ajustés à une loi logistique et les ET correspondants estimés. La Figure 10.1 présente l'évolution des ET en fonction du débit normalisé. Une formulation s'inspirant en partie de celle proposée par Coxon *et al*. (2015) a été utilisée pour représenter l'évolution des ET en fonction du niveau normalisée $\widetilde{Q}$:

$$\sigma_1 = \mathrm{a}\ \ln\left(\frac{\widetilde{Q}}{Q_1}\right) \qquad \text{pour } \widetilde{Q} < \widetilde{Q}_1 \tag{10.1}$$

$$\sigma_2 = \left[\mathrm{b}\exp\left(-\alpha\,\widetilde{Q}\right) + \mathrm{c}\right] \quad \text{pour } \widetilde{Q}_1 \leq \widetilde{Q} < \widetilde{Q}_2 \tag{10.2}$$

$$\sigma_3 = \mathrm{d}\ \ln\left(\frac{\widetilde{Q}}{Q_2}\right) \qquad \text{pour } \widetilde{Q}_2 \leq \widetilde{Q} \tag{10.3}$$

avec :

$$\sigma_1\left(\widetilde{Q} = \widetilde{Q}_1\right) = \sigma_2\left(\widetilde{Q} = \widetilde{Q}_1\right)$$
$$\sigma_2\left(\widetilde{Q} = \widetilde{Q}_2\right) = \sigma_3\left(\widetilde{Q} = \widetilde{Q}_2\right)$$

où a, b, c, d, α, Q_1, Q_2, $\widetilde{Q}_1$, et $\widetilde{Q}_2$ sont des paramètres à ajuster et $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ les ET, exprimés en pourcentages, des trois distributions logistiques utilisées pour représenter les trois intervalles de débits normalisés $\widetilde{Q} < \widetilde{Q}_1$, $\widetilde{Q}_1 \leq \widetilde{Q} < \widetilde{Q}_2$ et $\widetilde{Q} \geq \widetilde{Q}_2$ (Figure 10.1). Les ET sont ainsi ajustés à trois fonctions chacune représentative de l'évolution des ET sur une gamme de valeurs des débits normalisés. Cette approche est un peu plus complexe que les précédentes mais elle permet de représenter l'hétéroscédasticité des incertitudes. La Figure 10.2 présente les biais moyens des distributions logistiques ajustées à chacun des intervalles de débits normalisés. On constate que les biais demeurent faibles dans la fourchette de débit normalisé intermédiaire, mais que des sous-estimations sont possibles pour les plus petits débits normalisés ($\widetilde{Q} \lesssim 0.05$) et des surestimations pour les plus grands débits normalisées ($\widetilde{Q} \gtrsim 3.0$), ces dernières augmentant rapidement lorsque le débit normalisé augmente.

10.2 Performance des modèles

La performance des différents modèles d'incertitudes a été évaluée pour chaque CT à l'aide du test de Kolmogorov-Smirnov au seuil de 95%. Pour chaque CT, on vérifie si la distribution empirique des résidus relatifs est significativement différente de la distribution obtenue à partir des modèles d'incertitudes proposés. Ensuite, on calcule la fraction des CT pour laquelle le test estime que la distribution est adéquate.

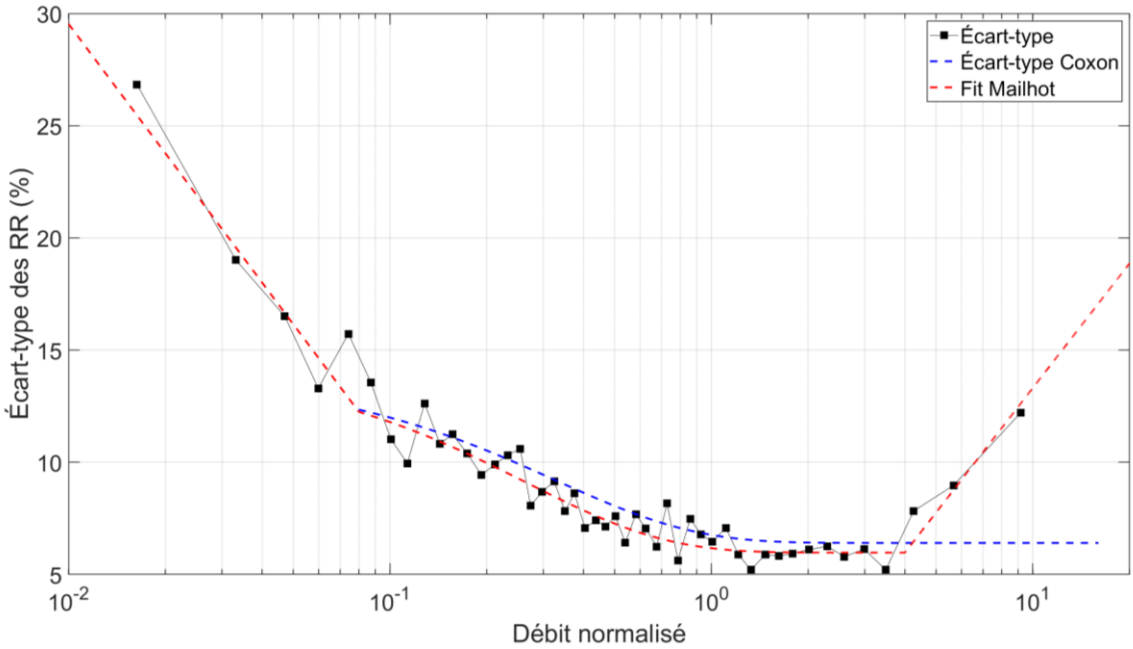


Figure 10.1 -: Écart-types des résidus relatifs aux 332 séquences retenues en fonction de la moyenne des débits normalisés appartenant à chaque intervalle de valeurs. A noter que l'axe des x est logarithmique. La courbe en tiret bleue correspond à l'équation de Coxon *et al.* (2015) ($\sigma = \pi/\sqrt{3}\ \left[4.18\exp\left(-3.051\,\tilde{Q}\right) + 3.531\right]$ où $\tilde{Q}$ est le débit normalisé. La gamme de débit normalisé de cette courbe respecte les valeurs de débits normalisés considérées par Coxon *et al*. (2015). La courbe en tiret rouge correspond aux équations 10.1, 10.2 et 10.3 (les valeurs des paramètres sont présentées au Tableau 10.1).

Tableau 10.1 - Valeurs des paramètres des équations 10.1, 10.2 et 10.3 après ajustements à la courbe de ET en fonction du débit normalisé (Figure 10.1). Les ET sont exprimés en pourcentages.

Paramètres	Valeurs
a	-8.315
b	8.48
c	5.97
d	8.01
α	3.76
Q_1	0.35
Q_2	1.90
$\tilde{Q}_1$	0.08
$\tilde{Q}_2$	4.0

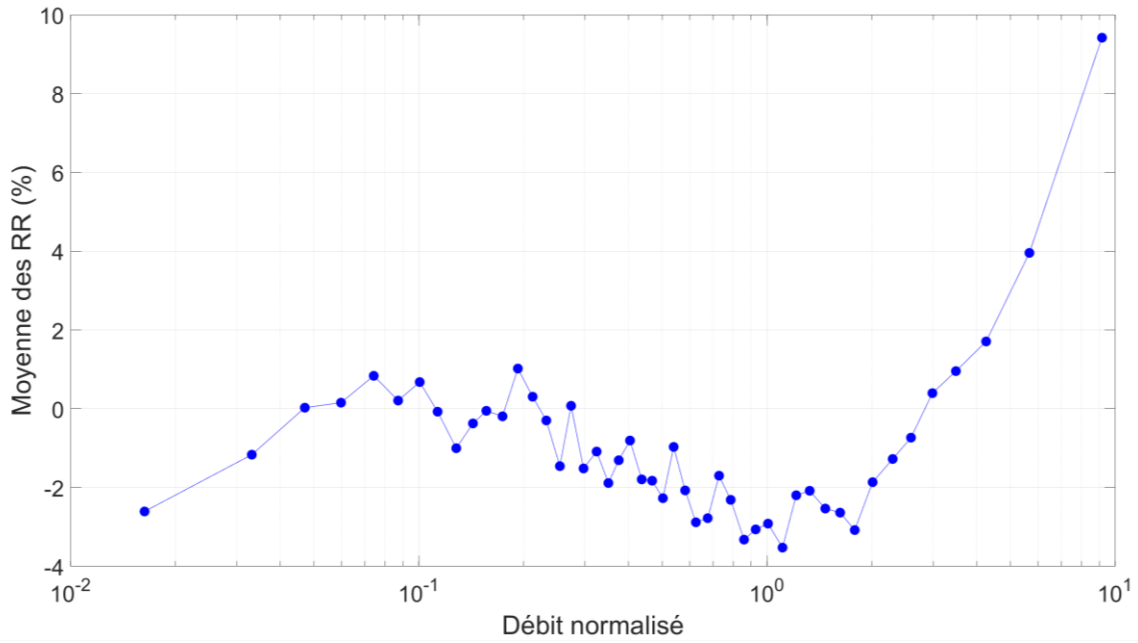


Figure 10.2 - Biais des résidus relatifs aux 332 séquences retenues en fonction de la moyenne des débits normalisés appartenant à chaque intervalle de valeurs. A noter que l'axe des x est logarithmique.

Le Tableau 10.2 présente les fractions des CT pour lesquelles chaque modèle représente adéquatement les distributions empiriques des écarts relatifs entre débits estimés par la CT et débits jaugés (test de Kolmogorov-Smirnov au seuil de 95%). Un premier constat est que les différents modèles ont un pourcentage d'acceptation relativement élevé et ce même les modèles globaux (72.9% pour la loi normale et 80.7% pour la loi logistique).

Des cinq modèles testés, les modèles basés sur les distributions normales et logistiques locales sont les plus souvent acceptés avec 93.4 et 93.7% des CT respectivement. Il est à noter que ces deux cas sont pratiquement interchangeables, puisque dans la quasi-totalité des CT où la loi normale n'est pas retenue, la loi logistique n'est pas retenue non plus (20 CT sur 22 CT). Les ET moyens des CT où ce type de modèle a été retenu est de 6.7% pour la loi normale et de 6.6% pour la loi logistique. Dans le cas des CT où ce modèle n'a pas été retenu les ET moyens sont de 18.0% pour la loi normale et de 18.8% pour la loi logistique. Sans surprise les ET moyens pour les CT où ce modèle est rejeté par le test de Kolmogorov-Smirnov sont beaucoup plus importants.

Le modèle hétéroscédastique global présente une performance intermédiaire par rapport aux autres méthodes (85.5%). Cette méthode est un peu plus complexe, mais à l'avantage d'incorporer l'hétéroscédasticité observée pour les faibles et grands débits.

Enfin les modèles homoscédastiques globaux ont été acceptés pour 72.9% des CT pour la loi normale et 80.7% des CT pour la loi logistique malgré leur grande simplicité. Suivant ces modèles, l'ET de l'erreur sur les débits estimés à toutes les CT pour tous les niveaux est de 10.1% pour la loi normale et de 8.5% pour la loi logistique.

Tableau 10.2 - Fractions des CT où les différents modèles d'incertitude proposés représentent adéquatement les distributions empiriques des écarts relatifs entre CT et débits jaugés selon le test de Kolmogorov-Smirnov (seuil de 95%).

Modèle	Fraction des CT acceptées (%)
Distribution normale globale	72.9
Distribution logistique globale	80.7
Distribution normale locale	93.4
Distribution logistique locale	93.7
Distribution hétéroscédastique globale	85.5

10.3 Modèles d'incertitudes simplifiés : conclusions et perspectives

L'équipe de la DEH désirait explorer la possibilité d'utiliser des modèles d'incertitudes plus simples que ceux développés dans le cadre du projet. Ces modèles plus simples devaient pouvoir être utilisés à grande échelle et fournir rapidement et simplement une information sur les incertitudes sur les débits estimés à partir des CT à toutes les stations hydrométriques opérées par le ministère, ce qui représente un avantage certain dans un contexte opérationnel.

Deux types de modèles ont été considérés à savoir un modèle d'incertitude global où une seule distribution, loi normale ou logistique, est utilisée pour représenter les incertitudes de toutes les CT et un modèle d'incertitude local où les lois normales ou logistiques sont ajustées aux résidus de chacune des CT.

Cinq modèles ont ainsi été proposés : 1) global homoscédastique basé sur la distribution normale ; 2) global homoscédastique basé sur la distribution logistique ; 3) local homoscédastique basé sur la distribution normale ; 4) local homoscédastique basé sur la distribution logistique ; 5) global hétéroscédastique basé sur la distribution logistique. Ce dernier modèle, légèrement plus complexe, tient compte de façon globale des augmentations des incertitudes observés pour les plus petits et les plus grands niveaux jaugés.

Ces modèles ont été testés pour chaque CT à l'aide du test de Kolmogorov-Smirnov, le but étant de voir si les distributions empiriques des résidus relatifs aux CT sont adéquatement représentées par les modèles proposés. Les fractions de CT retenues selon le test de Kolmogorov-Smirnov (seuil de significativité de 95%) pour chaque modèle ont été estimés.

Les résultats montrent que les modèles homoscédastiques locaux, lois normale ou logistique, sont les plus souvent sélectionnées (93.4% des CT pour la loi normale et 93.7% pour la loi logistique). Les ET moyens des CT où ce modèle est retenu sont de 6.7% (écart-type de ±3.8%) pour la loi normale et de 6.6% (écart-type de ±3.6%) pour la loi logistique. Il faut être conscient toutefois que ces estimations ne sont pas du tout représentatives des incertitudes sur les CT où ce modèle a été rejeté par le test de Kolmogorov-Smirnov. Dans ces cas les ET moyens sont de l'ordre de 18.0% pour la loi normale et 18.8% pour la loi logistique.

Le modèle hétéroscédastique global a été retenu pour 85.5% des CT. Ce modèle est le seul qui prenne en compte un possible accroissement des incertitudes en conditions de

faibles ou de grands débits. Il supplante légèrement les modèles globaux homoscédastiques. Malgré son apparente complexité, sa mise en application demeure relativement simple et permet une modulation des incertitudes en fonction du débit. Une analyse plus poussée serait toutefois nécessaire afin de mieux comprendre pourquoi et sous quelles conditions les incertitudes de certaines CT sont ou ne sont pas adéquatement représentées par ce modèle. De plus l'existence de biais pour les petits et les grands débits normalisés devrait être examiné plus attentivement.

Le modèle homoscédastique global est le modèle le plus simple puisqu'il suppose une incertitude moyenne pour toutes les CT, incertitudes indépendantes du niveau jaugé. Suivant ce modèle l'ET de l'erreur sur les débits estimés à partir des CT sont de l'ordre de 8.5 à 10%. Cette simplicité vient évidemment avec son revers, à savoir que ces incertitudes 'moyennes' sous-estimeront, parfois de façon importante, les incertitudes de certaines CT alors qu'elles les surestimeront pour d'autres CT. Ces valeurs peuvent tout de même servir de valeur de référence à défaut d'estimations plus justes des incertitudes locales.

CHAPITRE 11. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Le présent rapport présentait l'ensemble des travaux réalisés dans le cadre du projet *Apport de la modélisation hydraulique et évaluation des incertitudes sur les débits estimés dans les parties extrapolées des courbes de tarage*. Ce projet s'inscrit dans la foulée d'un premier projet intitulé *Évaluation des incertitudes sur les débits de crue maximales estimés à partir des données hydrométriques pour les bassins du Québec méridional* réalisé dans le cadre d'Info-Crue (Mailhot *et al*. 2022).

Les principaux objectifs de ce projet étaient : 1) de quantifier les incertitudes sur les débits estimés dans les parties extrapolées des courbes de tarage (CT); 2) d'évaluer l'apport potentiel de la modélisation hydraulique au développement des CT et à l'estimation des incertitudes des débits de crue estimés en extrapolation des CT; 3) de proposer des versions simplifiées des modèles d'incertitudes; 3) d'évaluer les effets de la saisonnalité et des conditions d'écoulement non permanents sur les CT.

Les données des stations hydrométriques en opération de la *Direction de l'hydrométrie et des prévisions hydrologiques* du MELCCFP (*Ministère de l'Environnement, de la Lutte aux Changements Climatiques, de la Faune et des Parcs*) ont été utilisées. Seules les stations hydrométriques (SH) avec 6 jaugeages ou plus en eau libre ont été considérés pour un total de 173 stations avec en moyenne 58.3 jaugeages par station (minimum de 9 et maximum de 197 jaugeages) couvrant une période de 3 à 98 années (moyenne de 37.7 années). Les dates des jaugeages ont également été utilisées dans le cadre du projet.

Les jaugeages aux stations ont été ajustés à une régression hydraulique (RH), équation largement utilisée pour représenter la relation niveau-débit de plusieurs ouvrages hydrauliques. La procédure d'ajustement des CT a été révisée par rapport à celle décrite dans Mailhot *et al*. (2022). Les paramètres des RH sont dorénavant estimés en minimisant les écarts relatifs carrés moyens (*Mean Square Root Errors*) entre la CT et les jaugeages. Outre cette modification, la procédure de construction des CT demeure en tout point identique à celle décrite dans Mailhot *et al*. (2022). Les séquences de jaugeages ont été partitionnées en sous-périodes chacune pouvant être représentées par une seule CT et chaque CT est représentée par une ou deux RH. Les CT ont été ajustées et les modèles d'incertitudes sélectionnés. Ainsi 89.9% des CT sont représentées par une RH, alors que 9.2% sont représentées par deux RH, les 0.9% restant étant des cas plus compliqués (jaugeages suspects ou plus de 2 RH.

Les modèles d'incertitudes considérées combinent deux types de distributions statistiques, les lois normale (N) et logistique (L), et quatre modèles décrivant l'évolution des écarts-types (ET) de ces distributions en fonction du niveau. Un premier modèle est homoscédastique (ET constant) et les trois autres hétéroscédastiques (ET augmente, diminue, ou diminue puis augmente en fonction du niveau).

La loi normale est sélectionnée pour 67.2% des CT et le modèle homoscédastique pour 89.4% des CT. La loi normale homoscédastique est sélectionnée pour 47.6% des CT, suivie de la loi logistique homoscédastique avec 41.8% des CT, et des lois normales et logistiques hétéroscédastiques (ET décroissant avec le niveau) avec 22.6% et 14.2% des

CT respectivement. Le modèle hétéroscédastique avec un ET croissant avec le niveau a été retenu pour une seule CT.

L'ET médian des CT avec incertitudes homoscédastiques est de 5.1% pour la loi normale et de 5.7% pour la loi logistique. Ces valeurs sont comparables aux valeurs de la littérature (voir par exemple McMillan *et al*. 2012) et jugées représentatives des incertitudes sur les débits estimés dans la partie interpolée des CT. Un examen plus attentif des CT homoscédastiques avec des ET plus élevés montre qu'elles sont souvent problématiques. La présence d'un jaugeage 'marginal', plus éloigné de la CT que les autres gonfle les ET estimés dans plusieurs cas. Un contrôle de qualité supplémentaire de ces jaugeages serait donc nécessaire. L'élimination éventuelle de ces jaugeages diminuerait significativement les ET à plusieurs CT.

Le modèle hétéroscédastique avec ET croissant pour les faibles niveaux est, à une CT près, le seul modèle hétéroscédastique choisi (36.8% des CT). Un effet de 'trompette' (élargissement des incertitudes près du PPNJ) est toutefois observé pour plusieurs CT hétéroscédastiques. Ce type de modèle est souvent sélectionné afin d'intégrer les écarts plus importants des plus petits niveaux jaugés. La sélection de ce modèle peut être symptomatique d'un changement progressif de contrôle pour les faibles niveaux ou d'incertitudes plus importantes sur les plus petits débits jaugés. Plusieurs jaugeages 'suspects' peuvent également expliquer la sélection de ce type de modèle et devraient donc faire l'objet d'un examen complémentaire.

Les quatre CT avec 12 jaugeages ou plus nécessitant un ajustement à plus de deux RH sont toutes problématiques. En effet, les niveaux de transitions identifiés sont parfois questionnables et certains jaugeages sont aussi sujets à caution. Ces CT devraient être l'objet d'analyses complémentaires.

Les exposants hydrauliques des CT fournissent une information sur le type de contrôle hydraulique en place au site des SH. Les exposants estimés ont donc été comparés aux valeurs de divers ouvrages hydrauliques standards (déversoirs avec différents profils, relation débit-niveau obtenue à partir de l'équation de Manning) dont les valeurs sont comprises *grosso modo* entre 1 et 3. La très grande majorité des CT ont des exposants compris dans cette fourchette. Des exposants, dits 'atypiques' ($c < 3$ ou $c < 1$), sont toutefois observés. Ainsi, on compte 47 CT avec des exposants $c > 3$ et trois avec des exposants $c < 1$. Un examen de ces cas a permis d'avancer quatre hypothèses pouvant expliquer ces valeurs : 1) faible nombre de jaugeages et gamme de niveaux jaugés limitée; 2) SH influencées par la présence ou l'opération de barrages en amont; 3) SH en amont de seuil émergeant en conditions d'étiage; 4) effet de compensation entre les paramètres des régressions hydrauliques. Plusieurs de ces facteurs peuvent être en jeu à certaines stations. Un examen plus détaillé serait cependant nécessaire afin d'identifier précisément laquelle ou lesquelles de ces hypothèses peut expliquer ces exposants atypiques. Un tel travail permettrait également de mieux identifier le ou les contrôles hydrauliques en place en chaque site. Les CT avec des exposants atypiques devraient donc être l'objet d'une attention particulière de la part du ministère.

Concernant les possibles effets d'hystérésis sur les CT, deux facteurs sont à considérer : la pente du tronçon et le taux de variation du niveau. Ainsi les effets d'hystérésis seront d'autant plus importants que la crue et la décrue seront prononcées et que la pente du tronçon est faible. Les débits estimés à partir des CT pourraient être biaisés (sous-estimation en crue et surestimation en décrue) dans ces conditions. Les analyses ont porté sur l'impact de l'ampleur de la crue ou de la décrue sur les débits estimés par la CT. Elles n'ont cependant pas permis de discerner un quelconque effet d'hystérésis. Un tel effet pourrait être difficile à détecter compte tenu des autres incertitudes en jeu et du fait que, de façon générale, les jaugeages sont réalisés plus fréquemment en décrue qu'en crue. La prise en compte de la pente des tronçons a été envisagée mais demeure très difficile compte tenu des données de ce type actuellement disponibles. En effet, ces jeux de données ne couvrent pas de façon très complète certains tronçons où se trouvent les SH, ou encore ont des résolutions trop grossières. Dans de telles conditions, il paraît raisonnable de penser que les effets d'hystérésis sont globalement peu significatifs.

Les impacts de la saisonnalité sur les débits estimés à partir des CT ont été analysés. La saisonnalité des CT est attribuable à un changement de la rugosité du lit et des berges au fil des saisons entrainant ainsi une augmentation des pertes de charge et une modification de la relation niveau-débit. Ces changements de rugosité sont essentiellement le fait de la croissance progressive des plantes dans les cours d'eau et sur les berges qui augmente la résistance à l'écoulement, entraîne une diminution des vitesses d'écoulement et un déplacement de la CT. Les conditions pour avoir un effet de la saisonnalité sont : 1) un contrôle hydraulique de type chenal; 2) un lit et des berges du tronçon de contrôle végétalisés. La détection des effets saisonniers nécessite de disposer de jaugeages tout au long de l'année. De plus, les débits jaugés ne doivent pas être plus importants en certaines périodes de l'année, conditions difficiles à satisfaire au Québec.

La détection d'une saisonnalité des CT a été réalisée en calculant les écarts mensuels entre les débits jaugés et ceux estimés à partir des CT, écarts qui sont ensuite ordonnés en fonction des dates des jaugeages. Dans l'hypothèse où la CT correspond à une saisonnalité 'moyennée', elle se manifesterait par une surestimation des débits pour les mois où les plantes sont à maturité (débit et vitesse d'écoulement plus petite pour un niveau donné) et à l'inverse une sous-estimation des débits au printemps lorsque le lit et les berges sont dénudés.

Seuls les CT avec 30% à 70% de jaugeages effectués avant le 1 juillet et plus de 20 jaugeages ont été considérées afin d'avoir une répartition uniforme des jaugeages tout au long de l'année. Des régressions linéaires entre les écarts relatifs et les dates des jaugeages ont été construites et les CT avec les coefficients de détermination les plus élevés ont été retenues parce que plus susceptible d'être influencées par la saisonnalité. La significativité de ces résultats reste à déterminer. Cette approche a toutefois permis d'identifier des sites sujet à une saisonnalité. Elles pourront servir de base de discussions avec les professionnels en charge des campagnes de jaugeages afin de voir si le type de contrôle, la nature des berges et plus généralement les caractéristiques de ces sites sont propices à des effets saisonniers.

Les modèles d'incertitude développés montrent que les ET des écarts relatifs dans les parties interpolées des CT sont de l'ordre ±5% à ±10%. Un sous-échantillon aléatoire des jaugeages des 300 CT représentés par une RH a permis d'explorer les incertitudes en extrapolation des CT. Des sous-échantillons de 10 à 50 jaugeages ont donc été générés aléatoirement et les écarts relatifs (ER) entre les débits estimés à partir des CT des sous échantillons et la CT d'origine sont estimés pour tous les jaugeages de la séquence d'origine. Ces ER ont été ordonnées et regroupées en fonction d'une partition des niveaux relatifs normalisés. Les ER de chacun des intervalles des niveaux relatifs normalisés ont enfin été ajustées à une loi logistique. Les moyennes et ET des ER en fonction du niveau relatif normalisé ont enfin été estimés.

Les résultats montrent que les incertitudes dans les parties extrapolées augmentent à mesure que l'extrapolation est plus importante, mais également que des biais importants apparaissent en extrapolation. Ainsi les débits estimés au-delà du plus grand niveau jaugé (PGNJ) pourraient en moyenne surestimer les débits et les sous-estimer en deçà du plus petit niveau jaugé (PPNJ). Ces biais sont de l'ordre de +5% à +15% pour des niveaux 1.2 fois le PGNJ et de l'ordre de -20% pour des niveaux 0.8 fois le PPNJ. La sous-estimation des faibles débits est très importante et soudaine une fois le PPNJ franchi. Les biais dans la partie interpolée demeurent cependant faibles (-3% et +5%). Ces résultats sont importants puisqu'ils suggèrent une grande prudence dans l'évaluation des débits en extrapolation des CT. L'augmentation des incertitudes près et au-delà du PPNJ et du PGNJ peut aussi être révélatrice de l'approche d'un changement de contrôle hydraulique. Cet effet est par ailleurs plus prononcé lorsque le nombre de jaugeages des échantillons augmente et donc que la gamme de niveaux couvertes par les niveaux jaugés est plus importante et ainsi plus susceptible de se rapprocher de niveaux de transition des contrôles hydrauliques. Il convient de rappeler que cette analyse est globale et révèle un comportement global des incertitudes qui pourrait différer sensiblement de certaines situations locales.

Les simulations hydrauliques réalisées dans le cadre du projet INFO-Crue ont été utilisées pour établir les relations niveau-débit simulées, que l'on désigne par CT simulée. Elles ont été comparées aux CT estimées à partir des jaugeages, que l'on désigne par CT jaugée. Le principal objectif de ces comparaisons était de voir si la modélisation hydraulique (MH) pouvait ajouter une information pertinente, notamment pour l'estimation des débits dans les parties extrapolées de la CT. Huit tronçons de cours d'eau avec des SH ont été analysées. Des écarts importants entre les CT simulée et jaugée sont souvent observés pour certaines gammes de niveaux et parfois sur toute l'étendue des niveaux jaugés. Plusieurs facteurs peuvent expliquer ces écarts. Il est difficile cependant de statuer sur le niveau de confiance à accorder aux CT simulée et jaugée. Dans certains cas, on peut supposer que la CT simulée est plus fiable (p. ex. si le passage en zone inondable est simulé alors qu'aucun jaugeage dans cette gamme de niveau n'est disponible), alors que dans d'autres cas, la CT jaugée sera vraisemblablement plus fiable (p. ex. si l'on dispose de jaugeages alors que les relevés hydrométriques utilisée pour caler le modèle ne couvrent pas cette gamme de niveau). Aucune conclusion générale ne peut donc être

tirée quant à l'apport de la MH au développement des CT et un examen de chaque cas est nécessaire.

La méthode BaRatin (*Bayesian rating curve framework*) permet de construire des CT à partir des jaugeages et de leurs incertitudes et des connaissances *à priori* sur les contrôles hydrauliques. Les différents types de contrôles hydrauliques en jeu doivent être cependant identifiées puisqu'une information à priori sur ces derniers doit être fournir à BaRatin. Différents types de contrôles de type déversoir ou par chenal de diverses formes sont disponibles. L'avantage de BaRatin est donc de permettre d'introduire dans la construction des CT, outre les niveaux-débits jaugés, des informations sur le type de contrôle hydraulique en place, alors que la méthode proposée dans cette étude n'intègre que les données de jaugeages. Le même type de représentation fonctionnelle de type régression hydraulique est utilisée dans les deux cas.

BaRatin a été appliqué à huit SH où l'on disposait d'une information pouvant permettre d'identifier le type de contrôle hydraulique en place. Les CT obtenues par BaRatin ont été comparées aux CT obtenues à partir de la méthode proposée dans la présente étude. Les résultats montrent que l'application de BaRatin est intéressante lorsque les jaugeages ne couvrent pas les fourchettes de niveaux et de débits où de possibles changements de contrôle hydraulique peuvent survenir. Dans ce cas, l'ajout d'information (p. ex. bathymétrie) sur le contrôle hydraulique ou sur des changements de contrôle hydraulique (p. ex. passage en plaine inondable) permet d'investiguer ces parties de la relation niveau-débit. En ce sens, une application à grande échelle pourrait s'avérer tout à fait intéressante et pertinente. Elle exige toutefois de procéder à une analyse *in fine* de chaque site afin d'identifier les contrôles hydrauliques en place.

La possibilité d'utiliser des modèles d'incertitudes plus simples que ceux développés dans le cadre du projet a été explorée. Deux types de modèles ont été considérés à savoir des modèles globaux (incertitudes moyennes pour toutes les CT) ou locaux (incertitudes différentes pour chaque CT). Deux types de représentations des écarts-types (ET) ont aussi été examinées, homoscédastique (ET indépendant du niveau) et hétéroscédastiques (ET variable avec le niveau). Deux distributions ont été considérées, lois normale et logistique. Un total de cinq modèles a ainsi été examiné : 1) distribution normale globale homoscédastique ; 2) distribution logistique globale homoscédastique; 3) distribution normale locale homoscédastique ; 4) distribution logistique locale homoscédastique; 5) distribution logistique globale hétéroscédastique. Ces modèles ont été comparés aux résidus relatifs de chaque CT à l'aide du test de Kolmogorov-Smirnov, et les fractions de CT retenues selon le test de Kolmogorov-Smirnov (seuil de significativité de 95%) ont été estimés pour chaque modèle.

Les modèles homoscédastiques locaux, lois normale ou logistique, sont les plus souvent acceptés (93.4% des CT pour la loi normale et 93.7% pour la loi logistique). Les ET moyens des CT où ce modèle est adéquat sont de 6.7% (écart-type de ±3.8%) pour la loi normale et de 6.6% (écart-type de ±3.6%) pour la loi logistique. Les ET moyens pour les CT où ce modèle est rejeté sont beaucoup plus importants (18.0% pour la normale et 18.8% pour la logistique).

Le modèle hétéroscédastique global a été retenu pour 85.5% des CT. Ce modèle est le seul qui prenne en compte un possible accroissement des incertitudes en conditions de faibles ou de grands débits. Sa mise en place demeure relativement simple et permet une modulation des incertitudes en fonction du débit ce que ne permet pas les autres modèles. Une analyse plus poussée serait toutefois nécessaire afin de mieux comprendre pourquoi et sous quelles conditions les incertitudes de certaines CT ne sont pas adéquatement représentées par ce modèle. L'existence de biais pour les petits et les grands débits normalisés devrait être également examinée plus attentivement.

Le modèle homoscédastique global est le modèle le plus simple puisqu'il suppose une incertitude moyenne indépendante du niveau pour toutes les CT. Les ET de l'erreur des débits estimés sont de l'ordre de 8.5 à 10% selon ce modèle. Ces incertitudes 'moyennes' sous-estimeront, parfois de façon importante, les incertitudes de certaines CT alors qu'elles les surestimeront pour d'autres CT. Elles pourront toutefois servir de valeur de référence à défaut d'estimations plus justes des incertitudes locales.

BIBLIOGRAPHIE

Altenau, E. H., Pavelsky, T. M., Durand, M. T., Yang, X., Frasson, R. P. d. M., Bendezu, L. (2021). The surface water and ocean topography (SWOT) mission river database (SWORD): A global river network for satellite data products. Water Resources Research, 57, e2021WR030054, DOI: 10.1029/2021WR030054

Cohen, S., Wan, T., Islam, M.T., Syvitski, J.P.M. (2018). Global river slope: A new geospatial dataset and global-scale analysis. Journal of hydrology, 563, 1057-1067, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.06.066.

Coxon, G., Freer, J., Westerberg, I.K., Wagener, T., Woods, R., Smith, P.J. (2015). A novel framework for discharge uncertainty quantification applied to 500 UK gauging stations. *Water Resour. Res.*, 51, 5531–5546, DOI: 10.1002/2014WR016532.

Frasson, R. P. D. M., Pavelsky, T. M., Fonstad, M. A., Durand, M. T., Allen, G. H. Schumann, G., Lion, C., Beighley, R. E., Yang, X. (2019). Global database of river width, slope, catchment area, meander wavelength, sinuosity, and discharge. Zenodo. 10.5281/zenodo.2582500

Hrafnkelsson, B., Sigurdarson, H., Rognvaldsson, S., Jansson, A.O., Vias R.D., Gardarsson, S.M. (2022). Generalization of the power-law rating curve using hydrodynamic theory and Bayesian hierarchical modeling. *Environmetrics*, 33;(2), e2711, DOI:10.1002/env.2711.

Jones, B.E., 1915. A method of correcting river discharge for a changing stage. U.S. Geological Survey. Water Supply 375-E, 117–130.

Le Coz, J., Renard, B., Bonnifait, L., Branger, F., Le Boursicaud, R. (2014). Combining hydraulic knowledge and uncertain gaugings in the estimation of hydrometric rating curves: A Bayesian approach. *J. Hydrol.*, 509;(13), 573-587. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2013.11.016.

Linke, S., Lehner, B., Ouellet Dallaire, C., Ariwi, J., Grill, G., Anand, M., Beames, P., Burchard-Levine, V., Maxwell, S., Moidu, H., Tan, F., Thieme, M. (2019). Global hydro-environmental sub-basin and river reach characteristics at high spatial resolution. Scientific Data 6: 283, DOI : 10.1038/s41597-019-0300-6.

Mailhot, A., Bolduc, S., Talbot, G. (2023). Apport de la modélisation hydraulique et évaluation des incertitudes sur les débits estimés dans les parties extrapolées des courbes de tarage. Université du Québec, Institut national de la recherche scientifique, Centre Eau, Terre et Environnement. Rapport d’étape, Ouranos, Ministère de l’environnement et de la lutte contre les changements climatiques, 85 p.

Mailhot, A., Bolduc, S., Talbot, G. (2022). Évaluation des incertitudes sur les débits aux stations hydrométriques du Québec méridional. Rapport final, Institut National de la Recherche Scientifique Centre Eau, Terre et Environnement, Québec, juin 2022, 249 p.

McMillan H., Krueger T., Freer J. (2012). Benchmarking observational uncertainties for hydrology: Rainfall, river discharge and water quality. *Hydrol. Process*., 26, 4078–4111, DOI: 10.1002/hyp.9384.

Muste, M., Lee, K., Kim, D., Bacotiu, C., Oliveros, M.R., Cheng, Z.Y., Quintero, F. (2020). Revisiting hysteresis of flow variables in monitoring unsteady streamflows, J. Hydraul. Res., 58(6) : 867-887. DOI: 10.1080/00221686.2020.1786742

Perret, E., Lang, M., Le Coz, J. (2022). A framework for detecting stage-discharge hysteresis due to flow unsteadiness: Application to France's national hydrometry network J. Hydrol. 608. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.127567.

Perret, E., Renard, B., Le Coz, J. (2021). A Rating Curve Model Accounting for Cyclic Stage-Discharge Shifts due to Seasonal Aquatic Vegetation. Water Resources Research 57, e2020WR027745. DOI : 10.1029/2020WR027745.

Rantz, S. E. (1982a). Measurement and computation of streamflow: Volume 1. Measurement of stage and discharge, USGS Water Supply Paper, Washington, DC: (Technical Report). US Government Printing Office.

Rantz, S. E. (1982b). Measurement and computation of streamflow: Volume 2. Computation of discharge, USGS Water Supply Paper, Washington, DC, USA: (Technical Report). US Government Printing Office.